

DISEÑO DE UN SISTEMA LOGÍSTICO PARA SUPLIR LA DEMANDA DE
COMBUSTIBLE EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO EN BOGOTÁ (STMB) CON
BIODIESEL OBTENIDO A PARTIR DEL PIÑÓN *Jatropha curcas*

JOHANNA CAMARGO PÉREZ

UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS
ÉNFASIS EN LOGÍSTICA

Septiembre de 2009

DISEÑO DE UN SISTEMA LOGÍSTICO PARA SUPLIR LA DEMANDA DE
COMBUSTIBLE EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO EN BOGOTÁ (STMB) CON
BIODIESEL OBTENIDO A PARTIR DEL PIÑÓN *Jatropha curcas*

PROYECTO DE GRADO PARA OBTENER EL TITULO COMO MAGISTER EN DISEÑO Y
GESTION DE PROCESOS

JOHANNA CAMARGO PÉREZ

DIRECTOR
MSC. LEONARDO JOSE GONZÁLEZ.
CODIRECTOR
CANDIDATO A DOCTOR FERNANDO GUTIERREZ FERNANDEZ

UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS
ÉNFASIS EN LOGÍSTICA

Septiembre de 2009

Nota de aceptación.

Dr. Dusko Kalenatic.

Msc. Edgar Alfonso

Dr. Santiago Saézn

Bogotá. Septiembre 11 de 2009

Mis agradecimientos a Dios por guiarme y sostenerme en el desarrollo de este trabajo, al director Leonardo González, al codirector Fernando Gutiérrez Fernández, por su orientación y apoyo permanente, a mi familia, por su amor y acompañamiento continuo y a mis amigos Yuta y Marco, quienes me acompañaron cuando más los necesité.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE ANEXOS.....	xii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1064
1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MARCO LÓGICO PARA LA ESTRUCTURACIÓN DEL PROYECTO	1076
1.1 Antecedentes y estado del arte.....	16
1.1.1 Uso de biocombustibles en el sistema de Transporte Masivo.....	16
1.1.2 Producción biodiesel en Colombia.....	18
1.1.3 Consideraciones de tipo agrícola Colombianas.....	21
1.1.4 Consideraciones sobre la <i>Jatropha curcas</i>	22
1.1.5 Consideraciones sobre el biodiesel obtenido a partir de <i>Jatropha curcas</i> y sus efectos en el diseño del sistema logístico.....	24
1.1.6 Consideraciones logísticas.....	29
1.1.7 Consideraciones de tipo ambiental.....	29
1.2 Definición del Problema.....	30
1.3 Hipótesis.....	30
1.4 Objetivo General.....	31
1.5 Objetivos Específicos.....	31
1.6 Impactos Esperados.....	32
2. ESTABLECIMIENTO DE FACTORES PARA EL ANÁLISIS DE LA DEMANDA Y DESARROLLO DE PRONOSTICOS.....	35

2.1 Comportamiento de la demanda	35
2.1.1. Cálculo del rendimiento del Diesel tradicional.....	35
2.1.2 .Distribución de la demanda para cada Cliente.....	38
2.2 Pronósticos.....	39
2.2.1 Desarrollo de línea de tendencia.....	39
2.2.2 Promedio móvil simple con ocho períodos.....	42
2.2.3 Proyección de temporada.....	44
2.2.4 Promedio Móvil Ponderado.....	46
2.2.5 Suavización Exponencial con una Tendencia	47
2.2.6 Comparativo entre las técnicas de Pronósticos.....	49
3. DISEÑO Y VALIDACIÓN DE CRITERIOS PARA DESARROLLO DE MACRO LOCALIZACIÓN A TRAVES DE LA TECNICA DELPHI.....	52
3.1 Diseño de criterios para la selección de lugares aptos para la localización.....	52
3.2 Evaluación de la pertinencia del Sistema de Indicadores propuesto.....	53
3.3 Revisión de los macrocriterios e indicadores seleccionados.....	55
3.3.1.1 Condiciones de Altitud.....	55
3.3.2 Inclusión de aspectos institucionales para la evaluación de los municipios.....	56
3.3.3 Inclusión en el criterio Nivel de calificación de los habitantes de los municipios evaluados, si hay mayor adaptación a mono o policultivos.....	57
3.3.4 Definición del significado de tierras en conflicto con mayor precisión.....	57
3.3.5 Medición de los criterios por zonas agroecológicas.....	58
3.3.6 Pertinencia de priorizar los municipios por distancias.....	59
4. DESARROLLO DE MACROLOCALIZACIÓN APLICANDO EL METODO PROCESO JERARQUICO ANALITICO (AHP).....	60
4.1 Resultados preliminares de la exploración de información asociada a los macrocriterios.....	60
4.2 Aplicación del Proceso Jerárquico Analítico (AHP).....	64
5. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO.....	70
5.1 Cadena de Suministro	70
5.1.1 Cultivadores.....	71
5.1.2 Plantas de extracción.....	73
5.1.3 Refinerías.....	74
5.1.4 Mayoristas.....	75
5.1.5 Clientes.....	75
5.1.6 Metodología de cálculo de distancias entre los actores de la cadena	

de suministro.....	75
6. SELECCIÓN, DISEÑO Y DESARROLLO DEL MODELO DE TRANSPORTE PARA EL SISTEMA LOGÍSTICO.....	78
6.1 Antecedentes.....	78
6.2 Supuestos del modelo.....	78
6.3 Desarrollo Modelo matemático.....	81
6.3.1 Variables del modelo.....	81
6.3.2 Función Objetivo.....	86
6.3.3 Retricciones.....	86
6.3.4 Estructura de Costos.....	88
6.3.5 Análisis de capacidades.....	89
6.3.5.1 Plantas Extractoras.....	89
6.3.5.2 Refinerías.....	90
6.4. Homogenización de variables y presentación de escenarios:.....	91
6.5 Análisis de Resultados.....	92
7. CONCLUSIONES E INVESTIGACION FUTURA.....	99
7.1 Conclusiones.....	99
7.2 Investigación Futura.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	10602
ANEXOS.....	103

LISTA DE TABLAS

Página

Tabla 1. Kilómetros recorridos Fase I y Fase II Sistema de transporte masivo Bogotá.....	37
Tabla 2. Distribución de kilómetros por cliente.....	39
Tabla 3. Desarrollo pronóstico aplicando tendencia lineal.....	40
Tabla 4. Aplicación promedio móvil simple con 8 períodos.....	43
Tabla 5. Aplicación técnica Proyección de temporada.....	44
Tabla 6. Aplicación promedio móvil ponderado.....	46
Tabla 7. Aplicación de pronóstico de suavización exponencial con una tendencia con un α de 0,8.....	48
Tabla 8. Aplicación de pronóstico de suavización exponencial con una tendencia con un α de 0,2.....	49
Tabla 9. Comparativo de técnicas de pronósticos de acuerdo con medidas asociadas al error de predicción.....	50
Tabla 10. Pronóstico de la demanda del STMB para 2009 y 2010.....	51
Tabla 11. Pronóstico de la demanda trimestral por cliente para 2009 y 2010.....	62
Tabla 12. Municipios seleccionados en Cundinamarca como potenciales sitios de cultivo	

de <i>Jatropha curcas</i>	63
Tabla 13 Municipios seleccionados en el Tolima como potenciales sitios de cultivo de <i>Jatropha curcas</i>	64
Tabla 14 Municipios seleccionados en Santander como potenciales sitios de cultivo de <i>Jatropha curcas</i>	66
Tabla 15. Calificación otorgada a la variable Régimen de Lluvias.....	66
Tabla 16. Calificación por rango de tierras desertificadas de los municipios.....	66
Tabla 17. Calificación por compatibilidad con la actividad económica.....	67
Tabla 18. Calificación de municipios de acuerdo con estado de las vías.....	72
Tabla 19. Caracterización de municipios de Cundinamarca.....	73
Tabla 20. Caracterización de municipios de Santander.....	74
Tabla 21. Análisis situacional de Plantas de Extracción.....	75
Tabla 22. Análisis Situacional Refinerías.....	77
Tabla 23. Validación confiabilidad cálculo distancias.....	82
Tabla 24. Municipios seleccionados.....	83
Tabla 25. Plantas extractoras.....	84
Tabla 26. Clientes.....	89
Tabla 27. Estructura de costos.....	90
Tabla 28. Capacidades Plantas Extractoras.....	90
Tabla 29. Capacidades Refinerías.....	91

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Comparativo de los promedios de Opacidad.....	17
Figura 2. Emisiones en ruta NOx.....	18
Figura 3: Emisiones en ruta de CO ₂	18
Figura 4. Emisiones en ruta- Material particulado.....	19
Figura 5. Incremento del uso de biodiesel.....	20
Figura 6. Rendimiento de materias primas.....	20
Figura 7 .Properties of diesel, methanol, Jatropha oil and methyl ester of Jatropha oil.....	25
Figura 8: Fatty acid profile of Jatropha oil	25
Figura 9. Importaciones glicerina en toneladas años 2005-2007.....	28
Figura 10 Subproductos de la <i>Jatropha</i> y sus usos potenciales.....	28
Figura 11: Etapas en el Diseño del Sistema Logístico.....	32
Figura 12. Rendimiento del diesel en kilómetros recorridos por galón.....	37
Figura 13 Consumo de diesel tradicional en el sistema de transporte masivo de Bogotá, en el 2006, 2007 y 2008.....	37
Figura 14 Demanda real Vs. Demanda proyectada con promedio móvil Simple.....	40
Figura 15 Señal de rastreo con tendencia lineal	42
Figura 16. Demanda Real Vs. Demanda Proyectada con promedio	

móvil simple.....	43
Figura 17 Señal de rastreo con promedio móvil simple	44
Figura 18.Demanda con índice de temporada trimestral.....	45
Figura 19. Demanda real Vs. Demanda con promedio móvil ponderado.....	47
Figura 20 Demanda real Vs. Demanda suavizada exponencialmente.....	49
Figura 21. Diseño inicial del sistema de indicadores para la localización de Cultivos.....	53
Figura 22 Origin of seed provenances and climatic data of collecting sites.....	56
Figura 23. Sistema de indicadores para la macrolocalización.....	65
Figura 24. Selección de municipios de Cundinamarca realizada en Expert Choice.....	69
Figura 25. Selección de municipios de Santander realizada en Expert Choice.....	69
Figura 26. Diagrama cadena de suministro.....	70
Figura 27: Resultados en el abastecimiento de la demanda en el escenario 1.....	93
Figura 28: Resultados en el abastecimiento de la demanda en el escenario 2.....	94
Figura 29: Resultados en el abastecimiento de la demanda en el escenario 2.....	96
Figura 30. Algoritmo para la ejecución de escenarios en el modelo de programación matemática	97

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Artículo realizado sobre la investigación: Aplicación de técnicas de macrolocalización en la selección de cultivos de *Jatropha curcas* para suplir la demanda de biodiesel en el sistema de transporte masivo de Bogotá, presentado a la Revista Ingeniería de la Universidad de los Andes el 31 de marzo de 2009.

Anexo 2 Cuestionarios metodológicos utilizado en la aplicación del método Delphi

Anexo 3. Mapa de departamentos con caracterización de distancias.

Anexo 4: Código Gams para los escenarios del modelo matemático.

RESUMEN

Se expone en este trabajo la caracterización de la cadena de suministro para abastecer la demanda de biodiesel obtenido a partir de la *Jatropha curcas* en el Sistema de transporte masivo de Bogotá (BRT), presentando el diseño de un sistema logístico con sus entradas, metodología para la obtención de las mismas y como éstas, permiten la modelación de la cadena de suministro, buscando optimizar costos y mostrando la viabilidad económica de producir biodiesel producido con *Jatropha* para un Sistema de Transporte masivo en cualquier ciudad interesada en este tipo de desarrollos para el transporte público, contribuyendo al conocimiento en sistemas logísticos al combinar tres técnicas de selección multicriterio sin antecedentes en esta combinación, con el propósito de minimizar impactos en la utilización una materia prima alternativa a la palma de aceite para el suministro de biodiesel en sistemas de transporte masivo.

INTRODUCCIÓN

En el marco de la ley 693 de 2001, que determina la mezcla de la gasolina con el etanol, la cual fija un aumento progresivo en el tiempo hasta el año 2009, normatividad que está en concordancia con la ley 939 de 2004 que estimula la producción y comercialización de biodiesel en motores diesel, existe en Colombia la necesidad de reemplazar el uso de los combustibles de origen fósil por biocombustibles, esto como parte de una estrategia global para reducir los efectos del calentamiento global, efectos que no han sido, ni son ajenos a nuestro país. La materia prima que predomina para la producción de biodiesel en Colombia es la palma africana, pasando de 185.165 hectáreas en el 2002 a 301.810 en el 2006 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2008) con tendencia al crecimiento en el 2007 y 2008.

Sin embargo dentro de la producción de biocombustibles, se presenta la discusión alrededor de los efectos que pueda tener la producción de los mismos en el balance alimentario mundial, al generar escasez y por ende un incremento de precios en productos clave para la elaboración de alimentos, en el caso de la palma como materia prima fundamental para la elaboración de aceite de cocina, margarinas y mantecas (Observatorio Agrocadenas, 2008).

Frente a esta situación de incremento de los cultivos para la producción de biocombustibles con materias primas claves para la alimentación, aparece la *Jatropha* curcas como una especie no comestible, que además tiene la potencialidad de recuperar los suelos, produciendo un aceite para diesel muy parecido al obtenido del petróleo (Garnayak, 2007).

El Sistema de Transporte Masivo de Bogotá (STMB) presenta una demanda de combustible de alrededor de 1'200.000 galones mensuales en los buses articulados, siendo pionero en Colombia en la participación de Programas de Excelencia ambiental en el ámbito del transporte, necesitando por lo tanto cumplir con el 10% de biodiesel exigido por la ley sobre la totalidad de

su consumo, por lo cual, es un escenario clave para la ejecución de las pruebas y mediciones con biodiesel, como sistema modelo de transporte masivo en Colombia.

A partir de esta necesidad y con la posibilidad de producir biodiesel a partir de la *Jatropha curcas*, surge la propuesta de diseñar un sistema logístico que abastezca la demanda de biodiesel que exige la ley, buscando minimizar los posibles impactos ambientales, de sustentabilidad ambiental, sociales y logísticos.

Para el diseño del Sistema, se utilizan varias metodologías de forma secuencial, las cuales se enuncian a continuación, y que conforman un modelo innovador para la toma de decisiones:

- a. Técnica Delphi
- b. Método de Proceso Jerárquico analítico (AHP).
- c. Caracterización de la cadena de suministro
- d. Modelo de programación matemática para el diseño de la cadena de suministro.

Lo cual permite, que este modelo se pueda adaptar y replicar para otros problemas que impliquen la toma de decisiones multicriterio, incluidos los de suministro de biocombustibles en los diferentes Sistemas de Transporte en Colombia y del mundo, con características y necesidades similares al analizado.

1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MARCO LÓGICO PARA LA ESTRUCTURACIÓN DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes y estado del arte

En este capítulo se expondrán los antecedentes del uso de biocombustibles en el transporte masivo, consideraciones sobre la producción de biodiesel en Colombia, condiciones agrícolas en el país que facilitarían la revisión de nuevas alternativas además de la palma de aceite, cultivo predominante en Colombia para la producción de biodiesel, las ventajas y especificaciones del uso de la *Jatropha curcas* como materia prima para la producción de biodiesel, especificaciones de las herramientas logísticas disponibles para el desarrollo del presente proyecto y algunas particularidades de tipo ambiental, con el fin de contextualizar sobre los posibles beneficios de este trabajo.

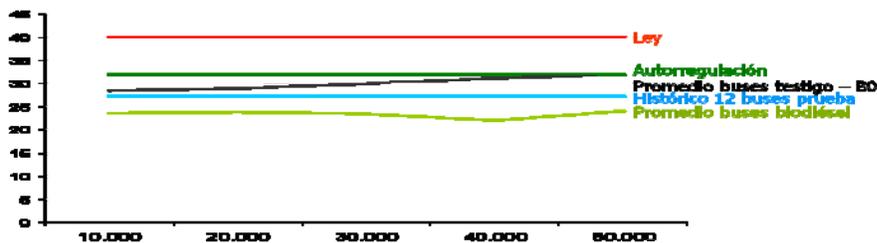
1.1.1 Uso de biocombustibles en el sistema de Transporte Masivo

Cenipalma, Ecopetrol, SI99 S.A y Fedepalma (Ecopetrol, 2008), han trabajado en conjunto un proyecto para conocer los efectos del uso de biodiesel de palma de aceite utilizando mezclas de diesel y biodiesel de palma al 5, 10, 20, 30 y 50%, que cumplen con las especificaciones de

calidad establecidas para el combustible diesel en Colombia, en un grupo base de doce buses articulados en Bogotá que han sido monitoreados durante cien mil kilómetros de recorrido, bajo las condiciones normales de operación de estos vehículos, encontrando los siguientes resultados:

1. No se han presentado problemas de choque térmico durante el tanqueo a los buses, en las condiciones de operación de la planta de Usme. (Estudios realizados por Cenipalma y Ecopetrol-ICP).
2. La concentración de saturación del biodiesel con agua está alrededor de 1600 partes por millón (ppm) a 25°C y cerca de 1800 ppm a 35°C, esta concentración se alcanza en un día, lo anterior indica que el biodiesel debe ser protegido de la humedad por su alta higroscopicidad.
3. El rendimiento de combustible con las mezclas diesel – biodiesel de palma se encuentra dentro de la franja de rendimiento registrada por la flota de SI99 con diesel tradicional (6,3 Kilómetros recorridos por galón, datos a 31 de Julio de 2008)
4. Se halló que el contenido de humedad en el biodiesel entregado a los buses se encuentra dentro de las especificaciones de almacenamiento esperadas, esto significa que, en el tanque de almacenamiento del biodiesel del Patio de operaciones de Transmilenio S.A localizado en Usme (lugar donde estuvo ubicada la planta para el proyecto), fue posible controlar la humedad impidiendo el ingreso de humedad con sílica-gel.
5. Se evidenció una tendencia a cumplir con la opacidad superando las expectativas legales, respecto a los buses que no utilizan biodiesel, como se puede ver en la figura 1:

Figura 1 Comparativo de los promedios de Opacidad

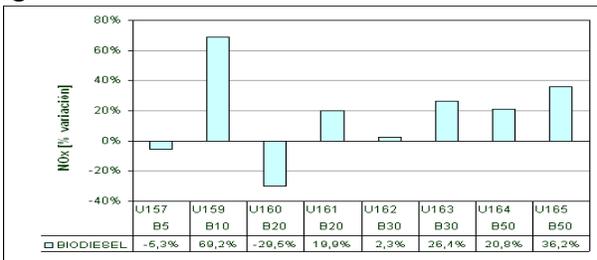


Fuente: Informe avance Proyecto biodiesel- TM 2008, Cenipalma, Ecopetrol, SI99 S.A, Fedepalma, septiembre de 2008

6. Respecto al análisis de aceite realizado a los buses, cada 10.000 Km se encontró que:

- El contenido de metales por desgaste se encuentra en concentraciones normales.
 - En cuanto a la oxidación del aceite lubricante, los resultados señalan que las muestras de aceite analizado presentan estados de oxidación normales de acuerdo con el kilometraje de uso del lubricante.
 - No se presenta contaminación del aceite por el combustible, lo cual sugiere que no se han presentado fugas a través de los orings y las empaquetaduras de la bomba del sistema de inyección.
7. Se han apreciado sedimentos en el fondo del tanque de biodiesel (B100). Se están identificando las causas de esta problemática y se están evaluando algunas formas de manejo.
8. En cuanto a las pruebas de emisiones en ruta, se evidenció que:
- Hay una tendencia de aumento de emisión de óxidos de nitrógeno (NO) en las mezclas de más del 30%, como se aprecia en la figura 2.

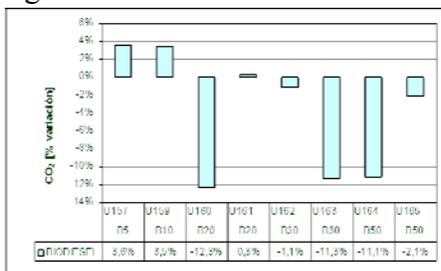
Figura 2: Emisiones en ruta NO



Fuente: Informe avance Proyecto biodiesel- TM 2008, Cenipalma, Ecopetrol, SI99 S.A, Fedepalma, septiembre de 2008

- Se aprecia en la figura 3 una tendencia de disminución del Dióxido de Carbono (CO₂) con el uso de las mezclas.

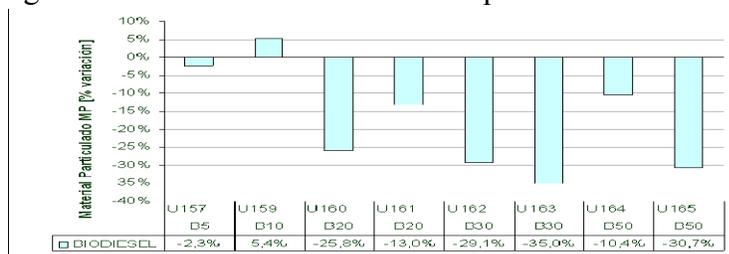
Figura 3: Emisiones en ruta de CO₂



Fuente: Informe avance Proyecto biodiesel- TM 2008, Cenipalma, Ecopetrol, SI99 S.A, Fedepalma, septiembre de 2008.

- Se evidenciaron disminuciones de emisiones de material particulado al aumentar la mezcla de biodiesel-diesel, como se evidencia en la figura 4:

Figura 4: Emisiones en ruta- Material particulado



Fuente: Informe avance Proyecto biodiesel- TM 2008, Cenipalma, Ecopetrol, SI99 S.A, Fedepalma, septiembre de 2008.

De lo cual se concluye que en términos generales, los resultados de la utilización de biodiesel en este tipo de vehículos, no genera repercusiones negativas en la máquina. Se evidenciaron también disminuciones en las emisiones con respecto a los vehículos que utilizan diesel tradicional y aunque el biodiesel es más sensible a la humedad, se pueden garantizar condiciones adecuadas de almacenamiento en un patio de operaciones tipo del Sistema de Transporte Masivo. Siendo este un antecedente importante que señala que bajo unas condiciones similares de desempeño de otros biodiesel con respecto al de palma, el biodiesel en buses de Transmilenio no genera efectos negativos.

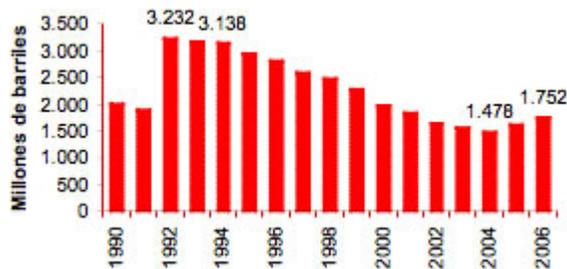
1.1.2 Producción biodiesel en Colombia

El Estado Colombiano ha fijado los lineamientos para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia, a través del documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES 3510, dentro del cual se enuncia la disposición del Ministerio de Minas y Energía (MME) de adoptar las medidas necesarias para que en todo el país la gasolina contenga un 10% de alcohol carburante y el diesel contenga un 10% de biodiesel a partir del

2010, evaluando la conveniencia y viabilidad técnica de incrementar estos porcentajes. Siendo el MME el garante de establecer los requisitos técnicos y de seguridad para la producción y el uso de los biocombustibles, adicionalmente, el MME y el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) son responsables de determinar los criterios ambientales de calidad de los combustibles, de establecer los requisitos técnicos, de calidad y de seguridad para la producción y el uso de los biocombustibles (Departamento Nacional de Planeación, 2008).

En Colombia se observa una marcada tendencia al uso del diesel de acuerdo a los estudios de la Unidad de Planeación Minero Energético, como se muestra la figura 5, siendo cada vez de mayor relevancia para las políticas energéticas del país la producción de biodiesel, buscando aprovechar de la mejor manera sus recursos.

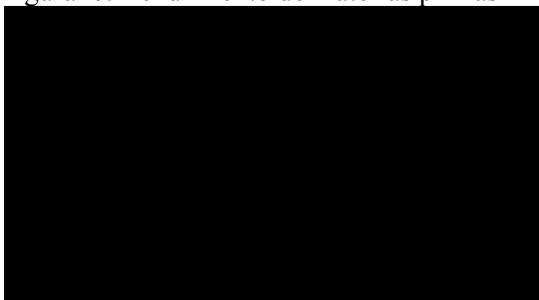
Figura 5. Incremento del uso de biodiesel



Fuente: Ministerio de Agricultura, Programas y Políticas Misionales, biocombustibles, 2008.

Igualmente, las reservas de petróleo colombianas están disminuyendo, por lo que el menor consumo de combustibles fósiles, gracias al uso de biocombustibles, contribuirá al fortalecimiento de las reservas de petróleo (Ministerio de Agricultura, 2008). Bajo estas consideraciones, se tienen en Colombia varias materias primas para la producción de biodiesel, las cuales presentan diversos rendimientos, como podemos observar en la figura 6 Rendimiento de materias primas que publica el Ministerio de Agricultura de Colombia:

Figura 6. Rendimiento de materias primas



Fuente: Ministerio de Agricultura de Colombia en <http://www.minagricultura.gov.co/02componentes/05biocombustible.aspx> consultado en septiembre de 2008.

En la figura anterior se observa, que es la palma de aceite la especie que ofrece mayor rendimiento por hectárea/año, dada esta ventaja y que es ésta una planta propia de climas cálidos, que crece por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar (msnm), condiciones presentes en varios departamentos de Colombia, se comprende que sea Colombia el primer productor de palma de aceite en América Latina y el cuarto en el mundo (Federación de Cultivadores de Palma de Aceite, 2008), teniendo en el país 329.450 hectáreas sembradas con esta especie para la obtención de biodiesel (Ministerio de Agricultura, 2008) frente a 18.000 hectáreas producidas en la década de 1960, actualmente está sembrada en 73 municipios del país distribuidos en cuatro zonas productivas, siendo los departamentos que poseen más área sembrada en palma de aceite, en orden descendiente: Meta, Cesar, Santander, Magdalena, Nariño, Casanare, Bolívar, Cundinamarca y Norte de Santander.

Sin embargo, el aceite de palma se emplea principalmente como aceite de cocina y en la elaboración de productos de panadería, pastelería, confitería, heladería, sopas instantáneas, salsas, diversos platos congelados y deshidratados, cremas no lácteas para mezclar con el café. A su vez, los aceites de palma y palmiste sirven de manera especial en la fabricación de productos oleoquímicos como los ácidos grasos, ésteres grasos, alcoholes grasos, compuestos de nitrógeno graso y glicerol, elementos esenciales en la producción de jabones, detergentes, lubricantes para pintura, barnices, gomas y tinta (Federación de Cultivadores de Palma de Aceite, 2008). Este cultivo es la base de la agroindustria de aceites y grasas en Colombia, constituyendo junto con el aceite crudo de soya y girasol, el grueso de materias primas para la elaboración de aceites comestibles, margarinas y mantecas, además, su cuantía se ve aumentada si se considera que la canasta de bienes de la industria de aceites hace parte de un segmento nada escaso del gasto básico en alimentos, de todos los estratos socioeconómicos. Lo anterior es importante si se tiene en cuenta, que en Colombia, aproximadamente el 40% de los sueldos mensuales, son gastados en alimentos (Observatorio Agrocadenas Colombia).

1.1.3 Consideraciones de tipo agrícola Colombianas

Colombia tiene una superficie continental de 114'174.800 Km² de los cuales el 37% son productivas, las cuales están desagregadas así: 9% con actividad agrícola, el 73% con pastos malezas y rastrojos, el 18% con bosques, no se incluye la superficie de bosques no colonizados, colonizados y plantados, parques naturales y páramos, superficies con actividades no agropecuarias y otros (Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 2000).

El territorio nacional está dividido en tres sectores territoriales, respecto a la tenencia de la tierra y población, el área rural fraccionada en la propiedad, las reservas forestales y parques nacionales y las reservas y resguardos indígenas, siendo el primero el que está vinculado con la producción agrícola del país. Para el 2001 el país contaba con una extensión aproximada de 86'110.484 hectáreas con 3'226.239 predios y 4'473.08 propietarios, lo cual arroja un tamaño promedio de explotación de 26,7 hectáreas (IGAC, 2000).

Del total de la superficie del país, en el período 1996-2000 el 63,46% está representado en cultivos permanentes y el 36,54% en cultivos transitorios. Los departamentos con mayor superficie dedicada en términos agrícolas son Antioquia, Tolima, Valle del Cauca, Cundinamarca, Boyacá y Santander y a su vez los departamentos con menor superficie dedicada son Atlántico, Cesar, Vichada, Guainía, Casanare, Vaupés, Amazonas, Arauca y Guaviare. En términos climáticos Colombia presenta condiciones favorables dado los pisos térmicos que tiene. En el piso térmico cálido se tienen cultivos como arroz, algodón, sorgo, caña de azúcar, palma, tabaco, banano, soya, girasol, ajonjolí, yuca, maní, maíz y frutales; en el piso templado se cuenta con el café, maíz, yuca, caña panelera, frijol, plátano, frutales y hortalizas, en el piso frío se tienen los cultivos de papa, cebada, trigo, maíz, hortalizas y frutales. Bajo estas condiciones, se presenta una alta potencialidad en nuestro territorio para el cultivo de la *Jatropha curcas*, planta no comestible, como se observa en el numeral 2.2.4 y que se ha dado satisfactoriamente en temperaturas desde los 11° aunque con un promedio de 23,99° de acuerdo con un experimento realizado con 13 especies de semillas en dos regiones de la India, Senegal y Cabo Verde (Heller, 1996), teniendo Colombia posibles oportunidades de estimular el desarrollo agrícola de algunos municipios para la plantación del piñon utilizando sus tierras desertificadas, con unos criterios de selección claramente definidos.

1.1.4 Consideraciones sobre la *Jatropha curcas*

Observando las implicaciones del cultivo de palma en términos de la competencia que se tendría entre cultivarla para producir aceite de cocina o producir biodiesel y de acuerdo con la situación de inseguridad alimentaria que se presenta en el mundo (FAO, 2006) , siendo la palma la principal fuente para la producción de biodiesel en Colombia y a su vez la principal fuente para la fabricación de aceite comestible, margarinas y mantecas, emerge la *Jatropha curcas* conocida como piñón, como una nueva alternativa para la producción de biodiesel en Colombia, que no busca competir con el rendimiento de la palma, sino que más bien podría complementar la producción de biodiesel, brindando otras potencialidades, las cuales son enunciadas a continuación:

- La planta crece en suelos de poca fertilidad y degradados (Garnayak, 2007), existiendo en Colombia zonas con suelos desertificados, áreas potenciales para este cultivo (Ministerio de Ambiente, 2008).
- Climáticamente, la *Jatropha curcas* L. se encuentra en climas tropicales y subtropicales (Berchmans, 2007) de lo cual se deduce que siendo Colombia de clima tropical, la *Jatropha curcas* se puede dar en este país.
- Se han encontrado experiencias de producciones razonables con pocos insumos para el cultivo (Garnayak, 2007).
- Es una planta toxica (Hirota 1998, Gandhi 1995), por lo tanto no es comestible, lo que favorece que su cultivo no aporte a la posible crisis alimentaria acentuada por la producción de biocombustibles.
- El aceite producido a partir de su semilla es semejante al diesel obtenido del petróleo (Garnayak, 2007).
- Su producción se estabiliza después del quinto año. El ciclo productivo de la *Jatropha curcas* es de aproximadamente 50 años (Garnayak, 2007).
- Existen métodos para extraer el aceite de la semilla de *Jatropha curcas*, avalados científicamente (Berchmans, 2007).

- La semilla genera un contenido de aceite entre el 30 y 40 por ciento y de acuerdo con el peso del grano se puede extender del 45 al 55% (Lahane and Relwani 1986)
- La *Jatropha curcas* es resistente a la sequía (Cano-Asseleih, 1986; Cano-Asseleih et al., 1989)
- Los subproductos se pueden utilizar para la producción de fertilizantes, abonos jabones o para fines medicinales (Kumar, 2008).
- El aceite de semilla de *Jatropha* fue usado como un sustituto de gasolina durante la segunda Guerra Mundial. Pruebas de motor con el aceite de *Jatropha* fueron hechas en Tailandia, mostrando el funcionamiento satisfactorio de motor (Takeda, 1982), (Kumar, 2008).
- Existen las máquinas para descascarar y para extraer el aceite de la semilla de *Jatropha curcas*, las cuales han sido probadas en cultivos experimentales (Sotolongo, 2007).
- La cáscara también puede transformarse, mediante un proceso de digestión anaerobia, en biogás y biofertilizante (efluente del digestor), lo que podría optimizar los rendimientos energéticos (Sotolongo, 2007).
- De los resultados de las pruebas a las propiedades y el motor, ha sido establecido que el 40-50 % de aceite de *Jatropha* puede ser substituido por el gasoil sin requerir modificación de motor y precalentamiento de las mezclas (Pramanik, 2003).

Por todas estas consideraciones, se advierte la posibilidad de evaluar la implementación de cultivos de *Jatropha curcas* como el inicio de la cadena de suministro para suplir la demanda de biodiesel en el sistema de transporte masivo de Bogotá, buscando el cumplimiento de las disposiciones del Estado en torno a esta materia, usando un cultivo alternativo, que ofrece ventajas de tipo social y ambiental de acuerdo con experiencias en otros países de clima tropical como el de Colombia.

1.1.5 Consideraciones sobre el biodiesel obtenido a partir de *Jatropha curcas* y sus efectos en el diseño del sistema logístico

Se presentan a continuación las propiedades del biodiesel de *Jatropha* respecto a las del diesel tradicional y como éstas inciden en el diseño del Sistema Logístico y se muestran igualmente, algunos antecedentes sobre el uso de este biocombustible en automóviles, para evidenciar la viabilidad del uso de esta materia prima para la obtención de biodiesel.

- **Propiedades del biodiesel de *Jatropha* versus el diesel convencional:**

Respecto a las propiedades del diesel de *Jatropha* curcas, con respecto al diesel convencional, se presenta la información de las figuras 7 y 8:

Figura 7 .Properties of diesel, methanol, Jatropha oil and methyl ester of Jatropha oil.

Properties	Diesel	Jatropha oil(mean)	Methyl ester of Jatropha oil	Methanol
Density (kgm ⁻³)	840	914	880	790
Calorific value (kJ kg ⁻¹)	42,49	39,63	38,45	19,674
Viscosity (cst)	4.59	46,3	5.65	-
Cetane number	45–55	46,3	50	3–5
Flash point (°C)	50	235	170	-
Carbon residue (%) (kgkg ⁻¹ 100)	0.1	0,38	0.5	0.0

Fuentes: Vinayak and Kanwarjit, 1991;Basker, 1993 ; W.M.J.Achtna, L.Verchothb, Y.J.Frankenc, E.Mathijds, V.P.Singhe, R.Aertsa, B.Muysa, january 2008.

Figura 8: Fatty acid profile of Jatropha oil

Fatty acid profile	Content % (m/m)
Myristic acid	0.38
Myristic acid	16.0 max
Palmitic acid	
Palmitoleic acid	1–3.5
Stearic acid	6–7.0
Oleic acid	42–43.5
Linoleic acid	> 0,80
Arachidic acid	0,20
Gadoleic acid	0,12

Fuente: Neyda C. Om Tapanes a, Donato A. Gomes Aranda a, José W. de Mesquita Carneiro b, Octavio A. Ceva Antunes c, Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction, Elsevier

El aceite de la *Jatropha curcas* presenta antecedentes en el cumplimiento de normas de calidad respecto a sus propiedades en EE.UU y Europa (Sirisomboon, 2007) y cuenta con propiedades como: acidez baja, buena estabilidad de oxidación, comparado con la baja viscosidad del aceite de soya y con el aceite de ricino, y mejores propiedades frías comparado con aceite de palma. Además, la viscosidad, ácidos grasos libres y densidad del aceite y el biodiesel son estables dentro del período de almacenaje, (Tapanes, 2008), condición del diesel de *Jatropha* que coincide con los resultados experimentales del uso de diesel de palma en Transmilenio (Ecopetrol, 2008).

Como característica esencial de la *Jatropha* a tener en cuenta en el diseño del sistema logístico, tenemos la estacionalidad del cultivo, la *Jatropha* da su cosecha cada cinco meses, con dos períodos de floración del cultivo (Heller, 1992). En el procesamiento de la semilla y el aceite encontramos que los procesos son similares a los de la palma, igualmente en el almacenamiento (Achten, 2008).

- Antecedentes de uso del biodiesel de *Jatropha*

El diesel de *Jatropha curcas* es usado como combustible en motores diesel directamente y mezclándolo con el metanol (Gubitz et al., 1999). Se encuentran pruebas de compañías automotrices interesadas en este tipo de biocombustible: “En Agosto del año 2007, **Daimler Chrysler India** invitó a renombrados periodistas especializados en automoción al ‘[Jatropha Road Trials: Leh tour](#)’. Dos **Mercedes-Benz Clase C** propulsados con biodiesel *Jatropha* y un **Viano**, atravesaron los pasos de montaña más elevados del mundo, el KhardungLa (5.602 metros) y el Rohtang (3.968 metros), en el Himalaya ([Jatropha Road Trials: Leh tour](#)’, 2007).

Los vehículos convencieron a pesar de su bajo nivel de oxígeno, las cuestas extremas y el mal estado de la carretera: ‘Los vehículos ofrecieron un rendimiento excepcional también en este terreno, en parte gracias a las excelentes cualidades del biodiesel’ (Kukmar Bijoy, ‘Business Standard Motoring’).

Daimler Chrysler apoya desde 2002 el proyecto biodiesel *Jatropha* en India. El combustible regenerativo no sólo reduce la dependencia del gasóleo fósil sino también la erosión de suelos en peligro de convertirse en estepas. Además, el proyecto crea nuevos puestos de trabajo para la población rural.”

Los días 20 y 21 de septiembre de 2007 se celebró la “I Conferencia Monográfica sobre *Jatropha curcas*” en Barcelona, conferencia organizada por empresas industriales del sector de biocarburantes, donde se hizo la presentación de un vehículo movido a base de combustible de *Jatropha*, se coloca un aparte de la publicación realizada sobre dicha prueba:

“Presentación del primer coche movido por biocarburante de *Jatropha*”
En la Conferencia de Barcelona se presentó el primer vehículo propulsado con biocarburante a partir de aceite de *Jatropha curcas* en Europa. Se trata de un Peugeot 406 berlina, que llegó a Barcelona desde Inglaterra, por el eurotúnel, conducido por James Scruby, director de la empresa inglesa VIRIDESCO LIMITED, que presentó una ponencia en esta Conferencia sobre los avances de su compañía en la extracción de aceite de *Jatropha* en Mozambique y su utilización como carburante. En Reino Unido hay ya más de 2000 vehículos pesados que lo emplean, según declaró en rueda de prensa James Scruby. "Con este método se reduce la energía, la inversión, el precio de producción y este proceso es más respetuoso con el medio ambiente que los procesos de producción de biocombustibles".

En la misma rueda de prensa, Klaus Becker -prestigioso experto, catedrático en la Universidad de Hohenheim (Alemania) de la que es Jefe del Centro de Agricultura para los Trópicos y Subtrópicos, desde hace años se dedica a probar la potencialidad y rentabilidad del cultivo de la *Jatropha curcas* en distintos países, como Egipto, India, Colombia, o Madagascar- explicó que la *Jatropha curcas* “es una gran alternativa al petróleo, rentable y que no compite con la cadena alimentaria (Tomado de 150 asistentes en la I conferencia “*Jatropha curcas*”).

Con estas evidencias se puede confirmar la viabilidad de la *Jatropha* como materia prima para el biodiesel, logrando el movimiento de vehículos en el lugar de mayor altitud en el mundo, lugares que superan ampliamente la altitud de Bogotá.

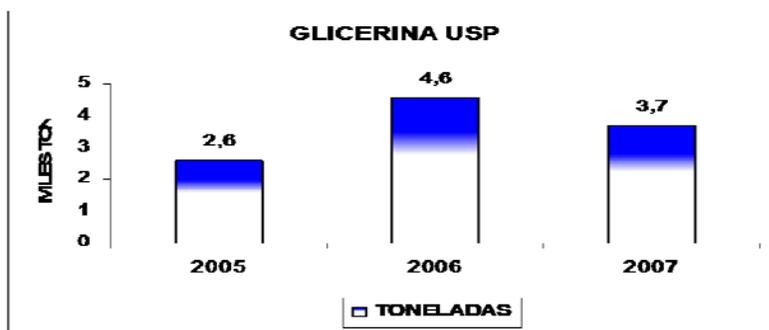
- Subproductos derivados de la producción de biodiesel de *Jatropha curcas*

Con base en el estudio de Sotolongo en el 2007, se encuentra que del proceso de extracción de la semilla de *Jatropha* se obtienen dos productos, el primero es el aceite vegetal que puede ser usado como se vio anteriormente para la producción de biodiesel y el segundo es, la torta de *Jatropha* la cual por su alto contenido de nitrógeno es muy útil como biofertilizante y algunas

investigaciones han demostrado que este material es un buen sustrato para la producción de biogás (Sotolongo, 2007).

Se tiene también, que en el proceso de refinación del aceite se obtiene un 7.9% de glicerol, el cual se puede utilizar con fines farmacéuticos o como materia prima industrial o como combustible en la producción de biogás (Sotolongo, 2007). Colombia ha venido importando Glicerina como lo demuestra la figura 9, por lo cual este residuo de la producción de biodiesel sería bien empleado en el país (Ecopetrol, 2008).

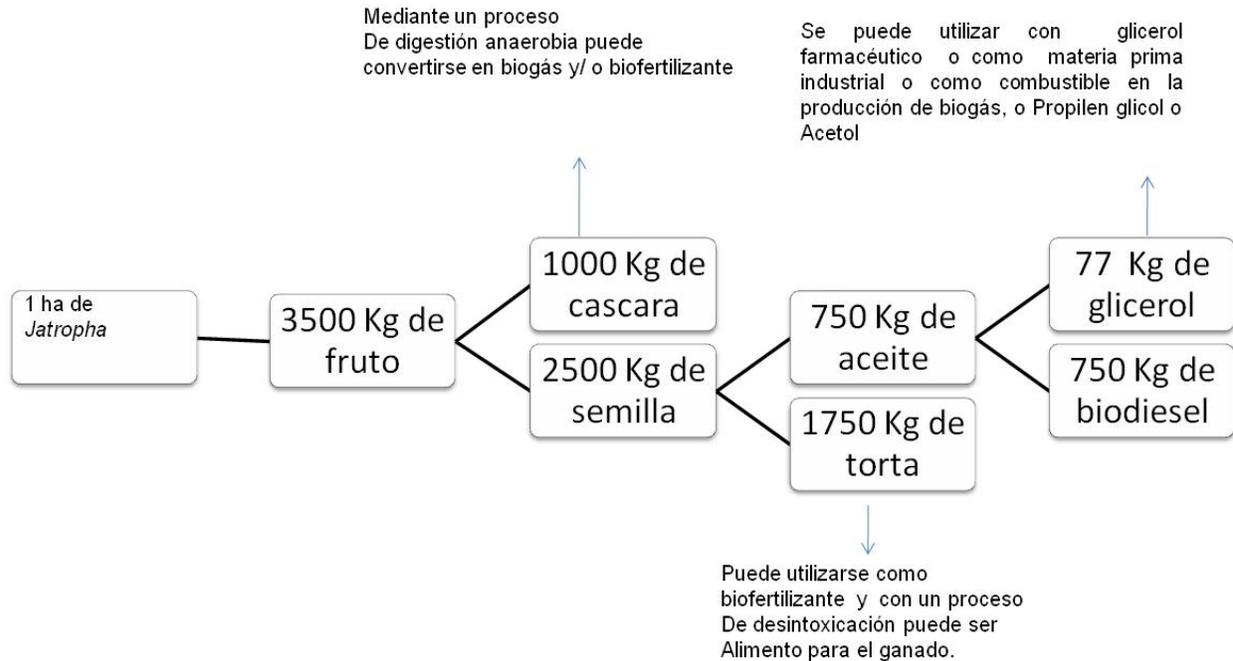
Figura 9. Importaciones glicerina en toneladas años 2005-2007



Fuente: Ecopetrol, estudio preliminar de mercados de glicerina y subproductos, marzo de 2008 y DIAN, (SIEEX) Sistema de Información de Comercio Exterior.

Se representa en la figura 10 una representación de los subproductos de la *Jatropha* y sus usos potenciales, con el fin de evidenciar que la totalidad de residuos dentro del proceso de producción de biodiesel tienen utilidad en el mercado.

Figura 10 Subproductos de la *Jatropha* y sus usos potenciales



Fuente: Elaboración propia del Investigador con base en estudio de Sotolongo en el 2007

1.1.6 Consideraciones logísticas:

El Sistema Cliente Transmilenio S.A, requiere de unas operaciones previas para que sea viable el abastecimiento de la demanda con biodiesel de *Jatropha* curcas de manera efectiva. Inicialmente, la localización de los municipios que cumplan las condiciones requeridas para el cultivo, posteriormente la localización de la(s) planta(s) extractoras(s), plantas de refinación, el diseño de rutas, flujos de materiales y la entrega de los mayoristas a las empresas operadoras del Sistema de Transporte Masivo de Bogotá, bajo unas condiciones de seguridad y eficiencias que hagan viable la aplicación del diseño de un sistema logístico como el que se propone en este trabajo, para lo cual encontramos dentro de la logística las siguientes cualidades que facilitan el diseño del sistema esperado:

- Las herramientas existentes, tales como macro localización y análisis de sistemas logísticos permiten el diseño de un sistema logístico como el esperado (Ghiani, 2004).
- La existencia de la demanda de biodiesel en el Sistema de Transporte Masivo de Bogotá, por efectos del marco legal ambiental en Colombia.

- La posibilidad de desarrollar un sistema logístico eficiente para un proyecto pionero en la producción de biodiesel elaborado a partir de la *Jatropha curcas*, abriendo un camino para los beneficiarios identificados en este proyecto.
- Se ha encontrado en la literatura existente, la solución de problemas de selección multicriterio a través de la utilización de diversas herramientas tales como el proceso jerárquico analítico, la cual aplica elementos cualitativos y cuantitativos realizando la jerarquización de las metas a alcanzar en un problema (García, 2006) (Mogollón, 2000), la utilización del método Delphi que valida la solución de problemas a través del juicio de expertos con un procedimiento específico (Veléz, 2003) (Landeta, 1999) y la aplicación de modelos matemáticos de diseño de cadena de suministro (Stepanov, 2008) (Moritz, 2001) e incluso la combinación del proceso jerárquico analítico con modelos multimeta (Oboulhas, 2004), más no se ha encontrado la combinación de estas tres herramientas en un modelo de selección multicriterio para el diseño de un sistema logístico, siendo este un objetivo a desarrollar de la presente investigación.

1.1.7 Consideraciones de tipo ambiental

De acuerdo con Sotolongo en su publicación del 2007, se encuentra que, cada árbol de *Jatropha curcas* puede contribuir a fijar cerca de 6 Kg de dióxido de carbono (CO₂) y 9 Kg de Oxígeno (O₂), además de contribuir a la reforestación de zonas semiáridas y secas, ayudar a incrementar la biodiversidad, evitar la erosión, restablecer el ciclo hídrico y formar suelos, de acuerdo con un experimento realizado en la franja costera sur de Guantánamo, zona identificada como semiárida en Cuba, para demostrar las potencialidades de la *Jatropha curcas* como un cultivo con potencialidades energéticas, al generar biodiesel, jabón o insecticidas a partir del aceite y de sus biomásas residuales (cascara, torta) se pueden producir biofertilizantes y biogás e incluso biocombustible aunque con un valor calórico menor al del aceite, cualidades medidas en términos de la potencia calorífica mediante métodos experimentales o analíticos. En el experimento de Sotolongo en el 2007, en el caso del biodiesel obtenido a partir del aceite registró unas medidas de 8955,8 en el valor calórico inferior del combustible (VCI) en Kcal/Kg y 9335,0 Valor Calórico Superior (VCS) en Kcal/Kg. Se presenta un claro antecedente sobre los beneficios de tipo

ambiental que podría traer la inclusión de este tipo de cultivo en términos energéticos en cuanto a la producción de biodiesel en Colombia.

1.2 Definición del Problema

Se identifica que, el Sistema de Transporte Masivo de Bogotá requiere cumplir con la ley 939 de 2004 para el abastecimiento de biodiesel, requerimiento que genera, la potencialidad de minimizar impactos de tipo ambiental, de sustentabilidad ambiental, social y logísticos en la región, utilizando una materia prima alternativa a la predominante en Colombia, para la producción de biodiesel que no genere crisis alimentaria, como lo es la *Jatropha curcas*.

1.3 Hipótesis

La estructuración de un modelo de toma de decisiones para el diseño de un sistema logístico facilita el uso de un biocombustible derivado de un producto de la naturaleza no comestible, en el sistema de transporte masivo de Bogotá, minimizando el riesgo de una crisis alimentaria, maximizando los beneficios sociales, ambientales y logísticos.

1.4 Objetivo General

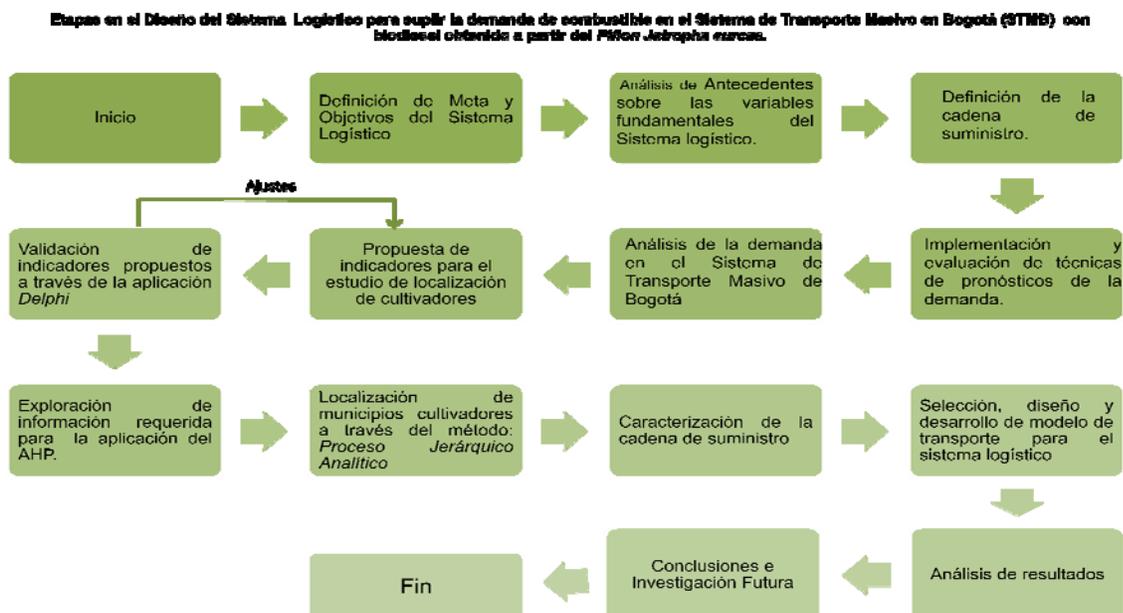
Diseñar un sistema logístico para suplir la demanda de biodiesel obtenido a partir de piñon *Jatropha curcas* en el Sistema de Transporte Masivo en Bogotá.

1.5 Objetivos Específicos

Se presentan a continuación los objetivos específicos del Diseño del Sistema Logístico y en la figura 11 un esquema que muestra el desarrollo de las diferentes etapas de la investigación:

1. Establecer los factores para el análisis de la demanda e implementar pronósticos de la misma, como información de entrada para el desarrollo del modelo matemático.
2. Desarrollar un método de toma de decisiones a través de la combinación de las técnicas Delphi y AHP, como base para la generación y ponderación de criterios de localización de cultivos de *Jatropha*.
3. Diseñar y Caracterizar la cadena de Suministro.
4. Seleccionar, diseñar y desarrollar del modelo de transporte para el Sistema Logístico.

Figura 11: Etapas en el Diseño del Sistema Logístico



1.6 Impactos Esperados

En este diseño, se han identificado diversos tipos de impactos, dentro de los cuales están los relacionados con las condiciones ambientales del cultivo, los de tipo social, los asociados a la sustentabilidad ambiental del cultivo, y los que determinan la eficiencia del diseño del sistema, los logísticos, por lo tanto se clasificarán los impactos con sus beneficiarios asociados, dentro del diseño del sistema logístico, de acuerdo con los criterios tomados para desarrollar el estudio de la macro localización de los posibles lugares aptos como sistemas de producción de la materia prima base a estudiar:

- Impactos Sociales

Comunidad de municipios seleccionados: La posible generación de empleo es un claro beneficio social, teniendo en cuenta el tipo de actividad económica del municipio y la necesidad de empleo del mismo, haciendo énfasis en que tendrán en mayor puntuación como sitios probables para la localización de sistemas productivos de biodiesel, los municipios con una necesidad más alta de empleo y que tengan posibilidades de incorporarse o estén incorporados a proyectos institucionales que brinden incentivos por la generación de cultivos para la producción de biodiesel, de acuerdo con las clasificaciones que ha realizado el Estado.

- Impactos asociados a la sustentabilidad ambiental:

Comunidad de Municipios seleccionados: El proyecto evaluará como criterios claves para el diseño del sistema logístico el nivel de tierras desertificadas de los municipios, dada la cualidad de recuperar suelos que presenta la *Jatropha curcas* y dentro del marco de la Política ambiental “Bases para el desarrollo Sostenible 2002-2006” del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, aspecto que contribuye al desarrollo económico de las regiones potenciales como sistemas productivos para el diseño del sistema logístico al poder utilizar áreas que están catalogadas como infértiles para cualquier tipo de cultivo tradicional. Se contribuiría también en los municipios elegidos, a la mitigación del cambio climático por la fijación de CO₂ y O₂ (disminución de gases contaminantes) ya que en una hectárea con un promedio de 400 árboles

(base para la *Jatropha curcas*), se fijarían 2400 Kg de CO₂ y 3600 de O₂, impacto que variará de acuerdo con la disponibilidad de terreno disponible en los diversos municipios (Sotolongo, 2007).

Adicionalmente, respecto a los beneficios citados, es un impacto ambiental positivo la optimización de la biomasa derivada del cultivo de *Jatropha curcas* ya que se puede extraer aceite no solo de la semilla sino también de la cáscara y la torta de *Jatropha* obtenida durante el procesamiento del fruto de la planta (Sotolongo, 2007).

Tenemos también, como cliente principal de este diseño a la comunidad en general al poder usar un sistema de transporte que usa un combustible limpio evitando el efecto colateral del uso de una materia prima base la elaboración de alimentos teniendo que ser usada para producir biodiesel.

- Impactos Logísticos:

Comunidad Bogotana: La cual a diario se ve expuesta a los gases de los combustibles tradicionales, uno de los principales agentes de contaminación en el mundo, como posible beneficiaria de un diesel ambientalmente amigable, propendiendo a la prevención de la contaminación en Bogotá, a través del uso del sistema de transporte masivo que tiene la ciudad, se está cuidando el medio ambiente y promoviendo el desarrollo rural de las zonas seleccionadas como sistemas productivos.

Transportadores del Sistema de Transporte masivo de Bogotá y la entidad del Distrito: Al tener el diseño de un sistema logístico que les permita cumplir con eficiencia la legislación colombiana y con la responsabilidad ambiental que tienen todas las empresas en el país, de promover un medio ambiente amigable.

2. ESTABLECIMIENTO DE FACTORES PARA EL ANÁLISIS DE LA DEMANDA Y DESARROLLO DE PRONOSTICOS

En este capítulo se han identificado los factores claves para el establecimiento de la demanda potencial para el biodiesel de *Jatropha curcas* a través del análisis de rendimientos del diesel tradicional, en aproximadamente el 17% de la flota que opera en el sistema de transporte masivo de Bogotá. Logrando la identificación de estos factores, se procede a presentar un análisis de la

demanda, para la posterior implementación y evaluación de técnicas de pronósticos, que nos permitan estimar el biodiesel que se requiere para el sistema cliente del presente trabajo.

2.1 Comportamiento de la demanda

2.1.1. Cálculo del rendimiento del Diesel tradicional

Para el desarrollo de este aspecto, se parte del cálculo de los kilómetros recorridos por la totalidad de empresas operadoras de buses articulados que conforman el Sistema de Transporte masivo de Bogotá para los años 2006, 2007 y 2008, en las diez zonas que operan en Bogotá: Autopista Norte, troncal Caracas, Av. Ciudad de Quito Central, Av. Ciudad de Quito Sur, Tunal, Usme, eje ambiental, troncal Américas, calle 80 y Suba, para fase I y fase II del sistema de transporte masivo, zonas que en total cubren 81 servicios (rutas) distribuidos en servicios que operan entre semana y los domingos y festivos, desde las 4:30 a.m. hasta las 24 horas. Aclarando, que en el 2006 no estaban las siete empresas operadoras, sino únicamente cuatro empresas pertenecientes a la Fase I del Sistema masivo; en mayo de 2006 se incorporaron las cuatro empresas restantes que corresponden a la implementación de la fase II del sistema de transporte masivo de Bogotá.

Adicionalmente, es necesario determinar el consumo de combustible por bus, para de esta manera, poder determinar la demanda de combustible para todo el sistema de transporte masivo y obtener así el consumo de combustible para la flota vinculada al sistema. Se ha evaluado el consumo de diesel de una flota de 168 buses articulados modelo UPA 400 de Daimler Chrysler. Estos móviles mantienen unos requerimientos similares en cuanto al mantenimiento mecánico y en el desempeño ambiental con respecto a la totalidad de la flota vinculada al Sistema de transporte masivo de Bogotá, por estar estos requisitos establecidos en los contratos de concesión con la entidad del Distrito Empresa de transporte del Tercer Milenio Transmilenio S.A.

El consumo de combustible tradicional mensual por bus, se ha obtenido a través de la recolección de los kilómetros recorridos por cada vehículo diariamente, de acuerdo con el registro de los odómetros de los buses que han servido como referente para este estudio, adicionalmente, el consumo de combustible para cada uno de los vehículos se ha logrado a través

del registro que realiza el sistema GRP 1000, dispositivo de medición de la estación de combustible del patio de operaciones en los cuales se atiende la flota, mecanismo que nos permite reconocer el consumo de cada uno de los móviles. Cruzando los kilómetros recorridos de cada bus versus el consumo por bus, se ha logrado el valor del rendimiento, expresado en kilómetros recorridos por cada galón de diesel tradicional empleado.

El odómetro es un componente incluido dentro de las rutinas de mantenimiento preventivo de la flota, ejecutadas directamente por el fabricante (para el caso de la flota estudiada), con una periodicidad de 10.000 Km. actividades que nos aseguran la fiabilidad de la información utilizada para la obtención de los rendimientos.

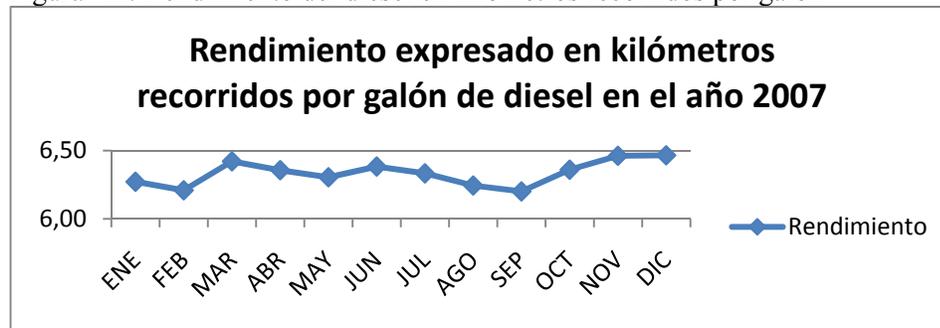
A continuación, se presentan los kilómetros recorridos en el sistema para fase I y fase II en la tabla 1: Kilómetros recorridos Fase I y Fase II del Sistema de transporte Masivo de Bogotá, la cual contiene los valores de los kilómetros recorridos para el total de flota de buses articulados para los años 2006, 2007 y 2008, bajo las consideraciones ya expuestas. En la figura 12 se presenta la tendencia del consumo de combustible (tendencia obtenida únicamente de la flota vinculada con SI99 S.A), expresado en kilómetros recorridos por galón consumido, con un promedio de 6,33 en el año 2007.

Tabla No. 1. KILOMETROS RECORRIDOS FASE I Y FASE II SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO BOGOTA

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
5029266,735	5016748,283	4952436,247	4811133,084	7672879,962	5756552,476	6539839	5473027,34	5599262,8	6806320,93	5373424,7	5231537,7
5749540,713	5751547,713	5831606,02	6824175,091	5873118,748	5376435,239	5517492	5691266,63	6102127,42	6057940,25	7668033,3	6600538,88
6319481,768	6579839,031	5824513,593	6656065,44	7674290,787	6079605,309	7425358	6411038,49	6917306,08	8482911,1	6716176,6	6495208,2

Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el investigador.

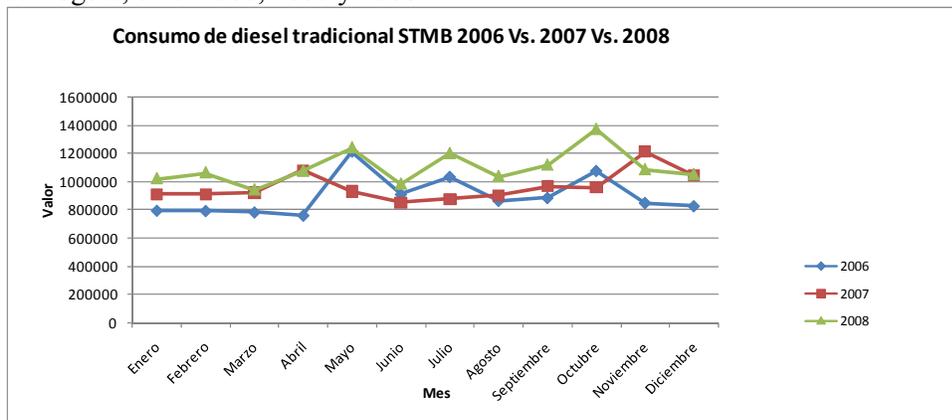
Figura 12: Rendimiento del diesel en kilómetros recorridos por galón



Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el investigador.

Por tanto, con los kilómetros recorridos mostrados en la tabla 1 y de acuerdo con el rendimiento base a lo largo del 2007 para la flota objeto de este análisis (Figura 12), se calcula el consumo en galones de diesel para la totalidad de buses articulados del Sistema de transporte masivo de Bogotá, en la Figura 13:

Figura 13 Consumo de diesel tradicional en el sistema de transporte masivo de Bogotá, en el 2006, 2007 y 2008.



Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el investigador.

De acuerdo con el rendimiento estudiado y de acuerdo con los datos de la figura 13, se concluye que el comportamiento de la demanda obedece a un comportamiento estacional, ocurriendo una disminución del consumo para la época de semana santa (marzo o abril), en junio, y de octubre a enero, períodos característicos de vacaciones en Bogotá, en octubre inician los descansos de los estudiantes de colegios y Universidades y a partir de diciembre, se suman también los trabajadores de las empresas, igualmente encontramos que para febrero, mayo y julio hay aumentos en la demanda, cuando se está reincorporando el número de usuarios que maneja el sistema a sus ocupaciones típicas, datos que nos permiten conocer el comportamiento de la demanda para las estimaciones de los pronósticos que se mostrarán posteriormente. Se encuentra igualmente, que para el 2007 el consumo de combustible fue más alto con respecto al 2006, esto porque aumentaron los kilómetros recorridos, lo cual responde a la agregación de la fase II del Sistema desde el mes de mayo de 2006, implementación que aumentó el número de pasajeros movilizadas del sistema al activarse las troncales Suba y Norte Quito Sur.

En términos generales, se observa en la figura 13 que el comportamiento de los tres años objeto de análisis, muestra una demanda con tendencia a aumentar en el tiempo, conserva los periodos

de estacionalidad constantes, por lo cual esta técnica brinda una base para pronosticar la demanda y sobre esto, proyectar el abastecimiento de biodiesel de *Jatropha* para el sistema de transporte masivo de Bogotá.

2.1.2 .Distribución de la demanda para cada Cliente

Adicionalmente, de acuerdo con la participación que tiene cada una de las empresas Operadoras dentro del total de kilómetros recorridos por el Sistema de Transporte masivo de Bogotá, análisis efectuado con los kilómetros totales recorridos de 2005 a 2008, y conociendo con exactitud la distribución de cada empresa sobre este total, se procede a calcular la demanda para cada uno de los operadores porcentualmente, como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2: Distribución de kilómetros por cliente

Nombre cliente	Porcentaje de participación del total de la demanda en Km*
Ciudad Móvil	0,120404475
Exprés del Futuro	0,160818133
Metrobus	0,117934573
Sistema Integrado de Tte SI99	0,187709216
Transmasivo	0,160894522
Connexión Movil	0,125492713
SI02	0,126746369

Fuente: Datos procesados por el Investigador, obtenidos de los promedios mensuales de kilómetros recorridos de los años 2005 a 2008 de cada empresa operadora.

Con esta información se podrán estimar los pronósticos de biodiesel por cliente mensualmente, terminando así el análisis de la demanda.

2.2 Pronósticos

Dentro de la planeación del diseño del sistema logístico, es necesario el cálculo de la demanda esperada en galones de combustible, para el cliente definido: El sistema de Transporte Masivo de Bogotá.

De acuerdo con los resultados presentados respecto a los consumos de combustibles de los años 2006, 2007 y 2008, se desarrollan cinco metodologías cuantitativas de pronósticos, con el objeto de evaluarlas y revisar la más conveniente teniendo en cuenta las fluctuaciones del sector de negocio. Para cada una de las técnicas empleadas se utilizó el mismo número de períodos base para pronosticar (12), utilizando también las mismas medidas para validar las desviaciones en la predicción: Error de predicción, error de predicción al cuadrado, suma parcial del error de predicción, error medio de porcentaje absoluto, error medio al cuadrado, valor absoluto del error de predicción, desviación media absoluta y señal de rastreo (Noori, 1997), se describen los aspectos de mayor relevancia en el desarrollo de las técnicas de pronósticos, a continuación:

2.2.1 Desarrollo de línea de tendencia

Mediante la aplicación matemática de mínimos cuadrados se ha buscado la tendencia de la demanda de los años 2006 y 2007. Una tendencia es el movimiento gradual hacia arriba o hacia debajo de los datos en el tiempo (Noori, 1997), donde un período t se selecciona como el tiempo base, para el cálculo de la demanda de los períodos consecutivos, iniciando por el período t seleccionado, a través de la ecuación de la línea de tendencia (ver ecuación 1).

$$\text{Línea de tendencia lineal} = F_t = a + bt \quad (\text{Ecuación 1})$$

t = Número de períodos siguientes al período base

F_t = Demanda estimada para el período t

a = Demanda para el período base

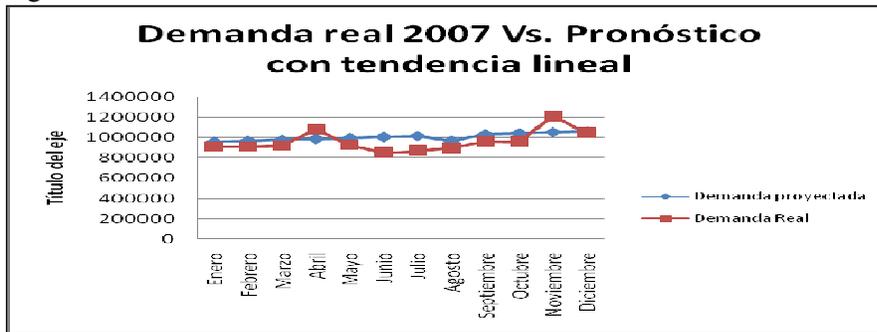
b = Pendiente de la línea de tendencia

Tabla 3. Desarrollo pronóstico aplicando tendencia lineal

Periodo	Demanda Pronosticada 2007	Ajuste:(real Vs Obtenido)	Error de Predicción	Error de Predicción al cuadrado	Suma parcial del error de predicción	Media de error de predicción	Error medio de % absoluto	Error medio al cuadrado	Valor absoluto error de predicción	Desviación media absoluta	Señal de rastreo
F13=	958036,0866	0,948085655	-49735,81598	2473651391	-49735,81598	-42098,7893	8,847347362	9023848861	49735,81598	49735,81598	-1
F14=	967170,4329	0,939459377	-58553,10067	3428465598	-108288,9166				58553,10067	54144,45832	-2
F15=	976304,7792	0,943624157	-55040,00511	3029402162	-163328,9218				55040,00511	54442,97392	-3
F16=	985439,1255	1,093998307	92629,60921	8580244502	-70699,31254				92629,60921	63989,63274	-1,104855732
F17=	994573,4718	0,932885195	-66750,60489	4455643253	-137449,9174				66750,60489	64541,82717	-2,129625445
F18=	1003707,818	0,846220227	-154349,9604	23823910273	-291799,8778				154349,9604	79509,84937	-3,669984035
F19=	1012842,164	0,860589847	-141200,4813	19937575915	-433000,3591				141200,4813	88322,79679	-4,902475633
F20=	967170,4329	0,929613048	-68076,17866	4634366101	-501076,5378				68076,17866	85791,96952	-5,84059954
F21=	1031110,857	0,93491516	-67109,68468	4503709778	-568186,2224				67109,68468	83716,1601	-6,787055472
F22=	1040245,203	0,919995184	-83224,6263	6926338422	-651410,8487				83224,6263	83667,00672	-7,785755393
F23=	1049379,55	1,154377044	162000,1131	26244036653	-489410,7356				162000,1131	90788,19821	-5,390686733
F24=	1058513,896	0,98509728	-15774,73574	248842287,7	-505185,4714				15774,73574	84537,07634	-5,975904222

Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y modificados por el Investigador

Figura 14. Demanda real 2007 Vs. Pronóstico con tendencia lineal



Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y modificados por el Investigador

En esta técnica de pronóstico se ha encontrado, que no toma la estacionalidad de la demanda adecuadamente al no evidenciar los picos y valles de la demanda real, arrojando un error medio absoluto del 8,84% con una desviación media absoluta de -42098,7892 para los doce periodos, es decir la tendencia que mantiene es a pronosticar por debajo de los valores reales de la demanda. En este tipo de negocio es menos conveniente pronosticar hacia abajo, dado que se puede asumir inventario, más no déficit para el combustible, este insumo es fundamental para asegurar la Operación de la flota.

Igualmente, se ha calculado la señal de rastreo, como índice de evaluación para la pertinencia del modelo de pronóstico, la cual indica si la predicción concuerda con los cambios hacia arriba o hacia abajo en la demanda no aleatoria (Noori Hamid, 1997), ver ecuaciones 2, 3 y 4, para comprender el modo de cálculo de la señal de rastreo.

(Ecuación 2)

$$SR = SPEP/DMA$$

SR= Señal de Rastreo (Ecuación 3)

Donde:

SPEP= Suma parcial del error de predicción = $\sum_{t=1}^n E_t$ (Ecuación 4)

DMA= Desviación media absoluta = $\sum_{t=1}^n |E_t|$ (Ecuación 5)

Donde: $t=1$

n = Número de períodos

E_t = Error de predicción para el período t

Figura 15 Señal de rastreo con tendencia lineal



Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y modificados por el Investigador.

Lo cual nos indica que la demanda crece linealmente sin contemplar el verdadero comportamiento de la estacionalidad de la demanda. Por lo cual esta técnica de pronóstico no

evidencia mayor precisión, sin embargo, veremos al final de este capítulo, la comparación de las técnicas utilizadas, teniendo como criterio la menor desviación y mayor adecuación a la estacionalidad de la demanda real, para seleccionar la de mayor conveniencia para el sistema.

2.2.2 Promedio móvil simple con ocho períodos

Se utiliza para calcular la demanda promedio de los últimos n períodos y como predicción para el siguiente período (ver ecuación 5). Debido a que están combinados los datos a través de un promedio, los incrementos y las bajas individuales, se compensan entre sí y se amortigua el efecto de la variación aleatoria de los datos. (Noori Hamid, 1997).

$$F_{t+1} = (A_t + A_{t-1} + A_{t-2} + \dots + A_{t-n+1}) / n \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

F_{t+1} = Predicción para el período t+1

A_t = Demanda real para el período t

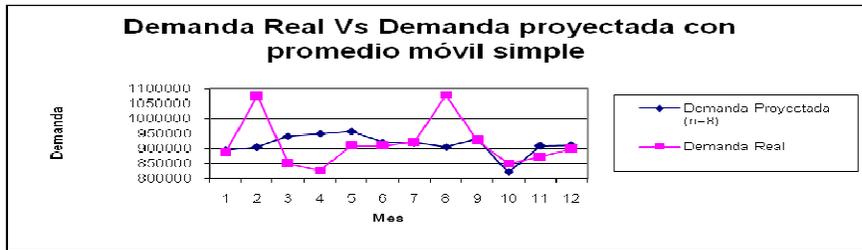
n = Número de períodos por promediar

Tabla 4 Aplicación promedio móvil simple con 8 períodos

Período Proyectado	Demanda Proyectada (n=8)	Demanda Real	Ajuste	Et	Error de Predicción al cuadrado	Suma parcial del error de predicción	Medio de error de predicción	Error medio de % absoluto	Error medio al cuadrado	Valor absoluto error de predicción	Desviación media absoluta	Señal de rastreo
Fsept06=	89359,5833	88459,684	0,989883725	-9039,89953	81719783,52	-9039,89953	3394,295274	6,213860602	7266328147	9039,89953	9039,89953	-1
Foct06=	904855,4297	1075248,17	1,188309355	170392,743	29033686738	161352,8431				170392,7426	89716,32108	1,798478149
Fnov06=	940194,542	848882,255	0,902679369	-91312,2873	8337933819	70040,55575				91312,28734	90248,30983	0,776087174
Fdic06=	948507,8995	826467,251	0,871334072	-122040,649	14893919961	-52000,09305				122040,6488	98196,39457	-0,529551958
Fener07	956809,7284	908300,271	0,949300831	-48509,4578	2353167492	-100509,5508				48509,45776	88259,00721	-1,138802191
Ffeb07	918829,0955	908617,332	0,988886112	-10211,7633	104280109	-110721,3141				10211,76326	75251,13322	-1,471357431
Fmar07	918730,2653	921264,774	1,002758708	2534,50883	6423735,021	-108186,8052				2534,508832	64863,04402	-1,667926735
Fabr07	904744,6264	1078068,73	1,19157241	173324,108	30041246516	65137,30306				173324,1083	78420,67706	0,830613883
Fmayo07	931426,0591	927822,867	0,996131532	-3603,19221	12982994,12	61534,11084				3603,192213	70107,62318	0,877709271
Fjunio07	820856,0987	849357,858	1,034721992	28501,7591	812350269	90035,86989				28501,75905	65947,03677	1,365275444
Fjulio07	908597,6677	871641,683	0,959326349	-36955,9846	1365744796	53079,88532				36955,98458	63311,48657	0,838392655
Fagos07	911442,5963	899094,254	0,986451871	-12348,342	152481550,9	40731,54328				12348,34203	59064,55786	0,689610568

Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador.

Figura 16 Demanda real Vs. Demanda proyectada con promedio móvil simple



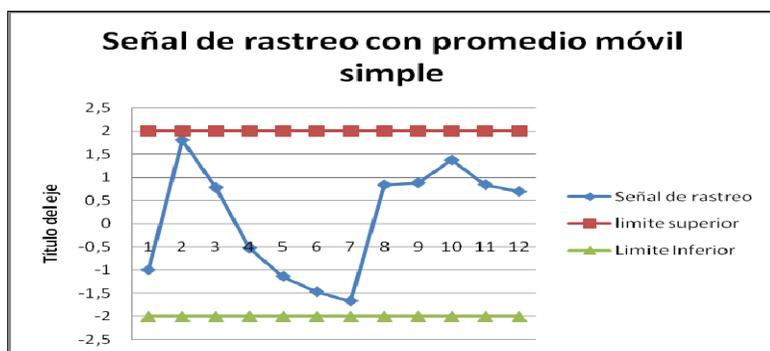
Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador

Este modelo de pronóstico está dentro del tipo de los de series de tiempo, presentando la cualidad de requerir la demanda del período inmediatamente anterior para obtener el siguiente, es decir conviene para pronosticar a corto plazo, lo cual no es tan adecuado para el diseño del sistema logístico en cuestión, pues se busca poder presentarle a los posibles beneficiarios, una proyección de por lo menos un año de las condiciones logísticas requeridas, teniendo en cuenta el tipo de demanda que presenta el combustible, que responde a ciertas estacionalidades por épocas que generan el aumento o disminución de usuarios y que muestra gran similitud en los mismos períodos de diferentes años, es apropiado utilizar un método que permita proyectar las demandas para más de un mes.

Aplicando esta técnica se obtiene un error de porcentaje absoluto del 6,21%, que es menor al obtenido con el método de tendencia lineal, con una desviación media absoluta de 59064,55, la cual es mayor al valor conseguido con el método de tendencia lineal.

Se observa que este método tiene la tendencia de pronosticar por encima de la realidad (Figura 16) aunque envía señales en los períodos en los que sube y baja la demanda adecuadamente (picos en febrero y agosto y valles en marzo, abril, junio, julio y de noviembre a diciembre, figura 17).

Figura 17 Señal de rastreo con promedio móvil simple



Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador.

2.2.3 Proyección de temporada

Las variaciones de temporada pueden corresponder a las estaciones del año, a los días festivos o a diferentes momentos del día o de la semana. En el capítulo uno del presente escrito, se pudo observar que la demanda de combustible del sistema de transporte masivo en Bogotá, presenta temporada baja en los días festivos y épocas de vacaciones y temporada alta en los meses de reincorporación a las actividades laborales y académicas, después de días de fiesta y vacaciones, por lo cual se ha aplicado también este método de pronóstico para la consecución de las demandas esperadas. Se mostrará su desarrollo a continuación:

Tabla 5: Aplicación técnica Proyección de temporada

Periodo	Demanda estimada		Demanda Proyectada ajustada a la temporada	Demanda Real	Error de predicción	Error de Predicción al cuadrado	Suma parcial del error de predicción	Media de error de predicción	Error medio de %	Error medio al cuadrado	Valor absoluto error de predicción	Desviación media absoluta	Señal de rastreo
	ajustada a la temporada	Indice de temporada											
1	2203809,125			2369423,58									
2	2924789,684			2881605,93									
3	2767319,184			2782326,84									
4	2916470,921			2750597,68									
5	2704695,206			2907950,84									
6	2898038,238			2855249,46									
7	2719986,148			2734737,11									
8	3404785,353			3211139,4									
9	2813380,007	0,930103483		3024803,22	211423,209	44699773509	211423,2095	211423,2095	3,76452201	23034028521	211423,209	211423,2095	1
10	3346605,918	1,014986004		3297194,15	-49411,7633	2441522351	162011,4462	81005,7231			49411,7633	130417,4864	1,2422525
11	3334640,643	0,994606077		3352724,98	18084,3411	327043392,1	180095,7873	60031,92909			18084,3411	92973,10461	1,937074
12	3716023,681	1,060304437		3504676,16	-211347,521	44667774830	-31251,7342	-7812,933547			211347,521	122566,7088	-0,2549773
13		0,930103483	3240372,932										
14		1,014986004	3615915,728										
15		0,994606077	3621530,842										
16		1,060304437	3944135,715										

Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador.

En esta metodología, se agrupa la demanda trimestralmente, tomando tres años: 2006, 2007 y 2008, el valor pronosticado inicia desde el decimotercer periodo. Para obtener el valor proyectado

es necesario aplicar el índice de temporada (Ver ecuación 7), índice que da la estacionalidad al valor pronosticado de acuerdo con el comportamiento que se observa en los datos históricos.

$$SI = \sum (D_{qj}/D_j)/m \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

SI = Factor Promedio de temporada para el trimestre q

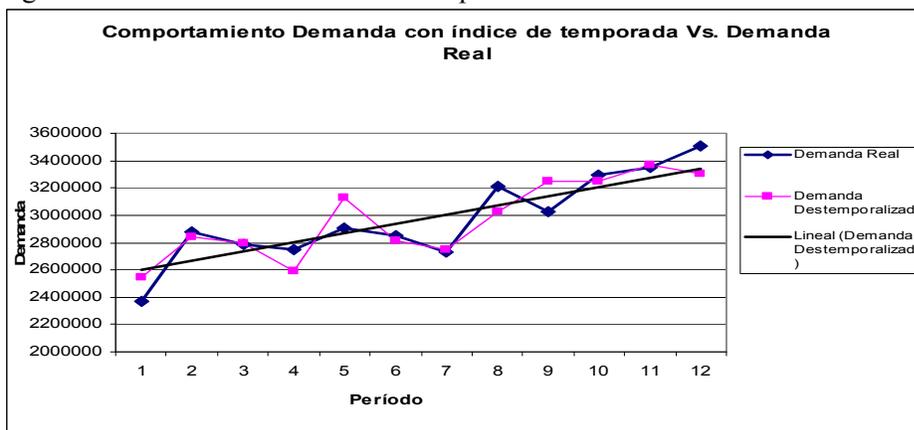
D_{qj} = Demanda real para el trimestre q en el año j

D_j = Promedio de demanda trimestral en el año j

m = número de años

Al igual que en las técnicas anteriores, se han utilizado las medidas de cálculo de error de predicción, se analizó la desviación con cuatro trimestres pronosticados frente a la demanda real del año 2008. Esta es una técnica agregada que necesita de por lo menos dos años para poder realizarse, condición cumplida en este trabajo, no sirve para productos nuevos y/o de rara rotación. Para el caso del producto en estudio, en el que su demanda se afecta por las variaciones propias de cada mes, es una técnica adecuada, en la que se ha encontrado un alto nivel de similitud respecto a la realidad, con una error medio de porcentaje absoluto de 3,76%. (Ver Figura 18).

Figura 18: Demanda con índice de temporada trimestral



Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador. Se comparan los años 2006,2007 y 2008.

Se encuentra en esta técnica el menor error medio de porcentaje absoluto evaluado hasta ahora con respecto a las otras dos aplicaciones anteriores y por tanto una mayor similitud entre la

tendencia del pronóstico y la demanda real, al coincidir con precisión en las alzas y bajas de la demanda en el tiempo, ventaja que incorpora el concepto índice de temporada, que permite mayor precisión para pronosticar cambios en el comportamiento del bien pronosticado.

2.2.4 Promedio Móvil Ponderado

El promedio móvil ponderado asigna el mismo peso a todos los períodos de demanda incluidos en el cálculo (Noori Hamid, 1997), un promedio móvil ponderado permite al usuario asignar un peso a cada observación (Ver ecuación 8).

$$F_{t+1} = W_t A_t + W_{t-1} A_{t-1} + W_{t-2} A_{t-2} + \dots + W_{t-n+1} A_{t-n+1} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

F_{t+1} = Predicción para el período $t+1$

W_t = Peso asignado al período t , (sumatoria de $W_{t=1}$)

A_t = Demanda real para el período t

n = número de períodos por promediar

Tabla 6: Aplicación promedio móvil ponderado

Período Proyectado	Demanda Proyectada	Demanda Real	Error de Et	Error de Predicción al cuadrado	Suma parcial del error de predicción	Media de error de predicción	Error medio de % absoluto	Error medio al cuadrado	Valor absoluto error de predicción	Desviación media absoluta	Señal de rastreo
Fjunio06=	995025,5489	909407,974	-85617,575	7330369110	-85617,5748	17860,10134	8,7247432	9296131480	85617,5748	85617,57477	-1
Fjulio06=	930629,3826	1033149,88	102520,5	10510453379	16902,9275				102520,502	94069,0385	0,1796864
Fagosto06=	973913,872	864617,273	-109296,6	11945746565	-92393,6716				109296,599	99144,89202	-0,931906
Fsept06=	927099,2062	884559,684	-42539,522	1809610974	-134933,194				42539,5225	84993,54964	-1,58757
Foct06=	930673,6157	1075248,17	144574,56	20901802414	9641,36251				144574,557	96909,75103	0,0994881
FNovt06=	731879,872	848882,255	117002,38	13689557537	126643,745				117002,383	100258,523	1,2631719
FDic06=	917723,4459	826467,251	-91256,195	8327693169	35387,5499				91256,1952	98972,47614	0,3575494
FEnero07=	865452,5892	908300,271	42847,681	1835923804	78235,2313				42847,6814	91956,8768	0,8507817
FFebrero07=	900312,5965	908617,332	8304,7357	68968635,17	86539,967				8304,73571	82662,19446	1,0469111
FMarzo07=	911028,488	921264,774	10236,286	104781552,8	96776,2531				10236,2861	75419,60362	1,2831711
Fabril07=	900720,8311	1078068,73	177347,9	31452278919	274124,157				177347,904	84685,81271	3,2369549
Fmayo07=	987625,8075	927822,867	-59802,941	3576391706	214321,216				59802,9406	82612,24004	2,5943034

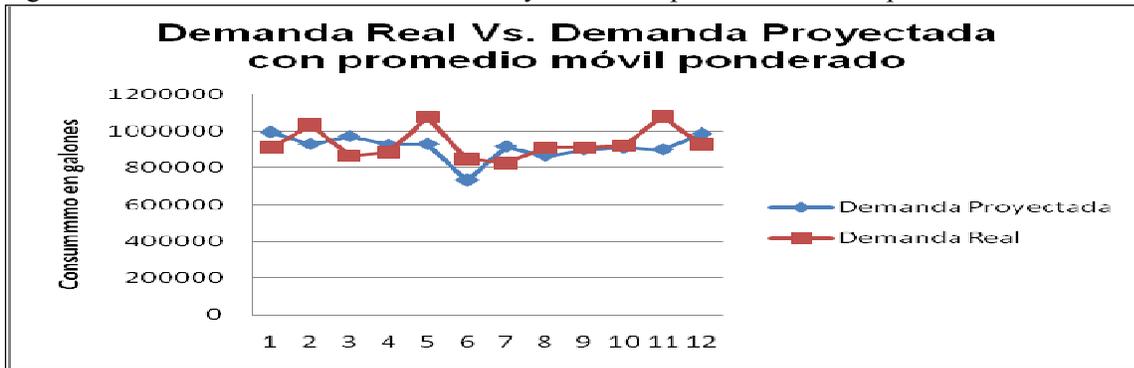
Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador.

Para el caso en estudio, n fue igual a cinco meses, los pesos asignados no fueron equidistribuidos, a los tres primeros períodos se les asignó un peso de 0,1, al penúltimo de 0,2 y al último (quinto)

de 0,3, para distribuir la unidad, dando así, mayor relevancia a los valores más recientes obtenidos en la demanda.

Este método produce resultados a corto plazo al necesitar la demanda del período anterior para obtener la del siguiente, no permite pronosticar varios períodos al tiempo con unos datos base, pues se debe adicionar la última observación de la demanda real, siendo poco práctico para las necesidades de cálculo de demanda requeridas en el diseño del sistema logístico para el STMB.

Figura 19: Demanda Real Vs. Demanda Proyectada con promedio móvil ponderado



Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador.

Con este método se obtuvo un error medio de porcentaje absoluto de 8,72%, el segundo valor de error más alto después del calculado con la técnica tendencia lineal.

2.2.5 Suavización Exponencial con una Tendencia

La técnica de suavización exponencial es una técnica para promediar que asigna el peso más alto a las observaciones recientes y coloca de manera sucesiva pesos menores a las observaciones anteriores. El valor de los pesos disminuye en forma exponencial, la predicción para el próximo período se hace igual a la predicción para el período actual más un porcentaje del error de predicción para el período actual, el porcentaje se denomina alfa y se escoge del modelo del usuario.

Cuando se aplica esta suavización con un factor de tendencia tenemos suavización exponencial con una tendencia, el valor de la tendencia puede obtenerse calculando la pendiente de la

ecuación de tendencia o puede hacerse cero, para la aplicación se ha calculado el pronóstico con dos valores de α : 0,8 y 0,2. (Ver ecuación 9) (Noori, 1997).

SF_{t+1} =Valor suavizado exponencialmente para el período t+1

$$SF_{t+1} = \alpha(A_t) + (1-\alpha)(SF_t + T_t) \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$SF_{t+1} = \alpha(A_t) + (1-\alpha)(TAF_t)$$

α = Valor seleccionado para Alfa $0 \leq \alpha \leq 1$

β = Valor seleccionada para Beta

A_t = Demanda real en el período t

T_t = Estimado de la tendencia para el período t

TAF_t = Predicción de tendencia para el período t

Tabla 7 Aplicación de pronóstico de suavización exponencial con una tendencia con un α de 0,8.

Período	Demanda Real	Demanda suavizada con $\alpha=0,8$	Ajuste con $\alpha = 0,8$	E_t	Error de Predicción al cuadrado1	Suma parcial del error de predicción1	Media de error de predicción1	Error medio de % absoluto1	Valor absoluto error de predicción1	Desviación media absoluta1	Señal de rastreo1
Junio	849357,8577	927822,867	1,092381566	78465,01	6156757669	78465,0092	-17947,8569	10,886965	78465,0092	78465,0092	1
Julio	871641,6831	833664,856	0,956430689	-37976,8	1442239408	40488,182			37976,8273	58220,9182	0,695423281
Agosto	899094,2542	847851,045	0,943005743	-51243,2	2625866503	-10755,0274			51243,2093	55895,0153	-0,192414786
Septiembre	964001,1723	893147,623	0,926500557	-70853,5	5020225408	-81608,5764			70853,549	59634,6487	-1,368475847
Octubre	957020,577	982473,893	1,026596415	25453,32	647871299,1	-58155,2603			25453,3161	52798,3822	-1,063579186
Noviembre	1211379,663	984573,344	0,812770244	-226806	51441106057	-282961,579			226806,318	81799,7049	-3,459200484
Diciembre	1042739,16	1279203,03	1,226771833	236463,9	55915161992	-46497,7083			236463,87	103894,586	-0,447546983
Enero	998338,352	1108631,02	1,110476238	110292,7	12164472092	63794,9573			110292,666	104694,346	0,609344821
Febrero	1039469,041	994878,902	0,957102966	-44590,1	1988280498	19204,8183			44590,139	98016,1005	0,195935343
Marzo	920144,3275	1022869,09	1,111639832	102724,8	10552376029	121929,577			102724,759	98486,9663	1,238027543
Abril	1051511,128	891917,448	0,84822445	-159594	25470142535	-37664,1026			159593,679	104042,122	-0,362008213
Mayo	1212368,213	1034658,03	0,853418971	-177710	31580908130	-215374,283			177710,18	110181,127	-1,954729352

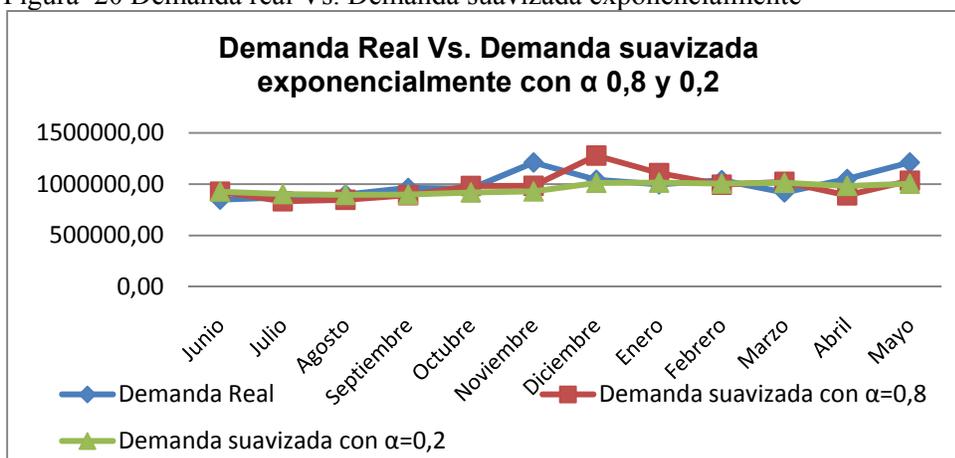
Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador.

Tabla 8 Aplicación de pronóstico de suavización exponencial con una tendencia con un α de 0,2

Período	Demanda Real	Demanda suavizada con $\alpha=0,2$	Ajuste con $\alpha = 0,2$	Et2	Error de Predicción al cuadrado2	Suma del error de predicción2	Media de error de predicción2	Error medio de % absoluto2	Valor absoluto error de predicción2	Desviación media absoluta2	Señal de rastreo2
Junio	849357,8577	927822,9	1,092381566	78465,009	6156757669	78465,0092	-42095,446	8,27169982	78465,0092	78465,0092	1
Julio	871641,6831	904283,4	1,037448509	32641,681	1065479341	111106,69			32641,681	55553,34512	2
Agosto	899094,2542	896060,2	0,996625388	-3034,094	9205727,62	108072,596			3034,0942	38046,92814	2,8405078
Septiembre	964001,1723	898564,8	0,93212003	-65436,37	4281918560	-38972,351			65436,3703	44894,28869	-0,868092
Octubre	957020,577	919091,7	0,96036773	-37928,9	1438601269	-51447,932			37928,8976	43501,21046	-1,182678
Noviembre	1211379,663	929699,2	0,767471363	-281680,5	7,9344E+10	-559934,71			281680,462	83197,75232	-6,730166
Diciembre	1042739,16	1012982	0,971462578	-29757,09	885484231	-353227,93			29757,0871	75563,37157	-4,674592
Enero	998338,352	1015543	1,017233114	17204,478	295994068	-225730,79			17204,4781	68268,50989	-3,306514
Febrero	1039469,041	1005967	0,967769586	-33502,52	1122418696	-303823,44			33502,5178	64405,62187	-4,717344
Marzo	920144,3275	1013712	1,101688464	93568,063	8754982395	-107530,62			93568,0629	67321,86598	-1,597261
Abril	1051511,128	983589	0,935405211	-67922,14	4613417077	-335046,44			67922,1398	67376,43633	-4,972754
Mayo	1212368,213	1004605	0,828630436	-207763	4,3165E+10	-720519,63			207763,012	79075,31763	-9,111815

Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador.

Figura 20 Demanda real Vs. Demanda suavizada exponencialmente



Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador.

Se observa en los resultados obtenidos, una gran similitud de resultados en los períodos iniciales, sin embargo este método no captura adecuadamente los cambios estacionales de la demanda, presentando un error medio de porcentaje absoluto de 10.89% con un α de 0,8 y de 8,27% con un α de 0,2, presentando en general una tendencia de pronóstico por debajo de la demanda real.

2.2.6 Comparativo entre las técnicas de Pronósticos

Dadas las diferencias en el cálculo de las técnicas empleadas y de los valores predichos obtenidos, es necesario establecer un criterio matemáticamente aceptado para descartar resultados, buscando seleccionar la técnica de pronósticos que tengan menor desviación con la

realidad. Por lo cual, como criterio para la selección de la técnica de pronóstico más adecuada para planear la demanda del combustible para el diseño de este sistema logístico, se toman en cuenta las medidas de error de predicción evaluadas, las cuales tienen como propósito medir la desviación de los resultados brindados de cada técnica respecto a los valores reales de la demanda.

Finalmente, se elabora una tabla comparativa (tabla 9) que resume los resultados de los cálculos de las medidas de error aplicadas: Media del error de predicción, error medio de porcentaje absoluto, error de predicción medio al cuadrado y la desviación media absoluta.

La técnica que señala menor desviación de acuerdo con las cinco validaciones realizadas es la de proyección de temporada, con un error medio de porcentaje absoluto de 3.76% presentando mayor adecuación a la estacionalidad del consumo de combustible en el sistema de transporte masivo de Bogotá y que contempla la muestra con mayor número de datos al utilizar la totalidad de datos de 2006, 2007 y 2008. Posteriormente, tenemos la técnica de promedio móvil simple, con la desventaja adicional para esta que es de carácter cortoplacista. La técnica menos precisa de las evaluadas fue suavización exponencial con tendencia desarrollada con α de 0,2 y 0,8 respectivamente.

Tabla 9: Comparativo de técnicas de pronósticos de acuerdo con medidas asociadas al error de predicción.

Método	Media de error de predicción	Error medio de % absoluto	Error medio al cuadrado	Desviación media absoluta
Línea de tendencia	-42098,7893	8,84734736	9023848861	84537,0763
Promedio Móvil Simple	3394,29527	6,2138606	7266328147	59064,5579
Proyección de Temporada	4751,79318	3,76452201	455598132,1	40855,5696
Promedio móvil ponderado	17860,1013	8,72474316	9296131480	82612,24
Suavización exponencial con $\alpha= 0,8$	-17947,8569	10,89	17083783968	110181,127
Suavización exponencial con $\alpha= 0,2$	-42095,4457	8,27	12594467551	79075,3176

Fuente: Datos tomados de Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A y procesados por el Investigador. Para proyección de temporada los valores están calculados para un trimestre.

De acuerdo con esta selección, se ha calculado la demanda para los años 2009 y 2010, por cliente como se puede apreciar en la tabla 10.

Tabla No 10: Pronóstico de la demanda trimestral por cliente para 2009 y 2010*

Pronóstico de la Demanda trimestral por cliente para 2009 y 2010									
Nombre cliente	Porcentaje de participación del total de la demanda en Km*	Consumo proyectado I trimestre de 2009	Consumo proyectado II trimestre de 2009	Consumo proyectado III trimestre de 2009	Consumo proyectado IV trimestre de 2009	Consumo proyectado I trimestre de 2010	Consumo proyectado II trimestre de 2010	Consumo proyectado III trimestre de 2010	Consumo proyectado IV trimestre de 2010
Ciudad Móvil	0,120404475	419475,2629	428944,28	438413,289	447882,302	457351,3148	466820,33	476289,3408	485758,354
Expres del Futuro	0,160818133	560271,7696	572919,05	585566,328	598213,606	610860,8854	623508,16	636155,4433	648802,722
Metrobus Sistema Integrado de Tte SI99	0,117934573	410870,4087	420145,18	429419,952	438694,723	447969,4949	457244,27	466519,0379	475793,809
Transmasivo Connexión	0,187709216	653957,1917	668719,28	683481,36	698243,444	713005,5284	727767,61	742529,6967	757291,781
Movil	0,160894522	560537,9009	573191,19	585844,474	598497,76	611151,0467	623804,33	636457,6196	649110,906
SI02	0,125492713	437202,0923	447071,26	456940,43	466809,6	476678,7686	486547,94	496417,1067	506286,276
	0,126746369	441569,6853	451537,45	461505,207	471472,968	481440,7285	491408,49	501376,2501	511344,011

Fuente: Datos tomados en SI99 y procesados por el investigador.

Los datos presentados, corresponden a las demandas de combustible a ingresar en el modelo matemático que se presentará posteriormente, el cual busca a través de la mejor asignación, minimizar costos de la implantación del sistema logístico, determinando los movimientos de subproductos y productos entre los distintos eslabones de la cadena de suministro, de acuerdo con la selección de municipios realizada para el cultivo de *Jatropha curcas* que se explicará más adelante.

3. DISEÑO Y VALIDACIÓN DE CRITERIOS PARA DESARROLLO DE MACRO LOCALIZACIÓN A TRAVES DE LA TECNICA DELPHI.

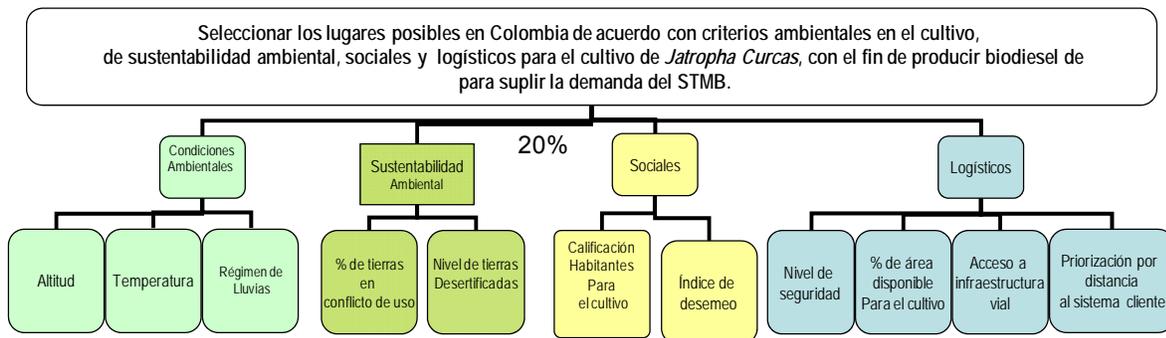
En este capítulo se presentan los criterios para definir la localización de los cultivos de *Jatropha curcas*, teniendo como entradas fundamentales para esta selección, la infraestructura disponible en términos de plantas de extracción y refinerías para el procesamiento de biodiesel, aprovechando que, las técnicas de extracción y de refinación del aceite de *Jatropha curcas* no varían de las técnicas actualmente aplicadas para el biodiesel de palma (Sotolongo, 2007) y se toman como insumos también para la localización, las variables que contribuyen al logro de los impactos esperados en el Sistema Logístico.

3.1 Diseño de criterios para la selección de lugares aptos para la localización

Se estructuraron cuatro grupos de macrocriterios: Condiciones agroclimáticas, sustentabilidad ambiental, sociales y logísticos, los cuales se subdividen a su vez en indicadores que permitirán una valoración técnica de los municipios que tengan potencialidad para el cultivo de la *Jatropha curcas*.

En el primer grupo se tienen los indicadores altitud, temperatura y régimen de lluvias, en el segundo el porcentaje de tierras con conflicto de uso y el nivel de tierras desertificadas, en el tercero la calificación de los habitantes para el cultivo y el índice de desempleo y en el cuarto se contempla el nivel de seguridad, porcentaje de área disponible para el cultivo, el acceso a infraestructura vial y la distancia con respecto al sistema cliente, esta propuesta preliminar está representada en la figura 21:

Figura 21 Diseño inicial del sistema de indicadores para la localización de cultivos



3.2 Evaluación de la pertinencia del Sistema de Indicadores propuesto

Con el fin de validar la pertinencia de los criterios propuestos para el modelo de localización, se aplicó el método Delphi, el cual, Linstone y Turoff (Linstone, 1977) definen como un sistema de estructuración de un proceso de comunicación grupal, que es efectivo para un grupo de individuos a la hora de tratar un problema complejo, en este caso el problema se definió como la validación de los criterios diseñados para la selección y localización de cultivos de *Jatropha curcas* con el fin de obtener biodiesel de esta planta, para suplir la demanda de biodiesel del sistema de transporte masivo de Bogotá STMB.

Se contó con la participación de siete expertos, divididos en cuatro grupos temáticos que corresponden a los grupos de los macrocriterios propuestos: ambiental, sustentabilidad ambiental, social y logística, quienes evaluaron anónima e individualmente los indicadores propuestos para la selección, a través de cuestionarios metodológicos que validaban la pertinencia de la propuesta. Cuestionarios que indagan sobre: la denominación, definición, justificación e importancia del indicador, peso relativo del indicador dentro del sistema, periodicidad de actualización, metodología de cálculo, formula de medida, observaciones e indicadores que sirvieron para su formulación.

A continuación se presentan los criterios analizados por los expertos en los diversos grupos temáticos:

- Condiciones agroclimáticas o criterios ambientales: En este grupo se evaluaron las condiciones agroclimáticas mínimas necesarias para el cultivo de *Jatropha curcas*: Municipios que cumplan con la condición de altitud esperada, con la temperatura requerida y verificación del régimen de lluvias de los municipios evaluados.
- Criterios de sustentabilidad ambiental: Se buscaba evaluar el porcentaje de tierras en conflicto y el nivel de tierras desertificadas de los municipios que cumplieran las condiciones ambientales requeridas. De acuerdo con la Convención de Naciones Unidas de lucha contra la desertificación y la sequía, se denominan zonas secas aquellas en las que el cociente entre la Precipitación media anual (P) y la Evapotranspiración potencial (ETP) está entre los siguientes rangos: Entre 0,05-0,20 son zonas catalogadas como áridas, entre 0,20-0,50 son semiáridas y entre 0,50 y 0,65 son subhúmedas secas (Plan de Acción Nacional del MAVDT). Se ha definido como desertificación la reducción o pérdida de la productividad biológica o económica del sistema bioproductivo terrestre compuesto por el suelo, la vegetación, otros componentes de la biota y los procesos hidrológicos y ecológicos, especialmente en los ecosistemas de las zonas secas, debido a los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos incluidos los resultantes de actividades humanas y factores climáticos (Plan de Acción Nacional del MAVDT).
- Criterios Sociales: Aquí se tienen como indicadores el índice de desempleo en municipios evaluados, el nivel de calificación de los habitantes de los municipios evaluados de acuerdo con la actividad económica del municipio, compartiendo el mismo grupo de invitados del grupo sustentabilidad ambiental, dada la formación y experiencia del grupo de sustentabilidad ambiental en temas sociales.
- Criterios logísticos: En este macrocriterio se determinó la evaluación de niveles de seguridad de la región donde están ubicados los municipios evaluados que cumplan con las condiciones ambientales para el cultivo de *Jatropha curcas*, el área disponible para el cultivo de *Jatropha curcas*, y la distancia del municipio respecto al sistema cliente.

Se procedió a recoger los cuestionarios metodológicos diligenciados y se aplicó la discusión de grupo por temas, para deliberar sobre las observaciones presentadas por los expertos participantes, de lo cual se generó el siguiente resultado:

1. Evaluar las condiciones de altitud a las cuales se da el cultivo de *Jatropha curcas*, Los evaluadores sugieren que las condiciones de altitud para el cultivo de *Jatropha curcas* se deben revisar con respecto al intervalo de 0 a 500 metros sobre el nivel del mar (intervalo presentado inicialmente por el Investigador).
2. Incluir aspectos institucionales como un grupo de criterios, en el que se evalúen las ventajas de un lugar respecto a otro en términos de facilidades institucionales para la siembra de la *Jatropha curcas*.
3. Incluir dentro del criterio: Nivel de calificación de los habitantes de los municipios evaluados, si hay mayor adaptación de los mismos a mono o policultivos.
4. Definir con mayor precisión el significado de tierras en conflicto.
5. No medir los criterios por municipios sino por zonas agroecológicas, revisando la similitud de condiciones climáticas de los diversos municipios y otorgando prioridad a este macrocriterio sobre los otros.
6. Evaluar la pertinencia de priorizar los municipios por distancias respecto al sistema cliente, ya que el primer transporte que se realiza no es desde el cultivador hasta el cliente, sino hasta las plantas extractoras, variable que se tendrá en cuenta el proyecto en el modelo matemático que busca minimizar costos y que se presentará posteriormente.

3.3 Revisión de los macrocriterios e indicadores seleccionados

Sobre las recomendaciones derivadas de la aplicación del *Delphi* y discusión de grupo, se inicia un proceso de revisión de literatura disponible sobre las variables identificadas como criterios para la selección de municipios, revisión que permite hacer las siguientes validaciones:

3.3.7 Condiciones de Altitud

Heller en 1992 realizó un experimento en dos lugares ubicados en India, Senegal y Cabo Verde, con semillas de trece procedencias; los sitios evaluados tienen un clima semiárido, con una estación corta lluviosa (aproximadamente 4 meses) y una estación más larga seca, de aproximadamente 8 meses con una amplia variación en la precipitación anual (200-800 mm), con base en esta revisión se reevalúan las condiciones de altitud presentadas inicialmente en los cuestionarios metodológicos de la aplicación Delphi, pasando de un rango entre 0 y 500 a un intervalo entre 7 y 1600 metros sobre el nivel del mar como altitudes posibles para el cultivo (Figura 22).

Figura 22. Origin of seed provenances and climatic data of collecting sites.

Origin of provenances A	Altitude	Average temp. (°C)	Average annual rainfall
Cape Verde, Fogo (1)	150-1600	19-25	200-1000
Senegal, Santhie Ram	15	28	700
Ghana, Nyankpala	183	28.7	1080
Benin, Cotonou	7	25.3	1330
Burkina Faso, Kongoussi	300	?	520
Kenya, Kitui	1020	28?	790
Tanzania, Mombo	430	>20	670
Burma, Sink Gaing, Mandalay	80	27	825
India, Kangra	580	?	?
India, Kangra	434	11-38	?
India, Poona (11)	556	24.6	672
Costa Rica, Rio Grande	10	27.5	2000
Mexico, Veracruz (13)	16	24.8	1623

Fuente: Heller 1992.

3.3.8 Inclusión de aspectos institucionales para la evaluación de los municipios

Se revisaron los programas que ofrece el Estado actualmente, encontrando que el Ministerio de Agricultura tiene el programa Agro Ingreso Seguro el cual dispone de recursos aprobados para la inversión en el agro Colombiano, siendo posible financiar con cargo a estos recursos y con

condiciones especiales DTF-2, hasta 15 años de plazo, hasta 3 años de gracia, para la siembra de cultivos de mediano y tardío rendimiento que no formen parte de la Agenda Exportadora y la siembra de cultivos de ciclo corto para pequeños y medianos productores (Ministerio de Agricultura de Colombia, 2008). Esto quiere decir que se puede financiar la siembra y mantenimiento de *Jatropha* curcas con cargo a estos recursos.

Otro tipo de incentivo es el de capitalización rural, el cual aplica únicamente para una lista de cultivos específicos dentro de los cuales no está la *Jatropha* curcas. En resumen, se identifica a través de esta búsqueda de información, que todos los municipios presentan las mismas posibilidades para acceder a los beneficios del Estado en el caso de estar interesados en el cultivo de *Jatropha*, por lo cual no es práctico medir este tipo de criterio para el estudio de macrolocalización, ya que no representa una ventaja distintiva de un municipio a otro.

3.3.9 Inclusión en el criterio Nivel de calificación de los habitantes de los municipios evaluados, si hay mayor adaptación a mono o policultivos

Este proyecto es el diseño de un sistema logístico que validará la localización de cultivos a través de la revisión del cumplimiento de criterios probados por otros estudios, no cuenta con una fase de validación en campo, dentro de las fuentes de información sobre los municipios colombianos consultadas, no se ha encontrado la predominancia de los mono o policultivos, por lo cual no es viable la inclusión de este aspecto dentro del criterio de calificación de los habitantes, al no encontrarse facilidad en la consecución de la información, se revisará la tendencia del municipio hacia la agricultura, ganadería, pastoreo, comercio, etc. para validar la capacidad de adaptación de los moradores del municipio a un nuevo cultivo, pero no se encuentra el nivel de especificidad sobre sí hay mono o policultivos.

3.3.10 Definición del significado de tierras en conflicto con mayor precisión

Sobre este aspecto se ha adoptado la recomendación, ampliando la definición brindada en la hoja metodológica del criterio (ver texto en cursiva), así:

Este indicador señala los conflictos entre la oferta ambiental, su vocación de uso y las demandas que configuran el actual patrón de ocupación en las regiones Colombianas. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2001). *Lo cual se concreta en dos aspectos específicos: Subutilización de suelos con vocación Agroclimáticos y uso incorrecto del mismo de acuerdo con su vocación y en el que el cultivo de *Jatropha curcas* sea una opción de mejora para su uso.*

Sin embargo, dentro del análisis de la información disponible, se identificó en el estudio más reciente en Colombia sobre el conflicto de usos de suelo (IGAC, 2001) que estos datos están analizados de manera agregada por regiones naturales (Caribe, Andina, Sistemas aislados, Amazonia, Pacífico, Orinoquía, depresiones interandinas) no siendo factible extrapolar esta información a municipios, siendo esta la unidad geográfica de evaluación de los criterios seleccionados, por lo cual este criterio no es viable como pauta para la valoración de sitios potenciales para el cultivo de *Jatropha curcas* en el presente estudio.

Dentro del macrocriterio Sustentabilidad ambiental se evalúo únicamente el nivel de tierras desertificadas en los municipios que cumplan las condiciones ambientales requeridas, aspecto que sí se encuentra por municipios, pudiéndose incluso obtener la clasificación de tierras desertificadas en un grado alto, moderado y bajo (MAVDT, 2005).

3.3.11 Medición de los criterios por zonas agroecológicas

Revisando la similitud de condiciones climáticas de diversos municipios y otorgando prioridad a este macrocriterio sobre los otros, se encuentra que para el estudio de macrolocalización es más práctico medir los criterios por municipios, ya que es a través de esta unidad de división política como se encuentra analizada la información en las fuentes disponibles sobre las condiciones climáticas colombianas, disponibilidad de área desértica, actividades económicas principales, distancias con respecto al sistema cliente y a las posibles plantas de procesamiento, aclarando que, si algún municipio no cumple con alguna de las condiciones ambientales requeridas para el cultivo sale del proceso de evaluación, buscando cumplir con lo recomendado por los expertos sobre la validación de las condiciones climáticas por encima de las demás variables, precisando

que se va a cultivar en los terrenos desérticos disponibles del municipio, de acuerdo con las condiciones Agroclimáticas validadas en cada u

3.3.6 Pertinencia de priorizar los municipios por distancias

En el modelo matemático desarrollado posteriormente la variable distancia es un parámetro, sobre el cual el modelo tendrá información para asignar correctamente, por lo que es irrelevante medir la distancia como un aspecto diferenciador entre municipios.

4. DESARROLLO DE MACROLOCALIZACIÓN APLICANDO EL METODO PROCESO JERARQUICO ANALITICO (AHP)

En este capítulo se presentará el proceso de recolección de información realizado para la evaluación de los municipios potenciales, al tener validados los criterios propuestos para la selección de cultivadores; igualmente, se presenta el desarrollo del método Proceso Jerárquico Analítico, como herramienta elegida para la selección de las alternativas disponibles, por las ventajas que ofrece este método para problemas de decisiones multicriterio.

4.1 Resultados preliminares de la exploración de información asociada a los macrocriterios

Se estudiaron un total de 250 municipios, 116 de ellos pertenecen al departamento de Cundinamarca, 47 del departamento del Tolima y 87 en Santander. Se evaluó inicialmente a Cundinamarca por ser este el departamento donde está ubicado el Sistema cliente, Tolima por la cercanía a Bogotá y Santander por la infraestructura petrolera con la que cuenta, realizando inicialmente, el cruce entre los criterios ambientales y de sustentabilidad ambiental, cabe anotar que se valoró la posibilidad de implementación de cultivos en el Meta, pero haciendo una revisión general del departamento, se encuentran regímenes de lluvia superiores a los deseados para el cultivo del *Jatropha*, en la gran mayoría del departamento.

Adicionalmente, dentro de la caracterización de municipios, se encuentra también que el índice de desempleo se encuentra consolidado por zonas rurales en Colombia con un índice de 7,7, en el último trimestre (febrero-abril de 2008) índice contenido en el informe de indicadores de mercado laboral (DANE, 2008), en esta fuente, la información disponible con mayor detalle se presenta por regiones (Atlántica, Pacífica, central y Oriental) con periodicidad semestral hasta el 2006, estando Cundinamarca en la región central, con una tasa de desempleo del 9,8% para el segundo semestre de 2006, por lo cual este indicador no es viable medirlo por municipios, ya que no representa un criterio distintivo para preferir un municipio frente a otro para el cultivo de la *Jatropha curcas*.

En el indicador: seguridad vial, tenemos que ninguno de los municipios clasificados como potenciales para el cultivo de acuerdo con el filtro de cumplimiento de condiciones agroclimáticas, está catalogado como peligroso, de acuerdo con la clasificación de delitos de impacto analizada por la Policía Nacional (Policía Nacional, 2007). Por lo cual este indicador desaparece también de los indicadores analizados preliminarmente para realizar la selección de cultivadores.

En las tablas 11, 12 y 13 se presentan los municipios seleccionados por su cumplimiento de las condiciones agroclimáticas y disponibilidad de tierra desértica en Cundinamarca, Tolima y Santander, criterios que son el filtro para continuar con el análisis de los demás criterios validados como insumo para la selección de cultivadores:

Tabla 11: Municipios seleccionados en Cundinamarca
Como potenciales sitios de cultivo de *Jatropha curcas*

Municipio	Área desértica de grado bajo más moderado en Hectáreas	Área total desértica
Guaduas	467,10	479,00
Fusagasugá	29,41	67,00
Cahipay	12,825	22,00
Caparrapí	264,12	265,00
San Juan de Río Seco	125,94	126,00
Tocaima	105,59	234,00
Jerusalén	94,15	189,00
Utica	81,31	81,00
Girardot	75,90	100,00
Pulí	71,06	71,00
Nilo	69,51	143,00
La Peña	67,87	67,00
Apulo (Rafael Reyes)	63,17	88,00
Chaguani	58,46	78,00
Villeta	39,00	39,00
Viotá	32,19	32,00
Agua de Dios	19,46	91,00
Beltrán	30,38	109,00
Nimaima	24,39	24,00
Quebradanegra	24,30	24,00
Puerto Salgar	24,17	24,00
Ricaurte	22,65	94,00
Guataquí	20,87	48,00
Nariño	17,80	25,00
Anapoima	15,99	85,00
Pandi	15,64	22,00
Tibacuy	17,00	17,00
Arbelaéz	13,05	31,00
La Palma	8,96	9,00
Nocaima	6,24	6,00
Paima	5,72	6,00
El colegio	4,72	5,00
Quipile	2,20	3,00
Sasaima	1,25	1,00

Fuente: Datos procesados por el Investigador.

Tabla 12. Municipios seleccionados en el Tolima
 Como potenciales sitios de cultivo de *Jatropha curcas*

Municipio	Área desértica de grado bajo más moderado	Área total desértica
Honda	164,63	375,00
Ambalema	170,742	199,00
Venadillo	122,824	233,00
Piedras	140,26	303,00
Coello	198,80	337,00
Flandes	15,86	65,00
Carmén de		
Apicalá	27,97	118,00
Melgar	35,03	89,00
Icononzo	9,00	9,00
Suaréz	63,78	135,00
Armero	160,46	421,00
Espinal	172,61	192,00
Guamo	207,72	514,00
San Luis	138,52	387,00
Valle de San		
Juan	167,27	203,00
Saldaña	94,55	206,00
Ortega	245,62	593,00
Alpujarra	120,25	252,00
Natagaima	331,27	636,00
Lerida	117,87	224,00
Alvarado	101,56	278,00
Dolores	74,55	104,00

Fuente: Datos procesados por el Investigador.

Tabla 13. Municipios seleccionados en Santander
Como potenciales sitios de cultivo de *Jatropha curcas*

<i>Municipio</i>	<i>área desértica de grado bajo más moderado en Km²</i>	<i>área total desértica</i>
Capitanejo	19,42	77,00
Enciso	8,806	13,00
Matanza	29,88172	30,00
Girón	155,68	312,00
Pidecuesta	33,39	121,00
Curití	3,32	47,00
Jordán	24,24	38,00
Villanueva	4,32	70,00
Barichara	0,00	125,00
Cabrera	4,64	51,00
Onzaga	37,75	44,00
Floridablanca	21,72	22,00
Los Santos	31,82	218,00
San Gil	0,00	59,00
Galán	0,00	56,00
Pinchote	0,00	36,00
Cepita	16,728	65

Fuente: Datos procesados por el Investigador.

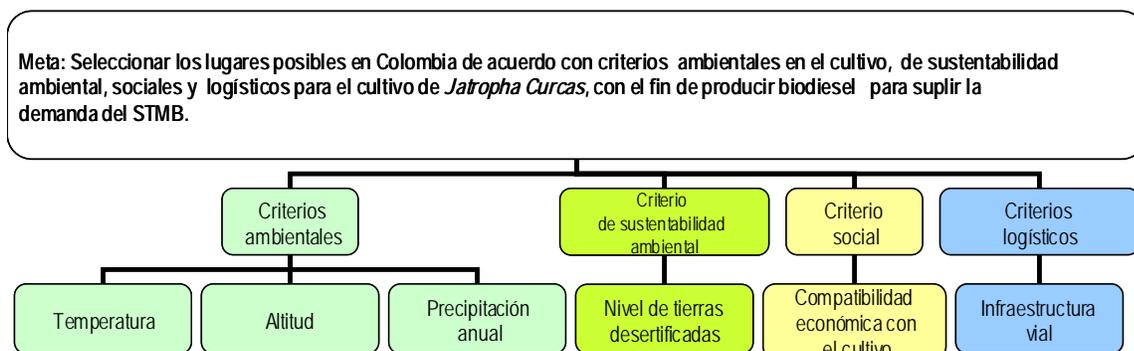
De acuerdo con este análisis preliminar de las condiciones agroclimáticas y el terreno desértico disponible de los distintos municipios, se continúa el proceso de selección para los departamentos Cundinamarca y Santander, ya que con estos dos se cubriría la demanda requerida, realizando algunos cálculos preliminares sobre la oferta, de acuerdo con los rendimientos a utilizarse con la *Jatropha* (supuestos presentados en el capítulo 7 del presente documento) se prefirió Santander sobre el Tolima por la infraestructura petrolera disponible en Barrancabermeja Santander, haciendo una exploración de la información asociada para calificar los demás criterios validados a través del ejercicio Delphi en los municipios de estos departamentos.

4.2 Aplicación del Proceso Jerárquico Analítico (AHP)

El método AHP fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty, consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico que básicamente contiene tres niveles: Meta, criterios e indicadores (o alternativas), el AHP “se trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión” (Saaty, 1998). Se evidenció la aplicación del AHP para tratar problemas de naturaleza parecida al que atañe a este proyecto (Mogollón, 2000) (García, 2006) y la coherencia de este método al contemplar un índice de consistencia para asegurar la congruencia del proceso aplicado, además de la existencia de un programa informático que permite la aplicación del AHP (EXPERT CHOICE, versión de evaluación 11).

Para el caso de estudio, el modelo jerárquico definido de acuerdo con la toma de acciones posterior a la implementación del Delphi, está representado en la figura 23.

Figura 23: Sistema de Indicadores para la macrolocalización



Los rangos de evaluación de los indicadores establecidos en los grupos de macrocriterios, son obtenidos a través de la bibliografía existente, así:

Ambientales, hacen referencia a las condiciones agroclimáticas necesarias para el cultivo de *Jatropha* y constituyen el primer filtro dentro del estudio de macrolocalización, son de tipo excluyente, es decir, si un municipio no supera esta evaluación, no vale la pena seguir adelante con ese municipio como alternativa.

- Temperatura: Municipios con temperaturas entre 11 °C y 40°C (Heller, 1996)
- Altitud: Municipios que Cumplan con la condición de altitud entre 7 y 1600 metros sobre el nivel del mar (Heller 1996).

- Precipitación anual: Municipios con un régimen de lluvias entre 250 y 3000 mm por año (Achten ,2007) con condiciones óptimas cuando se está entre 300 y 1000 mm. (Heller, 1996). Evaluado así:

Tabla 14: Calificación otorgada a la variable Régimen de Lluvias

Régimen de Lluvias:	Calificación
300-1000	5
1000-2000	4
>2000	3

Sustentabilidad ambiental, en este aspecto se verifica el nivel de tierras desertificadas en los municipios que cumplan las condiciones ambientales requeridas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT, 2005), otorgando mayor ponderación a los municipios con mayor cantidad de tierra desértica disponible, como lo muestra la tabla 15:

Tabla 15: Calificación por rango de tierras desertificadas de los municipios

	Disponibilidad de tierras	Calificación
Áreas disponibles en K²:	0-20	1
	21-50	2
	51-100	4
	101-150	5
	151-200	6
	201-300	7
	301-400	8
	>400	9

Social, se identificó el nivel de calificación de los habitantes para el cultivo de *Jatropha*, de acuerdo con la actividad económica del municipio, de acuerdo con tabla 16:

Tabla 16: Calificación por compatibilidad con la actividad económica

Compatibilidad actividad económica	Calificación
Agrícola	5
Ganadero	4
Minero, turístico u otro	3

Logístico, dentro de este macrocriterio, se revisa el acceso a infraestructura vial, otorgando un mayor puntaje a las vías de los municipios que tienen mejor estado en infraestructura, como lo evidencia la tabla 17:

Tabla 17: Calificación de municipios de acuerdo con estado de las vías

Nivel de la vía	Calificación
Principal (pavimentada)	5
Secundaria (pavimentada o sin pavimentar)	3
Carreteable o menos (no pavimentada)	1

La búsqueda de información de los 116 municipios de Cundinamarca y los 87 municipios de Santander en cuanto a cada uno de los criterios evaluados, se realizó a través del atlas climatológico de Colombia (IDEAM, 2005), mapas, atlas y rutas disponibles por el IGAC, el Plan Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y la información suministrada por las Gobernaciones de los departamentos a través de sus páginas Web, información disponible del Departamento Nacional de Estadística DANE, de la Policía Nacional y los Ministerios de Defensa, Transporte y Agricultura, información recopilada y base para otorgar las calificaciones ya enunciadas en cada uno de los criterios.

Posteriormente se realiza el procesamiento de la información en el software EXPERT CHOICE (Versión 11). A través del AHP se busca que las localizaciones respondan a una valoración cualitativa y cuantitativa técnica, para lo cual el primer paso del proceso consiste en otorgar un nivel de importancia a cada uno de los macrocriterios. Dentro de la selección, se ha dado prioridad a los criterios logísticos dada la naturaleza de este trabajo que consiste en el diseño de

un sistema logístico, seguido tenemos los de sustentabilidad ambiental por la importancia que ha dado el investigador a la potencialidad de recuperación de suelos que tiene la *Jatropha*, posteriormente tenemos los criterios ambientales dado que los municipios evaluados cumplían con el filtro de cumplimiento de las condiciones agroclimáticas mínimas requeridas para el cultivo, lo que se evalúa aquí es un cumplimiento más cercano a las condiciones óptimas de cultivo que refiere la literatura sobre la *Jatropha* y como último en importancia tenemos el criterio social, logrando un índice de consistencia de 0,04.

La base de referencia para aceptar la consistencia de los juicios planteados debe ser de hasta 0,10 (Mogollón, 2000). Se ha validado a través del índice de consistencia obtenido, que esta implementación está en el rango permitido, aclarando que, a través del AHP se podría cambiar la importancia asignada a los macrocriterios entre sí, dependiendo de los intereses del tomador de decisiones, siempre y cuando se conserve el índice de consistencia en el límite válido de aceptación.

Para cada uno de los criterios se obtiene una priorización de municipios en cada uno de los departamentos, y sobre esos resultados parciales se logra un compendio final que pondera todos los municipios por orden de cumplimiento total.

Finalmente, después emplear la metodología AHP se obtuvieron para Cundinamarca 33 municipios viables para el cultivo (Ver figura 24), mostrando entonces una importante oportunidad de desarrollo en este departamento para la producción de biodiesel a base de *Jatropha* curcas, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, sociales, económicas y logísticas, de lo que significaría suplir el mercado potencial de Biodiesel del STMB.

En el caso de Santander se obtuvieron 17 municipios factibles para el cultivo de *Jatropha* como se puede ver en la figura 26 (aunado a la ventaja de ser un departamento con siete plantas extractoras de aceite y la biorefinería ubicada en Barrancabermeja), por lo cual este departamento presenta un alto potencial para la producción de biodiesel con el fin de abastecer la demanda del STMB.

Por tanto con esta metodología se seleccionan un total de 50 municipios potenciales para el cultivo de *Jatropha* curcas, brindando el AHP una priorización dentro de la selección de acuerdo con las mayores puntuaciones obtenidas por municipio para los grupos de criterios utilizados

(ambiental, sustentabilidad ambiental, social y logístico). Buscando la minimización de impactos desde la selección de las áreas a cultivar, potencializando la recuperación de suelos y la generación de empleos necesarios tanto para cultivar, como para cumplir con las demás etapas previstas en una cadena de suministro, en aras de suplir la demanda de biodiesel en el STMB, iniciando con esta selección, la caracterización de la cadena de suministro del sistema logístico que propone esta investigación.

Se encuentra en esta investigación la combinación de las técnicas Delphi y Proceso Jerárquico analítico para la estructuración del modelo jerárquico de selección de cultivadores, evidenciando que no hay antecedentes del uso de estas dos técnicas combinadas para un propósito similar.

Figura 24: Selección de municipios de Cundinamarca realizada en Expert Choice

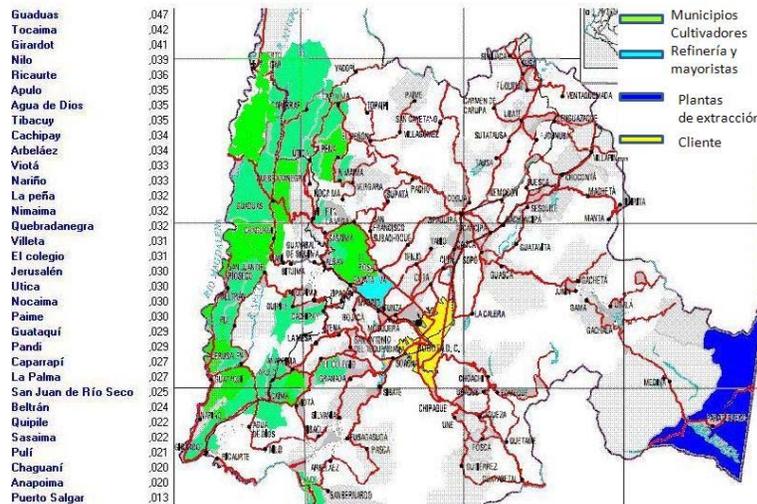
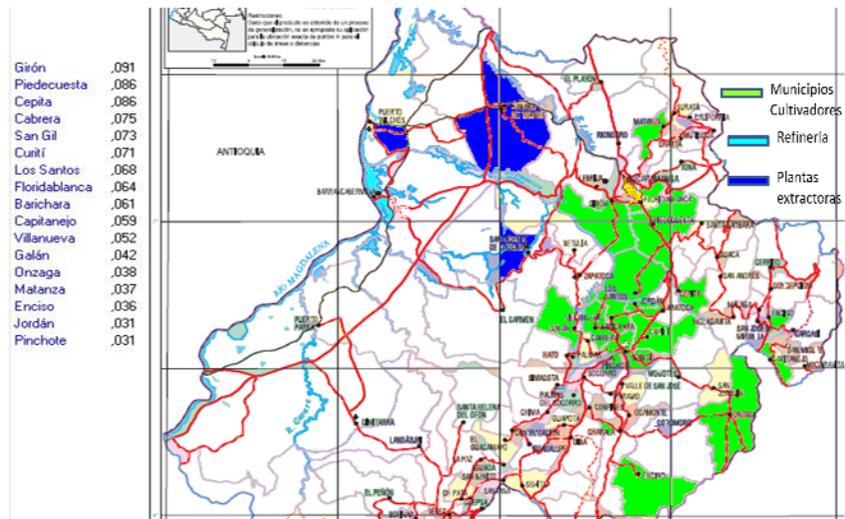


Figura 25: Selección de municipios de Santander realizada en Expert Choice



5. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO

Este capítulo presenta los eslabones que integran la cadena de suministro del sistema logístico propuesto y mostrar la caracterización que se ha realizado de cada uno de ellos.

5.1 Cadena de Suministro

Está compuesta por cinco elementos como se observa en la figura 26, los cultivadores, plantas extractoras, refinerías, mayoristas y clientes. Inicialmente, se contempló un sexto eslabón entre la refinería y los mayoristas, y era el transportador, tomado como los poliductos de ECOPETROL, sin embargo, de acuerdo con la información disponible de parte de Terpel, uno de los mayoristas más importantes para el STMB, el diesel y biodiesel actualmente está siendo transportado por carrotanque y no por los poliductos de ECOPETROL, teniendo más garantías en

las medidas necesarias para el transporte, al llevar el combustible y biocombustible en este segundo medio.

Figura 26: Diagrama cadena de suministro



Fuente: Figura diseñada por el investigador, las fotografías están disponibles en Microsoft Power Point y www.transmilenio.gov.co

5.1.1 Cultivadores

A través de la aplicación del AHP se han seleccionado 33 municipios en Cundinamarca y 17 en Santander, explorando como área disponibles para el cultivo, los terrenos calificados por el MAVDT como desérticos en estos municipios, de acuerdo con el beneficio que se busca en este proyecto de lograr la recuperación de suelos a través del cultivo de la *Jatropha curcas*.

- **Cundinamarca**

En la tabla 18 se presenta la caracterización de los criterios ambientales, de sustentabilidad ambiental, social y de logística para los municipios validados en Cundinamarca.

Tabla 18: Caracterización de municipios de Cundinamarca

<i>Municipio</i>	área total desértica	Calificación por área disponible (total desértica)	Altitud	Temperatura	Regimen de Lluvias	Calificación por régimen de lluvias	Calificación de la Actividad económica principal respecto al cultivo de Jatropha Curcas	Acceso a Infraestructura Vial
Guaduas	479,00	9,00	1023	22	1000-2000	4	5	5
Cahipay	22,00	2,00	1250	19,5	1000-1543	5	3	5
Caparrapí	265,00	7,00	1272	21	1500-2500	2	5	3
Seco	126,00	5,00	1268	21	1000-1500	5	-	3
Tocaima	234,00	7,00	399	26	1000-2000	4	5	5
Jerusalén	189,00	6,00	300	27	1000-1500	5	5	3
Útica	81,31	4,00	500	26	1000-2000	4	5	5
Girardot	100,00	4,00	289	26	1000-1500	5	5	5
Pulí	71,06	4,00	1000	23	1000-1500	5	-	3
Nilo	143,00	5,00	400	27	1000-2000	4	5	5
La Peña	67,87	4,00	1230	22	1500-2500	2	5	5
Apulo (Rafael Reyes)	88,00	4,00	417	26	1000-2000	4	5	5
Chaguaní	78,00	4,00	1023	22	1000-2000	4	5	3
Villete	39,00	2,00	799	24	1500-2500	2	5	5
Viotá	32,19	2,00	567	25	1000-2000	4	5	5
Agua de Dios	91,00	4,00	350	27	1000-1500	5	1	5
Beltrán	108,97	5,00	229	27	1000-1500	5	3	3
Nimaima	24,40	2,00	1175	18	1500-2001	4	5	5
Quebradanegra	24,30	2,00	1300	21	1000-2000	4	5	5
Puerto Salgar	24,17	2,00	176	24	2000-3000	2	3	3
Ricaurte	94,00	4,00	284	27	1000-2000	4	5	5
Guataquí	48,00	2,00	255	27	1000-1500	5	5	3
Nariño	25,00	2,00	262	27	1000-1500	5	3	5
Anapoima	85,00	4,00			1000-2000	4	5	3
Pandi	22,00	2,00	925	23	2000-3000	2	5	5
Tibacuy	17,00	1,00	1550	19,2	1000-1500	5	5	5
Arbelaéz	30,60	2,00			1000-1500	5	3	5
La Palma	9,00	1,00	1452	20	1500-2500	2	3	5
Nocaima	6,24	1,00	1100	23	1500-2500	2	5	5
Paime	6,00	1,00	950	23	1500-3000	2	5	5
El colegio	5,00	1,00	980	23	1000-2000	4	5	5
Quipile	3,00	1,00	1448	20	1000-1500	5	5	3
Sasaima	1,25	1,00	1191	22	1000-3000	2	5	5

*Datos tomados de: Atlas climatológico de Colombia, páginas Web de los Municipios, Gobernación de Cundinamarca, Plan de Acción Nacional del MAVDT y procesados por el investigador
A partir de esta caracterización de los municipios de Cundinamarca se realizó la evaluación del AHP en el EXPERT CHOICE.

- **Santander**

En la tabla 19 se presenta la caracterización de los criterios ambientales, de sustentabilidad ambiental, social y de logística para los municipios validados en Santander.

Tabla 19. Caracterización de municipios de Santander

Municipio	área total desértica	Calificación por área disponible (total desértica)	Calificación por área disponible (grado alto)	Altitud	Temperatura	Regimen de Lluvias	Calificación régimen de lluvias	Calificación de la Actividad económica principal respecto al cultivo de <i>Jatropha Curcas</i>	Acceso a Infraestructura Vial
Capitanejo	77,00	4,00	3,00	1090	25	500-1000	6	5	3
Enciso	13,00	1,00	1,00	1580	20	1000-2000	4	5	3
Matanza	30,00	3,00	1,00	1550	20	1000-2000	4	5	3
Girón	312,00	5,00	5,00	777	25	1000-3000	2	1	5
Pidecuesta	121,00	5,00	5,00	984	23	1000-2000	4	5	5
Curití	47,00	3,00	3,00	1419	20	1000-2000	4	5	5
Jordán	38,00	3,00	1,00	425	30	1000-2000	4	1	3
Villanueva	70,00	4,00	4,00	1450	20	1000-1500	5	5	3
Barichara	125,00	5,00	5,00	1336	21	1000-1500	5	5	3
Cabrera	51,00	4,00	3,00	980	23	1000-2000	4	5	5
Onzaga	44,00	3,00	1,00	1420	18	500-3000	2	5	3
Floridablanca	22,00	3,00	1,00	925	23	1000-2000	4	3	5
Los Santos	218,00	5,00	5,00	310	21	500-1500	5	5	3
San Gil	59,00	4,00	4,00	1114	22	1000-2000	4	5	5
Galán	56,00	4,00	3,00	919	23	1000-2000	4	5	3
Pinchote	36,00	3,00	3,00	1133	22	1000-2000	4	3	3
Cepita	65	4	4	660	25	500-1500	5	5	5

Datos tomados de: Atlas climatológico de Colombia, páginas Web de los Municipios, Gobernación de Santander, Plan de Acción Nacional del MAVDT y procesados por el investigador

A partir de esta caracterización de las poblaciones santandereanas, se realizó la evaluación del AHP en el EXPERT CHOICE.

5.1.2 Plantas de Extracción

Para los municipios de ambos departamentos se encuentran plantas de extracción dentro de los departamentos como lo veremos en la tabla 20, teniendo Cundinamarca segundas opciones en el Meta, alternativas viables por la cercanía de los departamentos y por el estado de las vías.

Tabla 20: Análisis situacional de Plantas de Extracción

<i>Departamento</i>	<i>Municipio</i>	<i>Zona</i>	<i>Nombre de la Planta</i>	<i>N. de plantas por departamento</i>	<i>Capacidad en toneladas de fruto/hora (2007)</i>
Cundinamarca	Paratebueno		Promesa S.A	3	
	Bogotá		Sigra S.A		
	Bogotá		Inversiones Agrograsas Ltda. (Soacha)		
	Villavicencio		Proteínas del Oriente S.A C.I Oleaginosas del Ocoa S.A Agropecuaria La Loma Ltda. Agropecuaria Santamaría la torre y CIA		
Meta	Acacias	Oriental	El Palmar del Llano S.A	21	353
			Inversiones La Mejorana Ltda. Oleaginosas Santana Ltda. Palmeras del Llano S.A Palmeras La Margarita Día Martínez y Cía Ltda.		
	Barranca de Upía		Guicaramo S.A		
	Cabuyaro		Palmallano S.A		
	Cumaral		Hacienda la Cabaña S.A		
	Puerto Gaitán		Unipalma S.A Sapuga S.A		
			Aceites Manuelita S.A		
	Sar Carlos de Guaroa		Extractora la Paz S.A Extractora La Reserva Ltda. Extractora Morichal V & S Ltda. Oleaginosas San Marcos Ltda.		
	San Martín		Entrepalmas S.A Palmeras San Pedro Ltda.		
	Bucaramanga		Aceygrades S.A		
Santander	Puerto Wilches	Central	Extractora Monterrey S.A Oleaginosas Las Brisas S.A Palmas Oleaginosas Bucarella S.A	7	249
	Sabana de Torres		Palmeras de Puerto Wilches S.A		
	San vicente de Chucurí		Extractora San Fernando		
Cesar	San Alberto		Extractora Central S.A	2	
	San Martín		Industrial Agraria la Palma Palmas del Cesar		
Totales				33	602

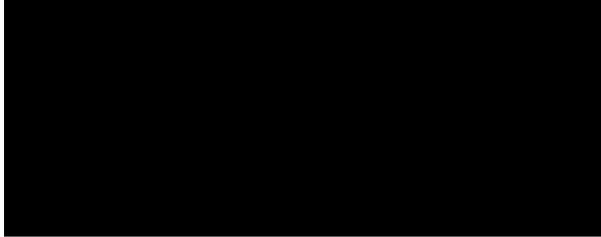
*Datos tomados del anuario estadístico de Fedepalma, 2007 y procesados por el Investigador.

5.1.3 Refinerías

Igualmente, ambos departamentos cuentan con refinerías disponibles. En el caso de Cundinamarca tiene una planta de refinación en Mansilla y Santander cuenta con una de las plantas más

tradicionales de Colombia en la ciudad de Barrancabermeja. Observemos en la tabla 21 una caracterización de las mismas.

Tabla 21. Análisis Situacional Refinerías



Fuente: Datos obtenidos de Ecopetrol, en <http://www.ecopetrol.com.co/05biocombustible.aspx> consultado en septiembre de 2008, de www.agromeat.com consultado el 22 de julio de 2008 y de fuente confidencial y procesados por el investigador.

5.1.4 Mayoristas

Se identifican dos mayoristas: Terpel y Exxonmobil, transportan el diesel desde Mansilla (Facatativá) hasta los clientes en carros tanques dispuestos para tal fin, con capacidad de almacenamiento de 4000 barriles para biodiesel y 8000 para diesel.

5.1.5 Clientes

Están conformados por siete operadores de buses articulados de Transmilenio S.A ubicados en los patios de Operaciones de Usme, Tunal, Norte, Calle 80, Sur, Américas y Suba, los cuales registraron un consumo de 13'179.399 galones de combustible en el 2008. En los Patios de Usme y Américas se cuenta con una capacidad de 30.000 galones en cada uno, a través de tres tanques de 10.000 galones.

5.1.6 Metodología de cálculo de distancias entre los actores de la cadena de suministro

La determinación de las distancias existentes entre los diferentes eslabones de la cadena de suministro se hace mediante la manipulación de datos en formatos vector y ráster por medio del software ARCGIS versión 9.2 el cual permite traducir los datos ráster (Matriz regular de celdas con información acerca de la posición y el nivel digital del pixel) a vector (digitalización) y automatiza la estimación de las distancias de acuerdo con parámetros relativos tanto a las variaciones de altitud en la extensión del proyecto como a

los conceptos de posición y proyección que permitan integrar los datos con cualquier otro tipo de información espacial, llevando a cabo los siguientes pasos:

- La información sobre la disponibilidad, estado de las vías y límites de entidades territoriales (departamentos y municipios) se adquirió en formato análogo (planos). Se procedió a digitalizarla para obtener imágenes (datos raster) que permitan ser reconocidas y manipuladas por un software adecuado para convertirlas en datos vectoriales.
- Cada plano posee información acerca de la posición de sus elementos con respecto a un sistema de referencia, es decir, de forma sencilla es una grilla con origen y orientación identificables graduada en unidades apropiadas para mediciones simples o ubicación; dicha información permite el proceso de georreferenciación, el cual consiste en desplegar la imagen y asignarle coordenadas a cierta cantidad de detalles del plano con el fin de que un proceso de muestreo de puntos geográficos, elegido por el usuario, asigne a todos los píxeles la información no solo de su nivel digital, sino de su posición, en un sistema de coordenadas bajo el criterio de los mínimos cuadrados. La metodología aquí utilizada se enmarca en los parámetros establecidos por el IGAC para el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS en la zona de proyección central origen Bogotá Transversa de Mercator.
- Los datos se descargan en formato Arc ASCII que es un arreglo de datos basado en texto con un encabezado de cinco líneas que proporciona la información de la extensión y la resolución espacial.
- Cuando se han georreferenciado las imágenes, se procede a traducir la información raster a vector, digitalizando las entidades territoriales como polígonos, las vías como líneas y los portales de Transmilenio, como puntos (Ver anexos).
- Posteriormente, se ubicó la información vial sobre los datos de elevación para el procesamiento de las distancias teniendo en cuenta los cambios de altitud de una forma más precisa, generando a partir de los datos raster de elevación, un Modelo Digital de Terreno (DTM) sobre el cual se proyectarán las vías.
- Finalmente, se hace una evaluación de la exactitud de posición de acuerdo con los estándares adoptados por el IGAC en la infraestructura nacional de datos espaciales, basados en un mínimo

de 20 puntos para obtener un nivel de confianza del 95% asumiendo normalidad e independencia lineal en los datos (Ver tabla 22).

Tabla 22. Validación confiabilidad cálculo distancias

ld.	X real	Y real	x aprox	y aprox	X-x	Y-y	(X-x)(X-x)	(Y-y)(Y-y)	$\sqrt{(X-x)(X-x)}$	$\sqrt{(Y-y)(Y-y)}$
1	1077510,58613	1347258,46903	1077460,73638	1347309,76373	49,84975	-51,29470	2484,997575	2631,146248	49,84975	51,2947
2	1060637,66043	1338297,22346	1061112,59605	1338856,77108	-474,93562	-559,54762	225563,8431	313093,539	474,93562	559,54762
3	1033748,75152	1300893,15743	1033598,99709	1300953,27769	149,75443	-60,12026	22426,3893	3614,445662	149,75443	60,12026
4	1106501,62721	1282553,88182	1107133,39129	1282739,89908	-631,76408	-186,01726	399125,8528	34602,42102	631,76408	186,01726
5	1035457,07762	1252648,92395	1034905,16998	1252698,62158	551,90764	-49,69763	304602,0431	2469,854428	551,90764	49,69763
6	1149321,04394	1216359,05162	1149217,46939	1216599,47837	103,57455	-240,42675	10727,68741	57805,02212	103,57455	240,42675
7	938876,72869	1103753,30148	938798,93158	1103708,80579	77,79711	44,49569	6052,390324	1979,866429	77,79711	44,49569
8	908073,58494	1040684,45950	908088,38289	1040513,60621	-14,79795	170,85329	218,9793242	29190,8467	14,79795	170,85329
9	902758,06183	996934,05770	902852,57874	996800,89430	-94,51691	133,16340	8933,446276	17732,4911	94,51691	133,1634
10	942492,78145	991914,85264	942501,88945	991925,50656	-9,10800	-10,65392	82,955664	113,5060114	9,108	10,65392
11	995226,26924	993518,80231	995226,11248	993496,66516	0,15676	22,13715	0,024573698	490,0534101	0,15676	22,13715
12	909062,22945	883200,10919	909164,63301	883363,67544	-102,40356	-163,56625	10486,4891	26753,91814	102,40356	163,56625
13	901008,24929	794040,10044	901142,66254	794424,62469	-134,41325	-384,52425	18066,92178	147858,8988	134,41325	384,52425
14	905170,13222	753907,47487	905294,21778	754495,54751	-124,08556	-588,07264	15397,2262	345829,4299	124,08556	588,07264
15	1061434,45654	756116,29709	1058408,92695	753841,52578	3025,52959	2274,77131	9153829,3	5174584,513	3025,5296	2274,7713
16	1147928,77152	774685,84409	1147379,06415	775309,98995	549,70737	-624,14586	302178,1926	389558,0546	549,70737	624,14586
17	1295349,54443	892336,24476	1294659,66799	892295,07733	689,87644	41,16743	475929,5025	1694,757293	689,87644	41,16743
18	1326372,51607	1024971,37300	1325309,63017	1024880,84744	1062,88590	90,52556	1129726,436	8194,877013	1062,8859	90,52556
19	1050693,62465	950458,11516	1050585,78657	950549,33457	107,83808	-91,21941	11629,0515	8320,980761	107,83808	91,21941
20	1115935,73256	994747,50595	1115918,46106	995230,14691	17,27150	-482,64096	298,3047123	232942,2963	17,2715	482,64096
						Sumatoria	12097760,03	6799460,918		
						Promedio	604888,0017	339973,0459		
						RMSE	777,7454607	583,0720761		
							0,749695248	1665,436542		

6. SELECCIÓN, DISEÑO Y DESARROLLO DEL MODELO DE TRANSPORTE PARA EL SISTEMA LOGÍSTICO

6.1 Antecedentes

Con base en el trabajo de Molano, Optimización Multicriterio, Localización de parques, 2008 y de Masood A. Badri, Amr K. Mortagy, Colonel Ali Alsaye, A multi- objective model for location fires stations de 1998 y de acuerdo con los modelos de asignación y localización de Prawda-Hurter, se ha diseñado un modelo de asignación con programación lineal, que busca minimizar costos, en el que, a través de una homogenización de variables, explicada posteriormente, se pueda variar la importancia de los grupos de indicadores seleccionados, a través de cuatro asignaciones de costos distintas a cada grupo de indicadores: ambiental, social, sustentabilidad ambiental, social y logístico.

Se tomaron como insumos los resultados obtenidos en la aplicación del proceso jerárquico analítico aplicado previamente, para esta homogenización de variables enunciada, dado el requerimiento de asignar las mejores alternativas disponibles para los diferentes eslabones, de acuerdo con los macrocriterios diseñados para este sistema.

6.2 Supuestos del modelo:

- Las condiciones agroclimáticas son una restricción para la selección de los potenciales lugares de cultivo: temperatura, precipitación anual y altitud, por lo cual se trabajará con los 50

municipios seleccionados por el Investigador, excluyendo los municipios que no cumplen características agroclimáticas y de la aplicación del proceso jerárquico analítico.

- Los rendimientos aquí tomados aplican a partir del segundo año de cultivo (Sotolongo, 2007).
- Se cubre la demanda a partir de t_3 , cumpliendo los 5 meses requeridos para la cosecha de *Jatropha*.
- Se toman diez destinos de plantas de extracción en Cundinamarca y 6 en Santander, tomando cada destino como una planta, aunque haya más de una planta en un mismo destino, para efecto del cálculo de capacidades (Fedepalma, 2007). Igualmente, para los trimestres del 2010 se calculan las capacidades sobre los valores agregados por zona obtenidos en el 2006 (Fedepalma, 2007) más un factor de crecimiento, con base en un promedio de variaciones del comportamiento de las capacidades del 2002 al 2006 para las regiones oriental (Cundinamarca y Meta) y central (Santander) (Fedepalma, 2007).
- Los terrenos disponibles para cultivo son las mismas áreas desérticas de los municipios seleccionados de acuerdo con el Plan de Acción Nacional del Ministerio de Ambiente.
- Como costos de transporte se han tomado los costos de la resolución 003175, de acuerdo con el diagnóstico del sector transporte del 2008 del Ministerio de Transporte, por lo cual se toman como costos dentro de los destinos de Cundinamarca y Santander, el costo mínimo registrado entre ciudades: 23,415, como costo de Bucaramanga a Bogotá: 71,006 y Bogotá-Villavicencio: 38,790.
- Se toman como costos de almacenamiento en el mayorista el 10% de los costos de refinación.
- La productividad para todos los terrenos es la misma, sin importar el grado de desertificación.
- No es conveniente almacenar el fruto, porque aumentaría el pH del fruto en el tiempo, alterando la calidad del aceite, por lo cual se requeriría materia prima adicional para nivelar el pH, redundando en el aumento de cultivos y/o costos (Sotolongo 2007).
- Las distancias calculadas están basadas en recorridos por vías principales y carreteras pavimentadas por motivos de seguridad, mantenimiento de vehículos, eficiencia en tiempos, de acuerdo con lo evidenciado en el capítulo siete del presente trabajo.

- Rendimiento del aceite al transformarse en biodiesel: por cada litro de aceite el 7,9% se convierte en glicerol, el restante en biodiesel, es decir un 92,1% por litro (814,55692 lt/ha) (Sotolongo 2007).

- Se cuenta con siete clientes definidos, los operadores de bus articulado del Sistema de Transporte masivo de Bogotá, ubicados en diferentes puntos de Bogotá:

- Usme
- Tunal
- Autopista Norte con 200
- Calle 80
- Av Suba con Cali
- Av Americas con Villavicencio
- Bosa

- Todos los tipos de vehículos manejan un rendimiento de combustible similar a los vehículos Daimler Chrysler de la flota de SI99. (flota de 168 vehículos como muestra de 1013 vehículos para el inicio de este trabajo, en febrero de 2009 se tiene un total de 1080 vehículos).

- Desde mayoristas a clientes se transportará el biodiesel a través de carrotanque, los cuales presentan una capacidad de 9900 galones, dado que este es el medio de transporte que utilizan actualmente Terpel y Exxonmobil en Bogotá.

- Desde los cultivadores hasta las plantas extractoras la semilla se transportará en camión (con una capacidad de 4,5 toneladas), porque las distancias entre estos eslabones ameritan para ello y el sistema de almacenamiento de las semillas lo permite.

- Desde la refinería hasta el mayorista se transportará el biodiesel a través de carrotanque. Actualmente Ecopetrol lo hace de esta manera y está evaluando la pertinencia técnica de hacerlo a través de poliductos de acuerdo con pruebas que están realizando en el Instituto Colombiano de Petróleo (ICP).

- En Cundinamarca existe una estación de bombeo de Ecopetrol para todos los distribuidores de combustible ubicada en Mansilla (Facatativá).
- En Cundinamarca, en Mansilla, existe una biorefinería llamada Biod.
- Las Capacidades de almacenamiento de los mayoristas son: 4000 barriles en biodiesel y 8000 barriles en diesel, cada barril contiene 42 galones.
- Se han corrido cuatro escenarios en el programa gams versión 20.7 en el que se varían los costos asignados a los valores obtenidos en el proceso jerárquico analítico AHP, de acuerdo con el desarrollo de homogenización de variables explicado más adelante.

6.3 Desarrollo Modelo matemático

6.3.1 Variables del modelo

- **Índices:**

Municipio: Representado con la letra i , tomando de $i1$ hasta $i50$ de acuerdo con la aplicación del AHP, señalados en la tabla 23 (Municipios seleccionados) presentada a continuación:

Tabla 23: Municipios seleccionados*

Municipio i	Nombre del Municipio
i1	Guaduas
i2	Cahipay
i3	Caparrapí
i4	San Juan de Río Seco
i5	Tocaima
i6	Jerusalén
i7	Utica
i8	Girardot
i9	Pulí
i10	Nilo
i11	La Peña
i12	Apulo
i13	Chaguaní
i14	Villeta
i15	Viotá
i16	Agua de Dios
i17	Beltrán
i18	Nimaima
i19	Quebradanegra
i20	Puerto Salgar
i21	Ricaurte
i22	Guataquí
i23	Nariño
i24	Anapoima
i25	Pandi
i26	Tibacuy
i27	Arbelaéz
i28	La Palma
i29	Nocaima
i30	Paime
i31	El colegio
i32	Quipile
i33	Sasaima
i34	Capitanejo
i35	Enciso
i36	Matanza
i37	Girón
i38	Pidecuesta
i39	Curití
i40	Jordán
i41	Villanueva
i42	Barichara
i43	Cabrera
i44	Onzaga
i45	Floridablanca
i46	Los Santos
i47	San Gil
i48	Galán
i49	Pinchote
i50	Cepita

Fuente: Proceso jerárquico analítico aplicado por el investigador

Plantas extractoras j: Tomando de j1 hasta j16 de acuerdo con anuario estadístico de Fedepalma en el 2007, ver tabla 24.

Tabla 24. Plantas extractoras

Planta j	Ubicación
j1	Paratebueno
j2	Bogotá
j3	Villavicencio
j4	Acacias
j5	Barranca de Upía
j6	Cabuyaro
j7	Cumaral
j8	Puerto Gaitán
j9	San Carlos de Guaroa
j10	San Martín Meta
j11	Bucaramanga
j12	Puerto Wilches
j13	Sabana de Torres
j14	San Vicente de Chucurí
j15	San Alberto
j16	San Martín Santander

Refinerías: Nombradas como k, tomando como k1 la refinería en Mansilla y k2 la refinería de Barrancabermeja.

Mayoristas: Denotados con la letra l, identificando con l1 a Terpel y como l2 a Exxon Exxonmobil.

Clientes: m de m1 a m7 en el orden de la tabla 25 Clientes, presentada a continuación. Se subdivieron en dos grupos MA primer grupo de clientes, el cual está conformados por m2, m3, m4, m5, m7 y el grupo de clientes MB, conformado por m1 y m6; esto porque el grupo de clientes MA trabaja con el mayorista l1 y el grupo de clientes MB con el proveedor l2.

Esta clasificación ajusta la cadena de suministro a las condiciones reales, diferenciando el mayorista responsable de cada grupo de clientes, de acuerdo con la realidad actual en el suministro de combustible para los buses articulados del Sistema de Transporte Masivo de Bogotá.

Tabla 25. Clientes

Cliente m	Nombre cliente
m1	Ciudad Móvil
m2	Exprés del Futuro
m3	Metrobus
m4	Sistema Integrado de Tte SI99
m5	Transmasivo
m6	Connexión Movil
m7	SI02

Fuente: Información tomada de SI99 S.A

Periodo: Nombrado como t que denota los trimestres (unidad en la que se calculó la demanda de los clientes), sobre los cuales se analizan las variables de decisión y van desde $t1$ hasta $t8$.

Grado de desertificación del área cultivable: Denotado como g , señala los estados desertificación alta, moderada y baja, nombrados como $g1$, $g2$ y $g3$ respectivamente.

- **Parámetros:**

dc_{ij} : Distancia del cultivo i a la planta extractora j

dp_{jk} : Distancia de la planta extractora j a la refinería k

dr_{kl} : Distancia de la refinería k al mayorista l

dm_{lm} : Distancia del mayorista l al cliente m

Cc_{ij} : Costos de transporte del cultivo i a la planta extractora j por unidad de carga

Ctp_{jk} : Costos de transporte de la planta extractora j a la refinería k por km

Ctr_{kl} : Costos de transporte de la refinería k al mayorista l por Km

Ctm_{lm} : Costos de transporte del mayorista l al cliente m por unidad de carga

Ca_l : Costos de almacenamiento en el centro del mayorista l por unidad de almacén

C_e : Costo de extracción por galón

C_r : Costos de refinación por galón

C_{sa} : Costo por hectárea asignado al grado de sustentabilidad ambiental del municipio del municipio i

C_{ce} : Costo asignado al grado de compatibilidad económica del municipio con el cultivo de *Jatropha* en el municipio i

C_{ca_i} : Costo por hectárea asignado al mayor o menor cumplimiento de las condiciones agroclimáticos por hectárea asignado al estado de la infraestructura vial del municipio i .

DMY_{lt} : Demanda del mayorista l en el trimestre t

D_{Mat} : Demanda del cliente m (2,3,4,5,7) en el período t

D_{MBt} : Demanda del cliente m (1,6) en el período t

CEP_{jt} : Capacidad de extracción de la planta j en el trimestre t (Ver cuadro control extractoras).

CPR_{kt} : Capacidad de procesamiento de la refinería k en el período t

CA_{lt} : Capacidad de almacenamiento del mayorista l en el período t

$CPCR$: Capacidad de transporte de los carrotanques de las refinerías y mayoristas

CPC : Capacidad camiones cultivadores

Ht_{igt} : Total hectáreas disponibles del municipio i con áreas desérticas del grado g en el período t .

- **Variables de decisión:**

X_{igt} : Ha del municipio i del grado g asignada a las plantas de extracción tipo j en el período t

Y_{jkt} : Cantidad de aceite a transportar de j a la biorefinería k en el período t

Q_{ijt} : Cantidad de kg de fruto a transportar del municipio i a la planta extractora j en el período t

ZA_{kit} : Cantidad de aceite procesado en biodiesel en K para transportar al mayorista l en el período t

ZBA_{lmt} : Cantidad de biodiesel a transportar del mayorista l al grupo de clientes ma en el periodo t

ZBB_{lmt} : Cantidad de biodiesel a transportar del mayorista l al grupo de clientes mb en el periodo t

Nma_{lmat} : Número de viajes desde el mayorista hasta los clientes del grupo A en el periodo t

Nmb_{lmbt} : Número de viajes para los clientes desde el mayorista hasta los clientes del grupo B en el período t

IN_{klt} : Inventario en el mayorista l para el periodo t

CS_{ijt} : Cosecha en el municipio i asignado del que se obtiene fruto para la planta j en el periodo t .

- **Constantes**

K_f : Kilogramos de frutos obtenidos por hectárea de cualquier grado de desertificación

R_{ac} : Rendimiento del aceite por cada 3,3 Kg de semilla se obtiene 1,086 lt de aceite, es decir 203,625 galones de aceite por Ha.

R_{bd} : Rendimiento del aceite al transformarse en biodiesel (por cada litro de aceite el 7,9 se convierte en glicerol, el restante en biodiesel) (92,1% por litro, 814,55692 lts/Ha o 0,0822727 galones por kilogramo) (Sotolongo 2007).

6.3.2 Función Objetivo

Minimizar costos de transporte, almacenamiento y asignación.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } F = & \sum_{\forall i} (Cca_i + Csa_i + Cce_i + Civ_i) \sum_{\forall g} \sum_{\forall j} \sum_{\forall t} X_{igjt} + \\
 & \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} \sum_{\forall t} Q_{ijt} (CC_{ij} \times dc_{ij}) + \sum_{\forall j} \sum_{\forall k} \sum_{\forall t} Y_{jkt} \times (d_{jk} \times CTP_{jk}) + \\
 & \forall k \forall l Z_{aklt} \times dr_{kl} \times CTR_{kl} + \forall l \forall m Z_{BAlmt} \times d_{mlm} \times CTM_{lm} + \\
 & \forall l \forall m \forall t Z_{BBlmt} \times (d_{mlm} \times CTM_{lm}) + \forall i \forall j \forall t Q_{ijt} \times CEP_j + \forall j \forall k \forall t Y_{jkt} \times Cr_k + \\
 & \forall l \forall t IN_{lt} \times CAM_l) + CPC * N_{cijt} + N_{pjkt} * CPCR + CPCR * N_{mlmat} + CPCR * \\
 & N_{mlmbt})
 \end{aligned}$$

6.3.3 Retricciones

Capacidad de la tierra:

$$\sum_{\forall j} x_{igjt} \leq Ht_{ig} - \sum_{t=t-2}^{t-1} \sum_{\forall j} x_{igjt} \quad \forall i, \forall g, \forall t$$

Ciclo de cosecha:

$$kf \sum_{\forall g} X_{igjt} = CS_{ijt+2} \forall i, \quad \forall t + 2$$

Equilibrio cultivos plantas extractoras:

$$\sum_{\forall j} CS_{ijt} = \sum_{\forall j} Q_{ijt} \quad \forall i, \forall t$$

Capacidad de las plantas:

$$\sum_{\forall i} Q_{ijt} \leq CEP_{jt} \quad \forall j, \forall t$$

Equilibrio planta refinera:

$$Rac \sum_{\forall i} Q_{ijt} = \sum_{\forall k} Y_{jkt} \quad \forall j, \forall t$$

Equilibrio aceite-biodiesel:

$$Rbd \sum_{\forall j} Y_{jkt} = \sum_{\forall l} ZA_{klt} \quad \forall k, \forall t$$

Capacidad camiones cultivadores:

$$Q_{ijt} \leq CPC * Nc_{ijt} \quad \forall i, \forall j, \forall t$$

Capacidad refineras:

$$\sum_{\forall j} Y_{jkt} \leq CPR_{kt} \quad \forall k, \forall t$$

Capacidad carrotanques extractora:

$$Y_{jkt} \leq Np_{jkt} * CPCR \quad \forall j, \forall k, \forall t$$

Equilibrio mayoristas:

$$IN_{lt-1} + \sum_{\forall k} ZA_{klt} = \sum_{\forall m} ZB_{lmt} + IN_{lt} \quad \forall l, \forall t$$

Capacidad de almacenamiento:

$$IN_{lt} \leq CA_{lt} \quad \forall l, \forall t$$

Capacidad carrotanque mayoristas:

$$ZBA_{lmat} \leq CPCR * Nm_{lmat} \quad \forall l, \forall ma, \forall t$$

$$ZBB_{lmbt} \leq CPCR * Nm_{lmbt} \quad \forall l, \forall mb, \forall t$$

Restricciones de demanda:

Grupo de Clientes Ma

$$\sum_{MA} ZB_{1MA}t = \sum_{MA} D_{MA}t \quad \forall t > 2$$

Grupo de Clientes Mb

$$\sum_{Mb} ZB_{2MB}t = \sum_{MB} D_{MB}t \quad \forall t > 2$$

6.3.4 Estructura de Costos

Se ha realizado una exploración de costos para cada uno de los eslabones de la cadena de suministro, tomando como base las fuentes disponibles sobre el procesamiento de la palma de aceite en las fases de extracción y refinación, por ser estos procesos idénticos para el caso de la *Jatropha curcas* y bajo la premisa que la infraestructura disponible para estas etapas productivas es conveniente para el procesamiento de biodiesel de *Jatropha* dadas las similitudes de sus etapas de producción. Para los costos de transporte se ha tomado como base la resolución 003175 de agosto de 2008 que ha calculado el valor del flete en pesos por tonelada por kilómetro en la ruta de referencia entre ciudades en Colombia.

El único eslabón omitido es el cultivo, dadas las variables técnicas que afectan este costo, como lo son el valor de la tierra, dependiendo su ubicación, el sistema de propagación y otras especificaciones técnicas del cultivo, ya que el presente trabajo no tiene como alcance el análisis de ese tipo de variables a contemplar en la etapa del cultivo. Ver costos en la tabla 26.

Tabla 26. Estructura de costos

Estructura de Costos				
Actividad	Especificación	Valor	Unidades	Fuente
*Extracción	Oriental	60	\$/tonelada	Anuario estadístico de Fedepalma del 2007
	Central	48	\$/tonelada	
	Occidental	59	\$/tonelada	
	Norte	55	\$/tonelada	
**Refinación		4243,28		Extracción calculada con base en la palma: El proceso de extracción es el mismo que para la Jatropha. (fuente confidencial).
	Flete al interior de C/marca	23,415	\$ por Tn por Km en la ruta de referencia	
***Transporte del cultivo a la planta de extracción	Flete Bogotá-Villavicencio	38,79	\$ por Tn por Km en la ruta de referencia	De acuerdo con la Resolución 003175 de agosto de 2008
	Bucaramanga-Bogotá (\$/tonelada*Km)	71,06	\$ por Tn por Km en la ruta de referencia	
Transporte de la refinera a la estación de bombeo		128,81	\$/galón	
Transporte del mayorista al cliente****		32	\$/galón	Terpel
Costo de Almacenamiento del Bd: Aproximadamente el 10% del costo de refinación		424,328	\$ por unidad de almacenamiento	Calculado como el 10% del costo de refinación

6.3.5 Análisis de capacidades

6.3.5.1 Plantas Extractoras

Para la zona oriental donde están ubicadas las plantas extractoras de Cundinamarca y Meta se tiene una capacidad instalada de 353 toneladas por hora (Fedepalma, 2007) y para la zona central, donde están ubicadas las plantas extractoras de Santander se tiene una capacidad de 249 toneladas por hora.

Para el cálculo de capacidades se ha tomado el dato obtenido de Fedepalma, el cual está agregado por zona y dividiéndolo por el número de plantas que tiene cada zona, multiplicándolo por el número de días hábiles para cada uno de los meses y por un turno de 8 horas, sobre este resultado que se da en toneladas se pasa a unidad de galones, unidad en la cual se encuentra la demanda. Posteriormente, se han sumado las capacidades mensuales obtenidas, agrupándolas por trimestre, ya que

es en esta misma unidad de tiempo como se ha calculado la demanda, dando lugar a la tabla 27. Capacidades plantas extractoras.

Tabla 27 Capacidades Plantas Extractoras

Planta extractora/Período	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8
j1	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j2	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j3	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j4	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j5	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j6	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j7	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j8	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j9	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j10	20897,6	20050,4	21462,4	20897,6	21873,072	20986,3259	22464,2361	21873,072
j11	24568	23572	25232	24568	26491,9729	25417,974	27207,9722	26491,9729
j12	24568	23572	25232	24568	26491,9729	25417,974	27207,9722	26491,9729
j13	24568	23572	25232	24568	26491,9729	25417,974	27207,9722	26491,9729
j14	24568	23572	25232	24568	26491,9729	25417,974	27207,9722	26491,9729
j15	24568	23572	25232	24568	26491,9729	25417,974	27207,9722	26491,9729
j16	24568	23572	25232	24568	26491,9729	25417,974	27207,9722	26491,9729

Fuente: Estándar de capacidad instalada en kilogramos de fruto por hora, por zona (Fedepalma, 2007) y procesadas por el investigador.

6.3.5.2 Refinerías

Para la planta de Barrancabermeja se tiene una capacidad de 100.000 toneladas por año (http://www.ecopetrol.com.co/especiales/CartaPetroleraDic06/rev_empresa.htm, consultado en el 2008) y en Mansilla se tiene una capacidad instalada de seis toneladas por hora. En el caso de la refinería de Barrancabermeja se divide la capacidad anual en el número de días hábiles del 2009, el valor obtenido se multiplica por el número de días hábiles por mes y posteriormente se pasa de toneladas a galones. Para el caso de la refinería en Mansilla se obtiene la información sobre tres turnos de ocho horas, trabajando los siete días de la semana. Por lo cual se realiza este cálculo por los días hábiles que corresponden a cada mes. Finalmente, para ambas refinerías se agrupan las capacidades por trimestre, obteniendo los resultados de la tabla 28.

Tabla 28 Capacidades Refinerías

Refinería/Período	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8
k1	2663136,96	2701190,51	2891405,84	2815316,21	2663136,96	2701181,77	2891405,84	2815316,21
k2	6627392,21	6358714,15	6806510,92	6627392,21	6627392,21	6358714,15	6806510,92	6627392,21

Fuente: Datos procesados por el investigador.

6.4. Homogenización de variables y presentación de escenarios:

De acuerdo con los resultados obtenidos en la aplicación del proceso jerárquico analítico AHP se crearon rangos para los criterios ambientales, de sustentabilidad ambiental, social y logístico, otorgando menor costo a los municipios con mayores valores obtenidos, puesto que el mayor valor logrado de la aplicación del AHP significa que el municipio evaluado es más atractivo para el proceso de selección, tomando el mínimo y máximo valor obtenido en el total de municipios verificados, se genera un límite mínimo y máximo que nos permite agrupar por clases los distintos resultados.

De acuerdo con el grado de cumplimiento, se atribuyen costos a los rangos de criterios, para poder elegir aquellos municipios que tengan mayor cumplimiento de los criterios evaluados para la minimización de impactos. Sobre estos resultados se presentan cuatro escenarios de costos, los cuales van aumentando de diez en diez respecto al primero, como lo podemos observar en la tabla 29:

Tabla 29: Categorías de análisis para la homogenización de variables

Rango/Criterio	Criterios				Costos Asignados por Escenario		
	<i>Criterios ambientales</i>	<i>Sustentabilidad ambiental</i>	<i>Sociales</i>	<i>Logísticos</i>	<i>Costo asignado según escenario 1</i>	<i>Costo asignado según escenario 2</i>	<i>Costo asignado según escenario 3</i>
Rango 1	0,139-0,107	0,207-0,134	0,071	0,097-0,093	10000	100000	10000000
Rango 2	0,053-0,040	0,119-0,069	0,038-0,036	0,038-0,033	20000	200000	20000000
Rango 3	0,025-0,020	0,063-0,030	0,021-0,030	0,032-0,022	30000	300000	30000000
Rango 4	0,017-0,009	0,023-0,003	0,014-0,007	0,021-0,013	50000	500000	50000000

Al dejar fija en los cuatro escenarios la parte de la función objetivo que determina los costos del transporte en función de las distancias y variar la parte que asigna los costos al cumplimiento de los municipios de acuerdo con las capacidades de los mismos para satisfacer en mayor o menor grado los macrocriterios diseñados y desarrollados en el proceso jerárquico analítico, se identifica de manera cuantitativa el impacto que el cumplimiento de los criterios genera sobre la función

objetivo del modelo matemático tomando como mínimo el 10% del precio de un kilogramo de semillas de *Jatropha*.

6.5 Análisis de Resultados

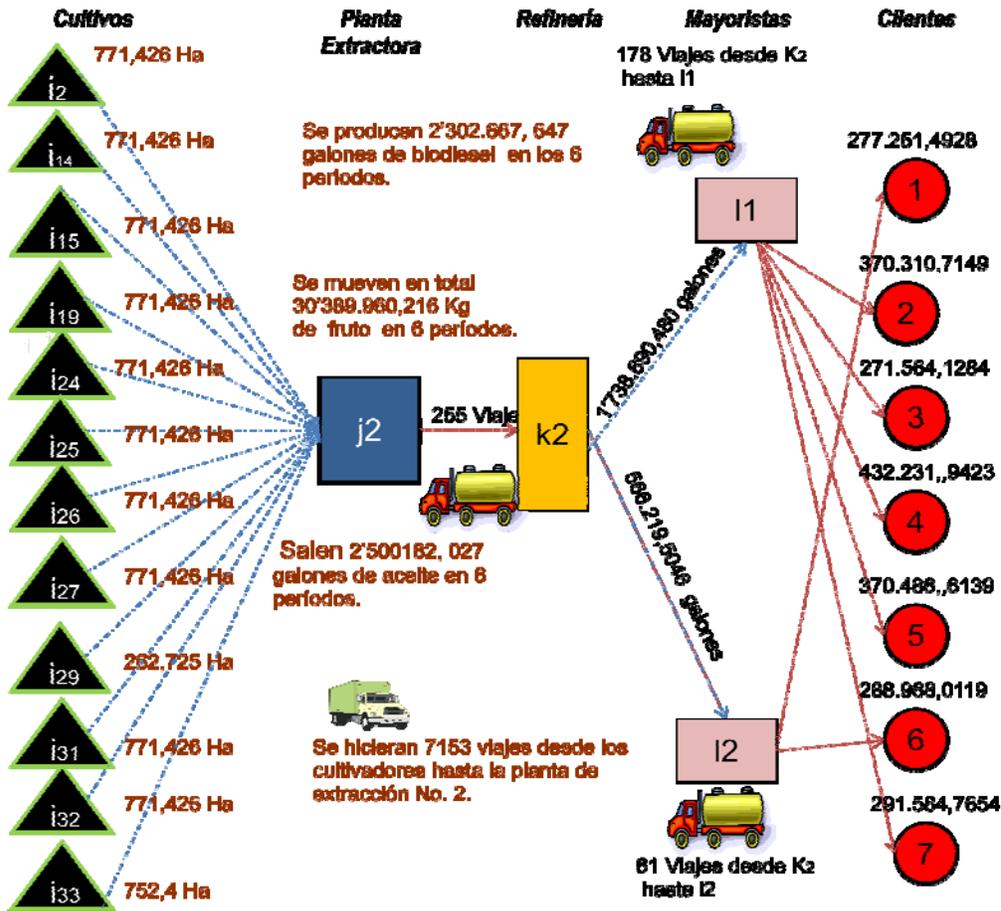
Se han ejecutado tres escenarios para el modelo en el software GAMS (solver CPLEX), variando en la función objetivo los costos asignados para minimizar los impactos ambientales, de sustentabilidad ambiental, social y logísticos de acuerdo con los resultados obtenidos en el AHP. Estos costos se han obtenido realizando una homogenización de variables, en las que el grado de cumplimiento jerarquizado obtenido del AHP se ha dividido en rangos, pasando estos niveles de cumplimiento a unidades monetarias de acuerdo con los rangos obtenidos, incrementando los costos de diez en diez en cada uno de los escenarios, tomando como valor mínimo el 10% de lo que cuesta un kilogramo de *Jatropha curcas*. Se ha validado la sensibilidad de la solución en términos de la minimización de estos impactos, dejando fijos en la función objetivo los costos atribuidos a la cadena productiva del sistema (Extracción, refinación, almacenamiento y transporte entre eslabones).

Escenario 1:

De acuerdo con el diseño de cadena de suministro realizado y teniendo en cuenta las características del diesel de *Jatropha* expuestas en los antecedentes, no es recomendable guardar fruto ni aceite, por lo cual la función de inventario diseñada contempla que el actor de la cadena que puede almacenar es el mayorista.

En la figura 27 se observa el comportamiento de las variables de decisión y el flujo de materiales entre los diferentes eslabones de la cadena de suministro en el escenario número uno.

Figura 27: Resultados en el abastecimiento de la demanda en el escenario 1



Es este el escenario que tiene los menores costos por minimización de impactos y en el cual se obtuvo la siguiente asignación:

Cultivadores, se obtuvieron doce municipios de Cundinamarca: Cachipay, Nocaima, Villeta, Viotá, Quebradanegra, Anapoima, Pandi, Tibacuy, Arbeláez, El Colegio, Quipile y Sasaima. Igualmente esta programación selecciona la planta extractora ubicada en Soacha y la refinería de Cundinamarca.

Se ha asignado en Pandi, Tibacuy, El Colegio, Quipile, Cachipay, Villeta, Viotá, Anapoima y Arbeláez la misma cantidad de hectáreas, haciendo un equilibrio entre los costos por distancias frente a los del AHP, estos nueve municipios estuvieron entre los diez con menor distancia respecto a la planta extractora y entre los seis mejores puntajes de la asignación del jerárquico

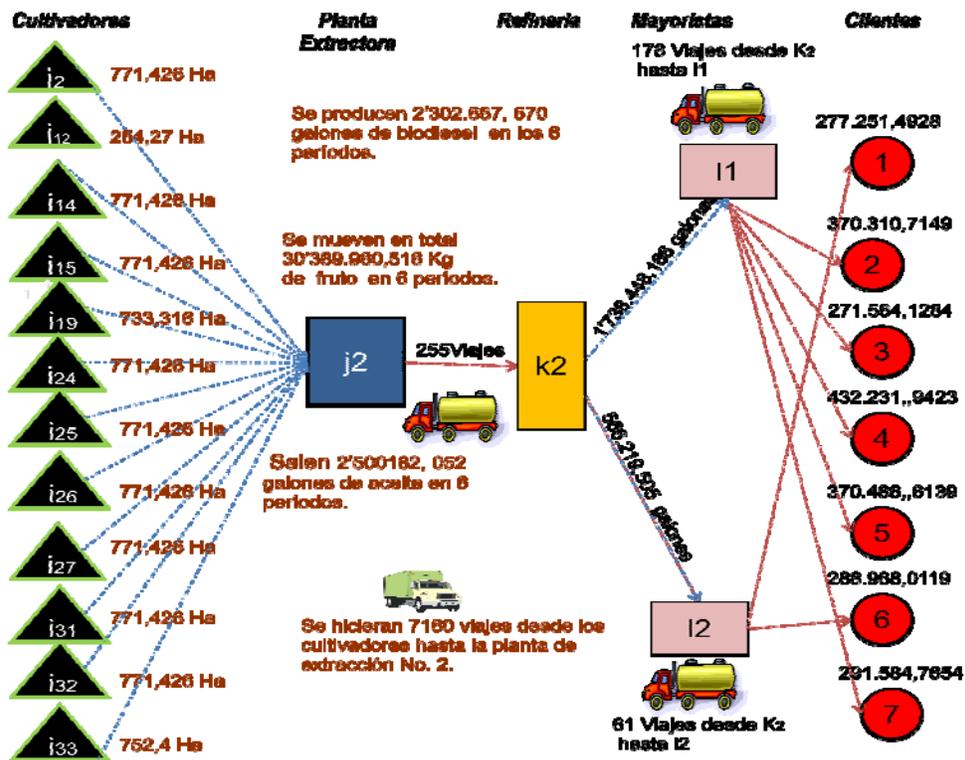
analítico. Los municipios con menor asignación de hectáreas fueron Quebradanegra y Nocaima, coincidiendo ambos con ser los de mayor distancia entre los doce seleccionados y los de mayores costos en la minimización de impactos entre el total.

En total el modelo asignó en total 8682,82 hectáreas, 30'389.960,216 Kilogramos de fruto, 2'500182, 027 galones de aceite y 2'302.667, 647 galones de biodiesel en seis períodos, después de t_2 (la *Jatropha* necesita 5 meses para la cosecha) satisfaciendo la demanda de la totalidad de clientes.

Segundo escenario

En este escenario se tienen costos intermedios en que los costos por minimización de impactos han sido incrementados en una proporción de diez sobre los costos del primer escenario, y se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 28: Resultados en el abastecimiento de la demanda en el escenario 2



El modelo ha seleccionado doce cultivadores, al igual que en el escenario uno, localizados en Cundinamarca: Cachipay, Apulo, Villeta, Viotá, Quebradanegra, Anapoima, Pandi, Tibacuy, Arbeláez, El Colegio, Quipile y Sasaima. Aquí al igual que en el primer escenario, el modelo selecciona la planta extractora ubicada en Soacha y la refinería de Cundinamarca.

Cambia Nocaima por Apulo, municipio que tiene costos asociados a los impactos evaluados a través del AHP más bajos, pero tiene una mayor distancia a la planta j_2 con respecto a Nocaima. Mostrando que, frente a unos mayores costos en la función objetivo por minimización de impactos, el modelo tiende a priorizar por costos de minimización de impactos sobre las distancias, sin embargo mantiene en un 91,6% la asignación de municipios del escenario uno en el que es evidente el equilibrio realizado entre los costos productivos y costos por minimización de impactos.

Se ha asignado en Pandi, Tibacuy, El Colegio, Quipile, Cachipay, Villeta, Viotá, Anapoima y Arbeláez la misma cantidad de hectáreas del escenario anterior. Los municipios con menor asignación de hectáreas fueron Quebradanegra y Apulo, en este caso Apulo es el municipio más lejano de j_2 , pero el de menores costos por minimización de impactos entre los doce asignados, buscando el modelo con la cantidad de hectáreas asignadas en los municipios equilibrar costos productivos y costos por minimización de impactos, asignando al municipio más lejano la menor cantidad de hectáreas, incluso una menor cantidad con respecto a la asignación más baja que hizo en el escenario uno, teniendo en cuenta que el municipio elegido esta vez tiene mayor distancia con respecto al más lejano del escenario anterior.

En total el modelo asignó en total 8682,82 hectáreas, 30'389.960,516 Kilogramos de fruto, 2'500.182, 052 galones de aceite y 2'302.667, 670 galones de biodiesel en seis períodos, satisfaciendo igualmente la totalidad de la demanda después de t_2 para todos los clientes.

Tercer escenario

Los costos de asignación por impactos en el cumplimiento de requisitos agroclimáticos, sustentabilidad ambiental, compatibilidad económica e infraestructura vial se aumentan en una

proporción de 100 veces sobre los costos del escenario número dos y 1000 sobre el escenario número u En esta corrida se obtuvo la siguiente asignación:

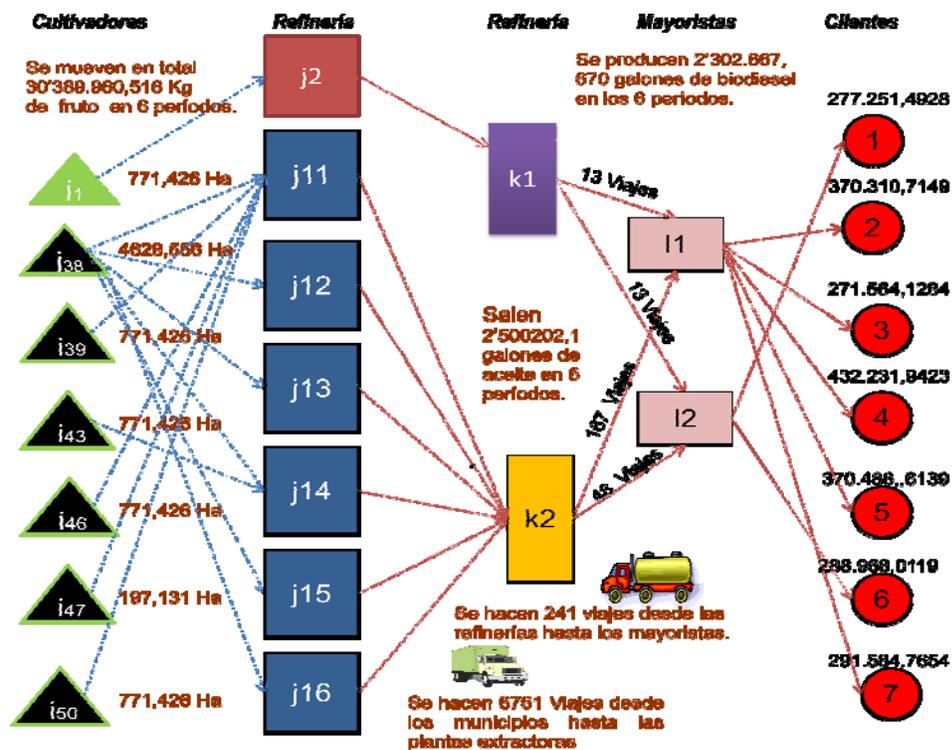
Cultivadores: Guaduas en Cundinamarca; Piedecuesta, Curití, Cabrera, Los Santos, San Gil y Cepitá en Santander. Activa siete plantas extractoras, para el intercambio de fruto con Guaduas tenemos a j_2 la planta de Soacha, para los municipios de Santander se activan las plantas de j_{11} a j_{16} ubicadas en Santander en los municipios de Bucaramanga, Puerto Wilches, Sabana de Torres, San Vicente de Chucurí, San Alberto y San Martín.

El municipio elegido en Cundinamarca i_2 es el de menores costos asignados por minimización de impactos del total de municipios evaluados en este departamento y el de la segunda menor distancia respecto a la planta de extracción j_2 . Todos los municipios de Santander intercambian fruto de *Jatropha* con la planta J_{11} excepto Cabrera, y éstos están dentro de los primeros nueve municipios más cercanos a esta planta. Igualmente los municipios seleccionados para intercambio con j_{12} hasta j_{16} están todos dentro de los cuatro primeros más cercanos a estas plantas. El modelo activa igualmente para el municipio de Cundinamarca la refinería localizada en Cundinamarca y para los plantas en Santander la refinería en Santander.

Los municipios elegidos en este escenario son los de menores costos por minimización de impactos de la selección realizada a través del AHP del total de 50 municipios elegidos por este método. El municipio con mayor asignación de hectáreas sobre los otros seleccionados es i_{38} que corresponde a Piedecuesta Santander el cual está en el primer lugar por menores costos de asignación y de los seis seleccionados es el que está más cerca de las plantas j_{11} , j_{12} , j_{13} , j_{15} y j_{16} , apenas el municipio i_{43} que corresponde a Cabrera mejora su distancia con respecto a la planta j_{14} .

En total el modelo mueve las mismas cantidades de fruto, aceite y biodiesel de los otros dos escenarios, pero hace un 6% de viajes más desde los municipios hasta las plantas extractoras y un 23% más, desde las refinerías hasta los mayoristas, este aumento es esperado ya que los mayoristas están ubicados en Cundinamarca. Podemos observar en detalle los resultados de este escenario en la figura 29.

Figura 29: Resultados en el abastecimiento de la demanda en el escenario 3



Finalmente, se presenta la figura 30 que representa el algoritmo utilizado en las corridas de escenarios del modelo de diseño de cadena de suministro. A través de la combinación de las tres técnicas de decisión multicriterio Delphi, AHP y programación matemática con el análisis de sensibilidad aplicado a los costos atribuidos por minimización de impactos frente a los costos productivos para la producción de biodiesel se obtienen los resultados presentados en los escenarios previos, abriendo la posibilidad de probar en la práctica con un diseño de estrategia de siembra las posibilidades reales del uso de la *Jatropha* para la producción de biodiesel que abastezca la demanda del sistema de transporte masivo de Bogotá.

Figura 30: Algoritmo para la ejecución de escenarios en el modelo de programación matemática



7. CONCLUSIONES E INVESTIGACION FUTURA

7.1 Conclusiones

- El biodiesel de *Jatropha curcas* se ha probado satisfactoriamente en vehículos en Reino Unido y la India, lo cual demuestra su viabilidad para el uso de este biocombustible en los móviles del STMB, presentando el cumplimiento de las normas de calidad de biocombustibles exigidas en Europa y en EUA.
- Sobre el análisis realizado de la demanda se concluye que el STMB tiene un comportamiento estacional, presentando disminuciones en los meses de abril, junio y de noviembre a diciembre, reducciones coincidentes con las épocas de vacaciones de los usuarios. Se elige como técnica de pronósticos la de proyección de temporada dentro de cinco alternativas evaluadas, debido a que esta técnica presentó la menor desviación en el error medio de porcentaje absoluto (3,76%). A través de la implantación de esta técnica se obtiene la demanda del sistema cliente para los años 2009 y 2010, información utilizada como insumo para la programación del modelo matemático de cadena de suministro desarrollado.
- Esta investigación aporta al conocimiento, al combinar el método Delphi y AHP como base para la generación y ponderación de criterios de localización de cultivos, ponderación que es utilizada en un modelo de programación matemática, que considera costos de transporte, capacidades de producción, procesamiento, almacenamiento y movilización. La novedad metodológica se genera al integrar la producción de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* en un sistema de transporte masivo, soportando la viabilidad económica del proyecto en la recuperación

de suelos desertificados, asegurando el cumplimiento de los requisitos ambientales fundamentales para el cultivo y la creación de empleo para la región, sin competir con la producción de alimentos, utilizando tres técnicas de toma de decisiones simultáneamente, que no presentan antecedentes en su combinación, para la construcción de un modelo multicriterio.

- A partir de la aplicación del Delphi y el AHP se tienen 33 municipios como potenciales productores de *Jatropha* curcas en Cundinamarca y 17 en Santander (Ver tabla 24 del capítulo 7), facilitando una priorización dentro de la selección que garantiza que estos municipios cumplen las condiciones climáticas mínimas necesarias para el cultivo, cuentan con la disponibilidad de tierras desertificadas como área para el cultivo, son compatibles con la actividad agrícola y tienen la infraestructura vial requerida para la movilización de las materias primas necesarias para la producción de biodiesel de *Jatropha* para abastecer la demanda del sistema de transporte masivo de Bogotá.

- El modelo cumple la demanda de los clientes para los períodos de tiempo satisfactoriamente, contemplando los dos trimestres requeridos para la cosecha.

- El modelo activó los eslabones en los tres escenarios realizados haciendo un equilibrio entre costos de asignación por disminución de impactos y distancias entre eslabones. En el primer escenario que se corre, en el cual los costos totales asignados por impactos ambientales, en sustentabilidad ambiental, sociales y logísticos son los menores respecto a los otros dos escenarios, el modelo activa 12 municipios de Cundinamarca y una de las plantas extractoras y la refinería de Cundinamarca. Cuando se incrementan los costos en una proporción de diez, cambia el municipio de Nocaima por el de Apulo el cual aunque tiene menores costos asignados por minimización de impactos tiene mayor distancia respecto al siguiente eslabón de la cadena de suministro (la planta extractora), predominando en la selección el menor costo por impactos frente a la distancia cuando aumentan los costos totales asignados para minimizar impactos. En el tercer escenario los costos aumentan con respecto al primer escenario en mil unidades monetarias y con respecto al segundo en cien, el modelo elige apenas siete municipios, uno en Cundinamarca y los seis restantes en Santander, escogiendo de Cundinamarca el municipio mejor

puntuado en el jerárquico analítico y seleccionado los seis mejores municipios de Santander en el AHP, es decir el modelo a mayores costos asignados por los impactos evaluados en el AHP selecciona los municipios en los que predominen los menores costos de impactos respecto a las menores distancias, porque el costo unitario por estos impactos es más alto respecto al costo por distancia. Cabe anotar que dentro del AHP estos seis municipios de Santander estuvieron mejor puntuados que la totalidad de Cundinamarca exceptuando el que el modelo seleccionó en Cundinamarca.

- Dentro del marco integrador Bogotá-Región se evidencia una alta potencialidad de desarrollar cultivos en Cundinamarca generando empleo, fortaleciendo la economía del departamento, con un cultivo alternativo para la producción de biodiesel, minimizando los impactos en la producción y dando un lugar a Cundinamarca como beneficiaria de la operación del Sistema de Transporte Masivo de Bogotá.

7.2 Investigación Futura

- A través de un sistema logístico como el presentado, podría desarrollarse el plan táctico para la puesta en marcha del proceso productivo para la producción de biodiesel de *Jatropha*, contemplando la estrategia de siembra de la *Jatropha* con las implicaciones que esto genera.
- Con un modelo como el desarrollado en esta investigación, se podrá abordar cualquier tipo de problema que requiera la toma de decisiones con múltiples criterios, enlazando la experiencia de las personas y el análisis objetivo de variables cualitativas y cuantitativas a través del uso articulado de las técnicas Delphi, AHP y la programación matemática. Sirviendo este modelo como base para análisis sobre el uso de nuevos biocombustibles en sistemas de transporte masivo o de otras características.
- Para el caso particular del suministro de biodiesel de *Jatropha* en el STMB se observa la posibilidad de adicionar nuevas variables de decisión tales como tenencia de la tierra, fenología

del cultivo, variedad de pisos climáticos entre otras que faciliten la implantación del sistema logístico aquí propuesto.

- Se abre la posibilidad de indagar mecanismos institucionales para enmarcar la aplicación de este sistema logístico como un Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), buscando la reducción de emisiones a través de la captura de CO₂ en la siembra y la disminución del mismo, generando nuevos beneficios en la implantación del biodiesel de *Jatropha* en el STMB.

Anexo 1

Aplicación de técnicas multicriterio integradas para la macrolocalización de cultivos de *Jatropha curcas* destinados a suplir la demanda de biodiesel en el sistema de transporte masivo de Bogotá

Febrero de 2009

Ing. Johanna Camargo Pérez

Ing. Industrial, C. Magíster* en Ingeniería de la Universidad de La Sabana. Coordinadora del Sistema de Gestión de SI99, SI02 & SI03 SA. Bogotá DC, Colombia.

M.Sc. Leonardo José González Rodríguez

Magíster en Ingeniería Industrial, Profesor. Facultad de Ingeniería. Universidad de La Sabana, Bogotá D.C, Colombia

Fernando Gutiérrez Fernández

C. Doctor* en Ing. Industrial Universidad Politécnica de Valencia. Profesor Maestría en Diseño y Gestión de Procesos, Universidad de La Sabana, Bogotá D.C Colombia.

RESUMEN

El presente artículo muestra la combinación de la técnica Delphi y de la herramienta proceso jerárquico analítico (AHP) para la construcción de un sistema multicriterio con el fin de lograr la selección de las mejores áreas para implementar cultivos de *Jatropha curcas* en Cundinamarca y Santander, maximizando los beneficios ambientales, sociales, y económicos, minimizando los requerimientos logísticos, en aras de suplir la demanda de biocombustible en el sistema de transporte masivo de Bogotá.

Palabras Clave: Biodiesel, Delphi, proceso jerárquico analítico (AHP), sistema de transporte masivo (STMB)

ABSTRACT

This paper present the combination of the Delphi technique and analytical hierarchic process (AHP) for the construction of a system multi-criterion with the purpose to select the best areas to implement cultivation of *Jatropha curcas* in Cundinamarca and Santander, maximizing the benefits environmental, social, and economic and diminishing the logistic requirements, for supply the demand of bio-fuel in the massive system of transport of Bogotá.

Key Words: Bio-fuel, *Jatropha*, Analytical Hierarchy Process (AHP), system of massive transport (STMB)

INTRODUCCIÓN

En el marco de la ley 939 de 2004 que estimula la producción y comercialización de biodiesel, existe en Colombia la necesidad de reemplazar el uso de los combustibles de origen fósil por biocombustibles, esto como parte de una estrategia mundial para reducir los efectos del calentamiento global, efectos que no han sido, ni son ajenos a nuestro país. La materia prima que predomina para la producción de biodiesel en Colombia es la palma africana, lo cual ha ocasionado un aumento significativo del área cultivada de dicha oleaginosa pasando de 185.165 hectáreas en el 2002 a 301.810 en el 2006 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2008) con tendencia al crecimiento en el 2007 y 2008, sin embargo, dentro de la producción de biocombustibles, se presenta la discusión alrededor de los efectos que pueda tener la producción de los mismos en el balance alimentario mundial, al generar escasez y por ende un incremento de precios de los productos clave para la elaboración de alimentos, en esta discusión se encuentra la palma, debido a que es materia prima fundamental para la elaboración de aceite de cocina, margarinas y mantecas (Observatorio Agrocadenas, 2008). Una alternativa para la producción de biocombustibles sin afectar el balance alimentario es la *Jatropha curcas* al ser una planta no comestible, que además tiene la potencialidad de recuperar los suelos, produciendo un aceite para diesel muy parecido al obtenido del petróleo (D.K. Garnayak, 2007).

En concordancia, el Sistema de Transporte Masivo de Bogotá (STMB) al ser pionero en Colombia en la participación de programas de excelencia ambiental en el ámbito del transporte y requiriendo cumplir con la legislación vigente en materia de biocombustibles busca suplir parte de su demanda mensual de combustible de alrededor de 1'200.000 galones en los buses articulados (Sistema Integrado de Transporte SI99 S.A, 2008), con la producción biodiesel a partir de la *Jatropha curcas*. Como parte de este propósito surge la propuesta de desarrollar una metodología para la selección de municipios para el desarrollo de cultivos, bajo la premisa de incrementar los beneficios ambientales, sociales, económicos, y minimizar de manera simultanea los requerimientos logísticos dentro del proceso.

1. REVISION DE ANTECEDENTES Y POTENCIALIDADES DE LA *JATROPHA*

Bajo las implicaciones ya enunciadas del cultivo de palma y como alternativa para la producción de biodiesel, emerge la *Jatropha curcas*, la cual busca complementar la producción de biodiesel en nuestro país, brindando las potencialidades enunciadas a continuación:

- La planta crece en suelos de poca fertilidad y degradados (D.K. Garnayak, 2007), además es resistente a la sequía (Cano-Asseleih, 1986; Cano-Asseleih et al., 1989), existiendo en Colombia zonas con suelos desertificados, áreas potenciales para este cultivo.
- Climáticamente, la *Jatropha curcas* L. se encuentra en climas tropicales y subtropicales (Hanny Johannes Berchmans, 2007).
- Se han encontrado experiencias de producciones razonables con pocos insumos para el cultivo: 3,3 Kg. de aceite producen 1,086 lt. de aceite (Sotolongo 2007), rendimientos sobre los cuales se pueden realizar cálculos para proyectar oferta. El aceite producido a partir de su semilla es semejante al diesel obtenido del petróleo. Su producción se estabiliza después del quinto año y su ciclo productivo es de aproximadamente 50 años (D.K. Garnayak, 2007). La semilla genera un contenido de aceite entre el 30 y 40 por ciento y de acuerdo con el peso del grano se puede extender del 45 al 55% (Lahane and Relwani 1986).
- El proceso de extracción del aceite es el mismo de la palma, extracción mecánica por prensa (Achten, 2007) y (Fedepalama, 2008, por lo que existen métodos (Hanny Johannes Berchmans, 2007) y maquinaria (Sotolongo, 2007). para extraer el aceite de la semilla de *Jatropha curcas*, avalados científicamente.
- Es una planta tóxica (Hirota 1998, Gandhi 1995), por lo tanto no es comestible, lo que favorece que su cultivo no aporte a la posible crisis alimentaria acentuada por la producción de biocombustibles. Los subproductos se pueden utilizar para la producción de fertilizantes, abonos jabones o para fines medicinales (Ashwani Kumar, 2008), así como para biogas y biofertilizante (Sotolongo, 2007).
- Pruebas de motor con el aceite de *Jatropha* fueron hechas en Tailandia, mostrando su funcionamiento satisfactorio (Takeda, 1982) (Ashwani Kumar, 2008).

Por todas estas consideraciones, se advierte la posibilidad de evaluar la implementación de cultivos de *Jatropha curcas* como el inicio de la cadena de suministro para suplir la demanda de biodiesel en el STMB, sin embargo, se advierte que, en el problema de localización de cultivos buscando satisfacer una demanda de biocombustible, son múltiples los factores a tener en cuenta, por lo que es necesario diseñar una herramienta que permita contemplar criterios de diversa índole que vayan más allá de la obtención de beneficios económicos, basados en la opinión de expertos y la aplicación de técnicas que facilitan la priorización de los criterios de selección de acuerdo con las necesidades sociales y organizacionales.

2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA MACRO-LOCALIZACIÓN DE CULTIVOS

Este artículo desarrolla dos partes esenciales para esta selección, inicialmente, partiendo de un análisis previo de la *Jatropha* como cultivo, de la infraestructura existente para la producción de biodiesel y de la estimación de la demanda de combustible del STMB, muestra la construcción del sistema de criterios utilizando el método Delphi combinado con el Focus Group y posteriormente integra estos resultados en el desarrollo de la técnica AHP la cual permite a través de juicios sustentados en la información disponible, obtener una selección y priorización de municipios viables para el cultivo de la *Jatropha* (Figura1).

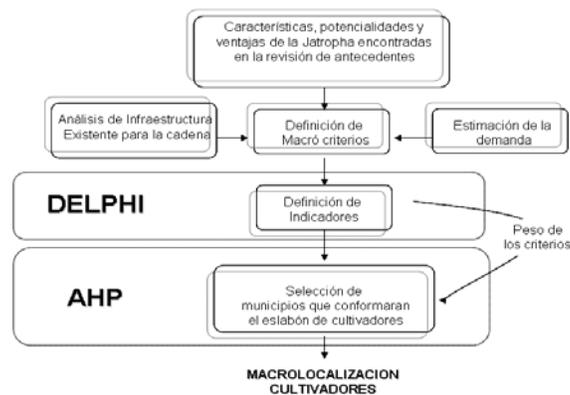


Figura 1. Propuesta metodológica para la macrolocalización de cultivos

2.1 Análisis de la demanda

Como criterio para la selección de la técnica de pronóstico más adecuada para estimar la demanda del combustible que será tomada como base para la macro localización de los cultivos, se utilizaron las medidas de error de predicción mas comunes en pronósticos, tales como la media del error de predicción, error medio de porcentaje absoluto, error de predicción medio al cuadrado y la desviación media absoluta. Posteriormente se sintetizaron los resultados en una tabla comparativa (Tabla 1) Para alimentar el modelo de pronostico se tomaron los datos de 2006, 2007 y hasta junio de 2008.

La técnica con mejor desempeño encontrada fue la de proyección de temporada (Figura 2), presentando mayor adecuación a la estacionalidad del consumo de combustible en el STMB.

Utilizando la técnica seleccionada se estimó una demanda aproximada de combustible para el STMB de 1'200.000 galones para el 2010, como consecuencia de esta demanda y de la legislación existente se

concluyó que la demanda de biodiesel para el mismo periodo será de 120.000 galones (10% del combustible suministrado deberá ser biodiesel).

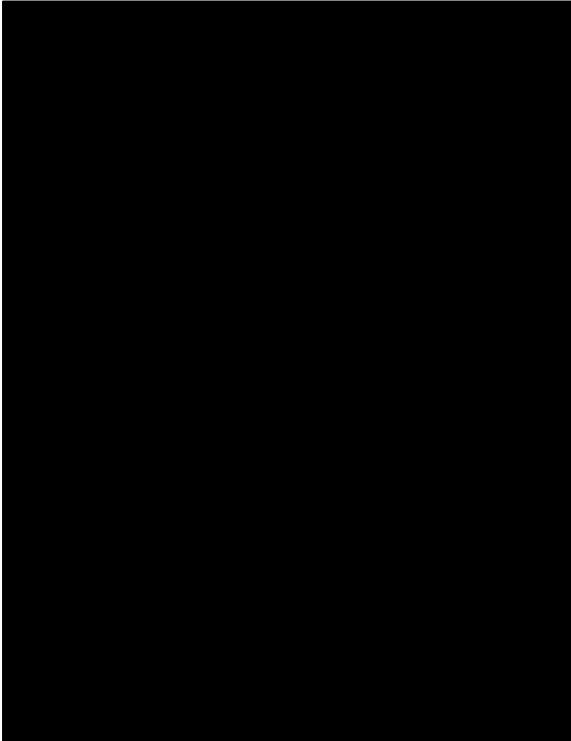


Tabla 1. Comparativo de técnicas de pronósticos de acuerdo con medidas asociadas al error de predicción para la demanda del Sistema Integrado de Transporte. (Elaborado a partir de información suministrada por SI99 S.A)

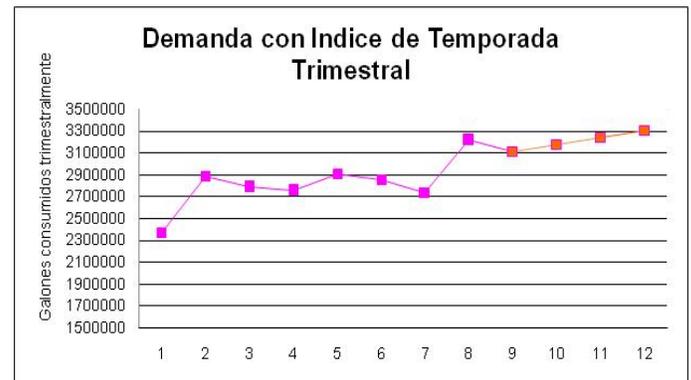


Figura 2. Pronostico de la demanda utilizando proyección de temporada (Elaborado a partir de información suministrada por SI99 S.A.)

2.2 Cadena de suministro del biodiesel a partir de *Jatropha*

Se inicia el proceso de localización para el cultivo de *Jatropha* curcas, para lo cual, se evaluaron los 116 municipios de Cundinamarca, la selección de Cundinamarca se dio por su cercanía al STMB y buscando que Cundinamarca sea beneficiaria a nivel social, ambiental y económico al ser proveedora de biodiesel para el STMB, ya que es este departamento, el que recibe los efectos de su operación; se evaluaron igualmente los 87 municipios disponibles en Santander, escogiendo este departamento por la solidez de la infraestructura con la que cuenta para la producción de biocombustibles, teniendo en Barrancabermeja una de las principales biorefinerías del país.

Dentro de la infraestructura analizada como potencial componente de la cadena de suministro del biodiesel a partir de *Jatropha*, se encuentran 25 plantas extractoras, 8 refinerías, la red de poliductos de Ecopetrol, dos grande mayoristas y 7 operadores del STMB (Figura 3).

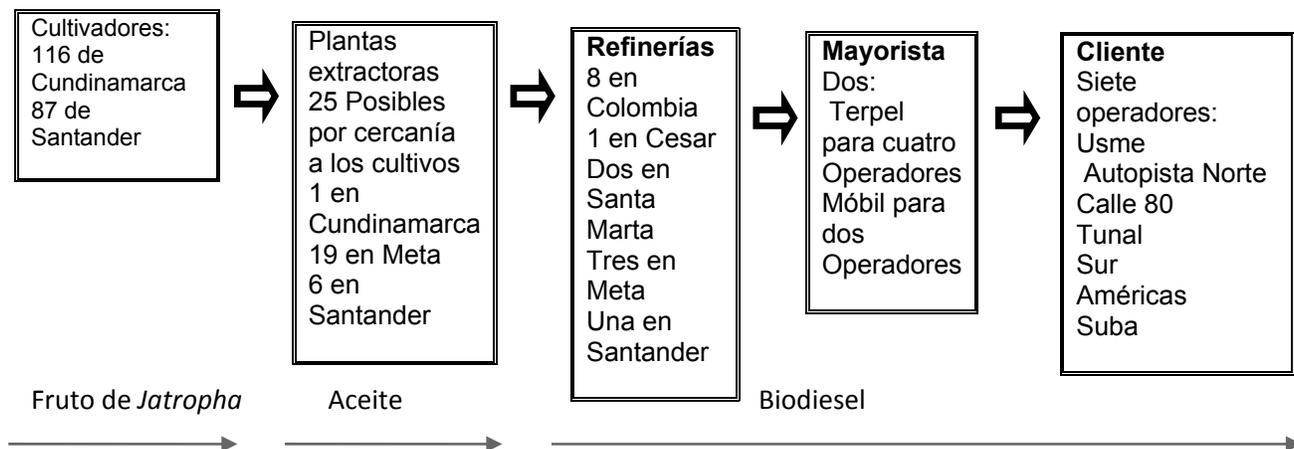


Figura 3. Elementos potenciales para el diseño de la cadena de de biodiésel a partir de *Jatropha*

2.3 Definición de Macro criterios y selección de indicadores utilizando el Método Delphi

Para la determinación de los indicadores a tener en cuenta para la selección de municipios, se aplicó el método Delphi, el cual es un método de estructuración de un proceso de comunicación grupal que es efectivo a la hora de permitir a un grupo de individuos, como un todo, tratar un problema complejo (Linstone, 1975), con el objetivo de seleccionar municipios potenciales para el cultivo de *Jatropha* se determinaron cuatro macrocriterios: Las condiciones agroclimáticas, la sustentabilidad ambiental del municipio evaluado, los impactos sociales y las ventajas logísticas del municipio. Dentro del primer macrocriterio se analizaron la altitud, precipitación anual y la temperatura, en el segundo se valoraron el porcentaje de conflicto de uso del suelo y el nivel de tierras desertificadas, en el tercero, la compatibilidad económica del municipio con el cultivo de *Jatropha* y el índice de desempleo y en el último macrocriterio se evaluaron el nivel de seguridad de las carreteras del municipio, el porcentaje de área disponible para el cultivo y el acceso a infraestructura vial.

Se aplicó el Delphi a través de un panel de expertos en las diferentes áreas temáticas, quienes respondieron cuestionarios metodológicos sobre la pertinencia de los temas elegidos como macrocriterios y los indicadores que cada uno contenía, estas hojas metodológicas incluyen: La denominación del criterio, definición, justificación e importancia del indicador, peso relativo del indicador dentro del sistema, periodicidad de actualización de la información, metodología de cálculo, fórmula de medida, observaciones e indicadores que sirvieron para su formulación; con las respuestas obtenidas individualmente, se realizó una discusión de grupo acerca de las diferencias presentadas, donde los expertos recomiendan abrir un macrocriterio institucional, ampliar el rango de altitudes

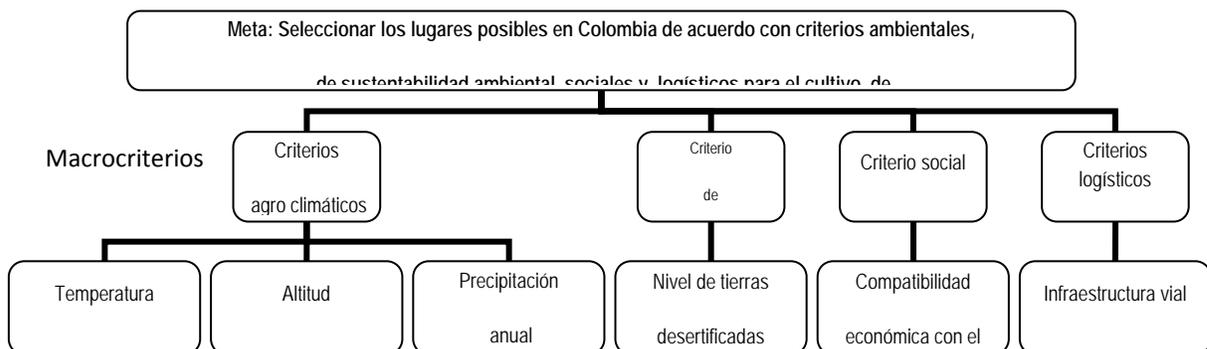
analizadas como adecuadas para el cultivo, definir con mayor especificidad el concepto de conflicto de uso de la tierra, no medir los indicadores por municipios sino por zonas agroecológicas, revisando la similitud de condiciones climáticas de diversos municipios. Esta aplicación permitió recoger las opiniones de expertos en las diferentes áreas respecto a la meta evaluada, brindando mayor objetividad a la construcción del sistema de indicadores que guió la selección de área de cultivo.

Sobre estas recomendaciones, continua la etapa de exploración de información de los municipios, en la cual, se descartan el indicador conflicto de uso de suelo, ya que este tipo de información se encuentra por regiones y no por municipios (Dane, 2008) y el macrocriterio institucional, ya que las condiciones ofrecidas por el Estado para financiación de un tipo de cultivo como éste son las mismas para cualquier municipio en Colombia (Ministerio de Agricultura de Colombia, 2008), por lo cual no genera este aspecto diferenciación entre los municipios. Complementariamente, se amplía el análisis respecto a las altitudes inicialmente evaluadas, pasando de un rango entre 0 y 500 a un intervalo entre 7 y 1600 metros sobre el nivel del mar como altitudes posibles para el cultivo (Heller, 1992), y se ratifica la decisión de medir los criterios por municipios y no por zonas agro ecológicas. Finalmente, en el macrocriterio logístico se encuentra que los municipios que cumplen con las condiciones agroclimáticas mínimas para el cultivo, no están catalogados como municipios peligrosos de acuerdo con las estadísticas de la Policía Nacional (Policía Nacional, 2007), por lo cual el nivel de seguridad tampoco es una variable distintiva.

2.4 Aplicación del Proceso Jerárquico Analítico (AHP)

El método AHP, desarrollado por Thomas Saaty consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico que básicamente contiene tres niveles: Meta, criterios e indicadores (o alternativas), el AHP “se trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión” (Thomas Saaty, 1998). Para el caso de estudio, el modelo jerárquico queda representado en la Figura 4.

Figura 4. Sistema de Indicadores para la macrolocalización



Los rangos de evaluación de los indicadores establecidos en cada macrocriterio previamente seleccionados por el panel de expertos, son obtenidos a través de la bibliografía existente, así:

Agro climáticos, constituyen el primer filtro y son de tipo excluyente, si un municipio no supera esta evaluación, no vale la pena seguir adelante con ese municipio como alternativa.

- Temperatura: Municipios con temperaturas entre 11 °C y 40°C (Heller, 1992)
- Altitud: Municipios que Cumplan con la condición de altitud entre 7 y 1600 metros sobre el nivel del mar. (Heller 1992).
- Precipitación anual: Municipios con un régimen de lluvias entre 250 y 3000 mm por año (Achten ,2007) con condiciones óptimas cuando se está entre 300 y 1000 mm. (Heller, 1996). Evaluado así:

Precipitación anual	300-1000 = 5	1000-2000 = 4	> 2000 = 3
---------------------	--------------	---------------	------------

Sustentabilidad ambiental, consistió en evaluar el nivel de tierras desertificadas en los municipios que cumplan las condiciones ambientales requeridas. (Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT, 2005), otorgando mayor ponderación a los municipios con mayor cantidad de tierra desértica disponible así:

Disponibilidad de tierras (Km ²)	0-20 = 1	21-50= 2	51-100=4	101-150= 5	151-200 = 6	201 – 300= 7	301-400=8	>400= 9
--	----------	----------	----------	------------	-------------	--------------	-----------	---------

Social, se identificó el nivel de calificación de los habitantes de los municipios evaluados con el cultivo de *Jatropha*, de acuerdo con la actividad económica del municipio, puntuado así:

Actividad económica	5 =Agrícola	3= Ganadero	1= Minero, turístico, otro
---------------------	-------------	-------------	----------------------------

Logístico, revisando el acceso a infraestructura vial, se tiene que cuando la vía presenta mejor infraestructura, tiene un puntaje mayor, así:

Carreteras:	5 =Principal	3=Vía secundaria	1=Carreteable o menos
-------------	--------------	------------------	-----------------------

La búsqueda de información de los 116 municipios de Cundinamarca y los 87 municipios de Santander en términos de cada uno de los criterios evaluados, se realizó a través del atlas climatológico de Colombia (IDEAM, 2005), mapas, atlas y rutas disponibles por el IGAC, el plan nacional de lucha contra la desertificación y la sequía del MAVDT de Colombia, a partir de esto se asignaron distintas calificaciones a cada municipio y se procesó la información en el software Expert Choice (Versión 11).

3. RESULTADOS

Como resultado del empleo de la metodología construida, se obtuvieron para Cundinamarca, 33 municipios viables para el cultivo (Ver figura 5), mostrando entonces una importante oportunidad de desarrollo potencial a nivel departamental para la producción de biodiesel a base de *Jatropha curcas*, teniendo en cuenta condiciones ambientales, sociales, económicas y logísticas de lo que sería suplir el mercado potencial de Biodiesel del STMB.

En el caso de Santander se lograron 17 municipios factibles para el cultivo de *Jatropha*, aunado a la ventaja de ser un departamento con 7 plantas extractoras de aceite y la biorefinería ubicada en Barrancabermeja, por lo cual este departamento presenta también, un alto potencial para la producción de biodiesel con el fin de abastecer la demanda del STMB (Figura 6).



Figura 5: Selección municipios en Cundinamarca

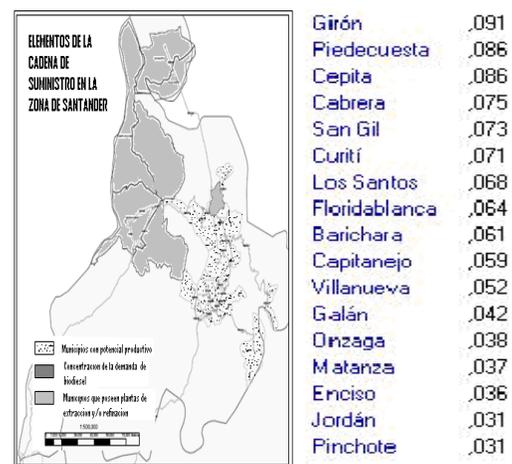


Figura 6: Selección municipios en Santander

El AHP mostró que los criterios logísticos son los de mayor peso dentro de la selección (0.443), seguidos de los criterios agroclimáticos (0.3), por ser éstos indispensables para un correcto desarrollo del cultivo, posteriormente tenemos al criterio asociado a la sustentabilidad ambiental (0.159) por la importancia que han dado los investigadores a la potencialidad de recuperación de suelos que tiene la *Jatropha* y por último tenemos el peso asignado al macrocriterio social (0.098) por ser consecuencia de los anteriores, logrando un índice de consistencia de 0,04.

4. CONCLUSIONES

Se encuentra que la aplicación del Delphi integrada a la técnica AHP permite brindar integridad a los criterios de selección en el proceso de macro localización del cultivo y minimizar el sesgo existente, que se produciría, si esta labor se dejará en manos un único decisor, obteniendo conclusiones objetivas y más precisas respecto a la priorización de las alternativas analizadas.

La metodología permitió seleccionar un conjunto de potenciales localizaciones para los cultivos de *Jatropha*, con un equilibrio entre criterios ambientales y logísticos, que redundaran en beneficios sociales, generando información de entrada para el diseño y modelación de una cadena de suministro eficiente para suplir la demanda de biodiesel del STMB a partir de *Jatropha*.

La metodología empleada, permite que se inicie el desarrollo un proyecto de movilidad sostenible, basado en la minimizando de impactos desde la selección de las áreas a cultivar, potencializando la recuperación de suelos y la generación de empleos necesarios tanto para cultivar, como para cumplir con las demás etapas previstas en una cadena de suministro, buscando suplir la demanda de biodiesel en el sistema de transporte masivo más importante de Colombia y ejemplo en su tipo a nivel mundial.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Plan de acción Nacional, Bogotá, Colombia, Septiembre de 2005.

[2] Departamento de Planeación Nacional. *Documento Conpes 3510*. Bogotá, Colombia, 2008

[3] FEDEPALMA. *Anuario Estadístico 2002 – 2006. La agroindustria de la Palma de aceite en Colombia y en el mundo*. Bogotá, Colombia, 2007.

[4] <http://www.agrocadenas.gov.co/García>, La Industria de Aceites y Grasas en Colombia, consultado en septiembre de 2008

[5] Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), El estado de la Seguridad Alimentaria en el Mundo, 2006, en <http://www.fao.org/docrep/009/a0750s/a0750s00.htm>, consultado en septiembre de 2008.

[6] Linstone, H., Turoff, M.: « The Delphi Method. Techniques and Applications », Addison-Wesley, 1975, p.3

[7] Mogollón, Ruth Maritza, proceso analítico jerárquico y su aplicación para determinar los usos de las tierras, caso Brasil, proyecto regional "información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible", 2000.

[8] D.K. Garnayak, R.C. Pradhan, S.N. Naikand N. Bhatnagar, Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.), pàg 123 y 124, octubre de 2007

[9] Hanny Johanes Berchmans, Shizuko Hirata, [Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids](#), Bioresource technology. [New York, NY]: Elsevier Ltd., v. 99, 6, pág 1716, abril de 2008.

[10] Heller, Joachim, Physic nut. *Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 1. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/ International Plant Genetic Resources Institute, 1996, Rome.

[11] Ashwani Kumar, Satyawati Sharma, [An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses \(*Jatropha curcas* L.\): A review](#), *Industrial Crops and Products*, Volume 28, Issue 1, July 2008, Pages 1-10

[12] Sotolongo Pérez, José A., Evaluación de las fuentes de energía, sus potencialidades y principales impactos medioambientales en la provincia de Guantánamo, Tecnología Química, volumen XXVII, páginas 76-82

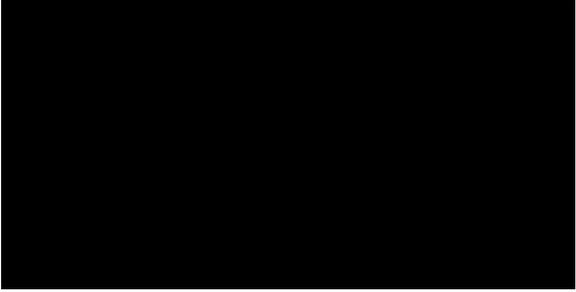
[13] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Atlas de Colombia quinta edición en versión CD Room 1 y 2, Capítulos I, II, III, IV y V, 2001

Anexo 2 Hojas metodológicas

IA1. Municipios que cumplan con la condición de altitud esperada para el cultivo de *Jatropha curcas* Piñon

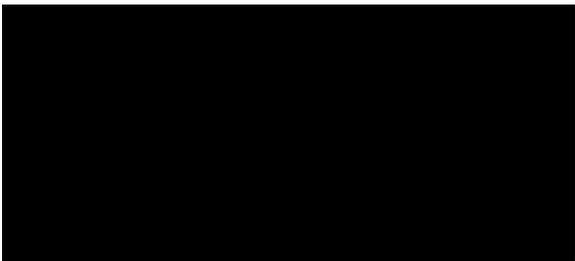
1. Denominación.	*Municipios (Ver nota MAE) que Cumplan con la condición de altitud entre 7 y 1600 metros sobre el nivel del mar. (Heller 1992)	
2. Definición.	<p>La <i>Jatropha curcas</i> es una planta tóxica, de la cual se puede extraer biodiesel, su carácter tóxico hace que la producción de biodiesel no riña con la carestía de los precios de los alimentos, que aparentemente ha generado el aumento de cultivos predestinados para elaborar biodiesel, teniendo, además la cualidad de recuperar suelos¹, por lo cual presenta un alto potencial como materia prima del diesel.</p> <p>Para el diseño de un sistema logístico para suplir la demanda de biodiesel en el sistema de transporte masivo con la <i>Jatropha curcas</i> como materia prima, se requiere definir la posible localización de las plantas productivas, para lo cual las condiciones ambientales del cultivo son una entrada fundamental, siendo la altitud una de estas. (Aclarando que no es el único criterio analizado, se agrupan las tres condiciones claves en el criterio Condiciones ambientales requeridas CAR).</p>	
3. Justificación e importancia del indicador:	De no cumplirse la altitud en la zona identificada, no se dará el cultivo adecuadamente, por lo cual esta condición más otras de tipo ambiental, determina una posible localización dentro del proyecto.	
4. Tema al que pertenece	Condiciones ambientales de cultivo.	
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 40%	Indicador 33%
6. Periodicidad de actualización.	Se hace una vez.	
7. Metodología de cálculo.	De acuerdo a las características ambientales de las regiones colombianas, se seleccionan los municipios que cumplan con la condición de altitud esperada.	

¹ D.K. Garnayak, R.C. Pradhan, S.N. Naikand N. Bhatnagar, Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.) ,2008

8. Formula de medida.	 <p>*Dentro del municipio se analizará si se encuentran condiciones ambientales diferentes, (zonas agroecológicas homogéneas, Tapia E. Mario) y se analizaran cada una de ellas por separado.</p>	
9. Observaciones.	<p>Altitud: Altura con relación al nivel del mar.²</p> <p>A través de las fuentes de información sobre las condiciones ambientales de regiones, ciudades y municipios, disponibles en Colombia tales como el IDEAM, IGACC, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural entre otras, se aplicará el cuestionario definido en la metodología de cálculo para las zonas evaluadas.</p>	
10. Indicadores que sirvieron para su formulación	Origen	Indicador

² García Pelayo Ramón, Diccionario Larousse , 1979

IA2. Municipios que cumplan con el rango de temperatura esperado para el cultivo de *Jatropha curcas* Piñon

1. Denominación.	*Municipios con temperaturas mayores entre 11 grados y menores a 40 grados centígrados.										
2. Definición.	Identifica los municipios colombianos que se encuentren en el rango de temperatura esperado.										
3. Justificación e importancia del indicador:	La temperatura ambiental es una condición relevante para que se de un cultivo, de las zonas viables de cultivo podrán obtenerse las posibles localizaciones de las plantas productivas para el diseño del sistema logístico para un sistema de transporte masivo.										
4. Tema al que pertenece	Condiciones ambientales de cultivo.										
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 40%	Indicador 33%									
6. Periodicidad de actualización.	Se hace una vez.										
7. Metodología de cálculo.	Evaluar los municipios seleccionados, en cuanto al límite mínimo y máximo de temperatura identificando aquellas que se encuentren dentro del rango esperado.										
8. Formula de medida.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>El municipio cumple con las siguientes características:</th> <th>SI</th> <th>NO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>¿La temperatura es mayor a 11 grados centígrados?</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>La temperatura es menor a 40 grados centígrados?</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>  <p>*Se analizará si un mismo municipio tiene condiciones ambientales distintas, o si una agrupación de municipios comparten condiciones ambientales similares dentro de la macro localización (zonas agroecológicas homogéneas)</p>		El municipio cumple con las siguientes características:	SI	NO	¿La temperatura es mayor a 11 grados centígrados?	1	0	La temperatura es menor a 40 grados centígrados?	1	0
El municipio cumple con las siguientes características:	SI	NO									
¿La temperatura es mayor a 11 grados centígrados?	1	0									
La temperatura es menor a 40 grados centígrados?	1	0									
9. Observaciones.	A través de las fuentes de información sobre las condiciones ambientales de regiones, ciudades y municipios, disponibles en Colombia tales como el IDEAM, IGACC, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural entre otras, se aplicará el cuestionario definido en la metodología de cálculo para las zonas evaluadas.										
10. Indicadores que sirvieron para su formulación	Origen	Indicador									

IA3. Municipios con rango de régimen de lluvias esperado.

1. Denominación.	*Municipios con un régimen de lluvias entre 200 y 2000 mm por año (Heller, 1992) con condiciones óptimas cuando se está entre 300 y 1000 mm. (Heller, 1996)										
2. Definición.	Identificación de zonas que cumplan con el régimen de lluvias esperado.										
3. Justificación e importancia del indicador:	<p>La ONU se encuentra revisando en las conferencias de Alto Nivel sobre seguridad alimentaria (3 y 5 de junio de 2008), el impacto de la producción de biocombustibles en el aumento de los precios de los alimentos, dentro de esta problemática mundial, aparece la <i>Jatropha curcas</i> L. como una alternativa para la producción de biodiesel en Colombia, un país en vía de desarrollo que sin embargo está iniciando con la producción de biocarburantes, planta que no es comestible y presenta potencialidades en la recuperación de suelos. (D.K. Garnayak, R.C. Pradhan, S.N. Naikand N. Bhatnagar, Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (<i>Jatropha curcas</i> L.), 2008)</p> <p>El régimen de lluvias es una condición climática fundamental para asegurar los recursos hídricos del cultivo de <i>Jatropha curcas</i>, por lo cual se requiere verificar esta condición como una variable de tipo excluyente para la inclusión de una zona dentro de la etapa de macro localización para el análisis logístico dirigido a suplir una demanda de diesel en un sistema de transporte masivo.</p>										
4. Tema al que pertenece	Condiciones ambientales de cultivo.										
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 40%	Indicador 33%									
6. Periodicidad de actualización.	Una vez.										
7. Metodología de cálculo.	<table border="1" data-bbox="561 1245 1292 1392"> <thead> <tr> <th data-bbox="561 1245 1166 1276">El municipio cumple con las siguientes características:</th> <th data-bbox="1172 1245 1230 1276">SI</th> <th data-bbox="1237 1245 1292 1276">NO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="561 1276 1166 1335">¿El régimen de lluvias mínimo es de 250 mm y máximo de 1200 mm por año?</td> <td data-bbox="1172 1276 1230 1335">1</td> <td data-bbox="1237 1276 1292 1335">0</td> </tr> <tr> <td data-bbox="561 1335 1166 1392">¿Presenta un intervalo más constante entre 300 y 1000 mm dentro de su régimen de lluvias al año?</td> <td data-bbox="1172 1335 1230 1392">1</td> <td data-bbox="1237 1335 1292 1392">0</td> </tr> </tbody> </table>		El municipio cumple con las siguientes características:	SI	NO	¿El régimen de lluvias mínimo es de 250 mm y máximo de 1200 mm por año?	1	0	¿Presenta un intervalo más constante entre 300 y 1000 mm dentro de su régimen de lluvias al año?	1	0
El municipio cumple con las siguientes características:	SI	NO									
¿El régimen de lluvias mínimo es de 250 mm y máximo de 1200 mm por año?	1	0									
¿Presenta un intervalo más constante entre 300 y 1000 mm dentro de su régimen de lluvias al año?	1	0									

<p>8. Formula de medida.</p>	<p>CC=Número de respuestas afirmativas / número de preguntas totales (2) CC= Calificación cuestionario</p> <p>MRE= $\bar{X} (\Sigma (CC))$ *MRE= Municipios con régimen de lluvias esperado.</p>  <p>*Se analizará si un mismo municipio tiene condiciones ambientales distintas, o si una agrupación de municipios comparten condiciones ambientales similares dentro de la macro localización (zonas agroecológicas homogéneas)</p>	
<p>9. Observaciones.</p>	<p>A través de las fuentes de información sobre las condiciones ambientales de regiones, ciudades y municipios, disponibles en Colombia tales como el IDEAM, IGACC, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural entre otras, se aplicará el cuestionario definido en la metodología de cálculo para las zonas evaluadas.</p> <p>El régimen de lluvias de una región es la fuente de información para garantizar a lo largo de un período la subsistencia del cultivo, dado que en el caso de ser necesario un sistema de riego para el mismo, el municipio evaluado debe garantizar la cantidad de agua disponible durante la cantidad de tiempo necesario para garantizar los frutos. En este indicador se evalúa también si el municipio además de cumplir con el rango de régimen de lluvias, está dentro del intervalo que ofrece mejores resultados en el cultivo³ con el objeto de dar mayor peso a los municipios que además de estar dentro del rango general, tengan mayor acercamiento al promedio óptimo esperado (entre 300 y 1000 mm).</p>	
<p>10. Indicadores que sirvieron para su formulación</p>	<p>Origen</p>	<p>Indicador</p>

³ Honduras Rubén Dario, perfil de mercado Diesel de Jatropha, 2007

ISA1. Tierras con conflicto de uso en las regiones de los municipios evaluados.

. Denominación.	Porcentaje de tierras en conflicto en los municipios que cumplan las condiciones ambientales requeridas.	
2. Definición.	Este indicador señala los conflictos entre la oferta ambiental, su vocación de uso y las demandas que configuran el actual patrón de ocupación en las regiones Colombianas. ⁴ Lo cual se concreta en dos aspectos específicos: Subutilización de suelos con vocación agrícola y uso incorrecto del mismo de acuerdo con su vocación y en el que el cultivo de <i>Jatropha</i> curcas sea una opción de mejora para su uso.	
3. Justificación e importancia del indicador:	De acuerdo con la potencialidad de terrenos cultivables en las regiones de los municipios a evaluar, contando con la previa validación de cumplimiento de las condiciones ambientales y dada la cualidad de la <i>Jatropha</i> curcas de recuperar suelos, se busca valorar el nivel de conflicto de uso de los suelos en los municipios, para otorgar un mayor peso a las regiones donde sea más alto el nivel de conflicto de uso de los suelos (ver definición) y a través de esta información, brindar a la comunidad rural, un impacto positivo al presentarse la opción de recuperar aquellos suelos de vocación agrícola que están subutilizados o estén siendo utilizados de manera incorrecta.	
4. Tema al que pertenece	Sustentabilidad Ambiental	
5. Peso relativo dentro del sistema	Tema 20%	Indicador 50%
6. Periodicidad de actualización.	Cada cinco años.	
7. Metodología de cálculo.	Registrar el nivel de conflicto de tierras con vocación agrícola, de acuerdo con la proporción de suelo en conflicto sobre el total del área del municipio, ya sea porque no se está utilizando de acuerdo a su vocación y/o porque se está subutilizando o utilizando con mayor intensidad a lo adecuado para el tipo de suelo.	

⁴ Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA, Estudio de conflicto del uso de los Suelos en Colombia, Marco General capítulo I , 2001.

8. Formula de medida.	<table border="1" data-bbox="565 210 1323 445"> <thead> <tr> <th data-bbox="565 210 1117 268">La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:</th> <th data-bbox="1117 210 1182 268">SI</th> <th data-bbox="1182 210 1255 268">NO</th> <th data-bbox="1255 210 1323 268">Peso</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="565 268 1117 327">¿La región tiene un nivel alto de tierras en conflicto de uso (mayor al 20% del total)?</td> <td data-bbox="1117 268 1182 327">1</td> <td data-bbox="1182 268 1255 327">0</td> <td data-bbox="1255 268 1323 327">5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="565 327 1117 386">¿La región tiene un nivel medio de tierras en conflicto? (entre el 10 y el 19% del total)</td> <td data-bbox="1117 327 1182 386">1</td> <td data-bbox="1182 327 1255 386">0</td> <td data-bbox="1255 327 1323 386">3</td> </tr> <tr> <td data-bbox="565 386 1117 445">¿La región tiene un nivel bajo de tierras en conflicto? (Menor al 10%)</td> <td data-bbox="1117 386 1182 445">1</td> <td data-bbox="1182 386 1255 445">0</td> <td data-bbox="1255 386 1323 445">1</td> </tr> </tbody> </table> <p data-bbox="565 445 1091 474">NCT= (Respuestas afirmativa *Peso criterio/5)*100</p> <p data-bbox="565 474 912 504">NCT= Nivel de conflicto de tierras</p> $ \%TEC = \frac{\text{Superficie de suelo en conflicto de uso (en hectáreas o Km2)}}{\text{Superficie total del área cultivable del municipio (en hectáreas o Km2)}} \times 100 $ <p data-bbox="565 646 860 676">TEC= % Tierras en Conflicto</p>			La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso	¿La región tiene un nivel alto de tierras en conflicto de uso (mayor al 20% del total)?	1	0	5	¿La región tiene un nivel medio de tierras en conflicto? (entre el 10 y el 19% del total)	1	0	3	¿La región tiene un nivel bajo de tierras en conflicto? (Menor al 10%)	1	0	1
La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso																
¿La región tiene un nivel alto de tierras en conflicto de uso (mayor al 20% del total)?	1	0	5																
¿La región tiene un nivel medio de tierras en conflicto? (entre el 10 y el 19% del total)	1	0	3																
¿La región tiene un nivel bajo de tierras en conflicto? (Menor al 10%)	1	0	1																
9. Observaciones.	<p data-bbox="565 730 1331 1024">Como fuente de información para el cálculo tenemos el estudio de conflicto de suelos del Agustín Codazzi con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, a través del análisis de este documento se podrán identificar las regiones potenciales para la evaluación de municipios, estudio que nos señala la vocación de suelos por región y el uso principal asignado, combinando este criterio junto con la cercanía de la región al sistema cliente, podremos iniciar la selección de municipios a evaluar. Adicionalmente, a mayor nivel de tierras en conflicto de uso, mayor potencialidad para la localización del cultivo dentro del sistema.</p>																		
10. Indicadores que sirvieron para su formulación	Origen	Indicador																	
	IDEAM Colombia	Tierras afectadas por la desertificación.																	
	Estudio de conflicto del uso de los Suelos en Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2001	Extensión de los diferentes paisajes en Colombia.																	

ISA2. Tierras desertificadas en los municipios evaluados.

1. Denominación.	Evaluación del nivel de tierras desertificadas en los municipios que cumplan las condiciones ambientales requeridas.	
2. Definición.	Medir el nivel de tierras desertificadas en los municipios evaluados	
3. Justificación e importancia del indicador:	Este indicador nos permite dar mayor peso a aquellos municipios en los que previa validación del cumplimiento de las condiciones ambientales, se identifica una mayor necesidad de recuperación de suelos ⁵ , con el fin de lograr un mayor impacto social en las regiones potenciales para el cultivo de la <i>Jatropha curcas</i> , dando a la comunidad de interés, la opción de recuperar terrenos no cultivables con sus implicaciones ambientales. Se define como desertificación la reducción o pérdida de la productividad biológica o económica del sistema bioproductivo terrestre compuesto por el suelo, la vegetación, otros componentes de la biota y los procesos hidrológicos y ecológicos, especialmente en los ecosistemas de las zonas secas, debido a los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y factores climáticos. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005)	
4. Tema al que pertenece	Sustentabilidad ambiental.	
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 20%	Indicador 50%
6. Periodicidad de actualización.	Cada 5 años.	
7. Metodología de cálculo.	Previa validación del cumplimiento de las condiciones ambientales requeridas para el cultivo, evaluar el nivel de tierras desertificadas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005) como potenciales áreas de cultivo, otorgando un mayor peso de acuerdo a la fórmula de medida propuesta.	

⁵D.K. Garnayak, R.C. Pradhan, S.N. Naikand N. Bhatnagar, Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.), 2008

8. Formula de medida.	La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:			SI	NO	Peso
	¿La región tiene un nivel alto de tierras desertificadas (mayor al 20% del total)? ¿Predomina en la desertificación cual de los siguientes niveles?	1	0	5		
	¿La región tiene un nivel medio de tierras desertificadas? (entre el 10 y el 19% del total)?	1	0	3		
	¿La región tiene un nivel bajo de tierras desertificadas? (Menor al 10%)	1	0	1		
<p>ND= (Respuesta afirmativa*%de tierra desertifica *Peso criterio) / 5) ND= Nivel de desertificación</p> $\%TD = \frac{\text{Superficie de suelo desertificado (en hectáreas o Km2)}}{\text{Superficie total del área cultivable del municipio (en hectáreas o Km2)}} \times 100$ <p>%TD= % Tierras desertificadas.</p>						
9. Observaciones.	A mayor valor obtenido en el % de tierras desertificadas mayor potencialidad en la selección del municipio dentro del estudio de macro localización. Aclarando que las respuestas son mutuamente excluyentes, no pudiendo una zona evaluada tener más de una respuesta afirmativa.					
10. Indicadores que sirvieron para su formulación	Origen	Indicador				
	IDEAM Colombia	Tierras afectadas por la desertificación.				
	Gutiérrez-Fernández, F et al. 2007. Propuesta de un sistema de indicadores de sostenibilidad para áreas naturales con uso turístico. XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. LUGO, 26-28 Septiembre, 2007	Suelo artificializado				

IS1. Índice de desempleo de municipios evaluados.

1. Denominación.	Índice de desempleo en municipios evaluados																		
2. Definición.	Evaluar si el índice de desempleo en los municipios evaluados (previa validación del cumplimiento de condiciones ambientales requeridas para el cultivo) es superior al índice de desempleo del país.																		
3. Justificación e importancia del indicador:	Este indicador nos proporciona información sobre el nivel socio económico de la población del municipio evaluado, dentro del impacto que busca el proyecto, se busca favorecer las poblaciones con mayor necesidad de empleo, por lo cual se otorgará un mayor peso a aquellos municipios en los que previa validación del cumplimiento de las condiciones ambientales, se identifica una mayor necesidad de empleo.																		
4. Tema al que pertenece	Social																		
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 15%	Indicador 40%																	
6. Periodicidad de actualización.	Cada año.																		
7. Metodología de cálculo.	Registrar el índice de desempleo de los municipios evaluados, otorgando un peso de mayor a menor de acuerdo con la mayor o menor necesidad de empleo en el municipio.																		
8. Formula de medida.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:</th> <th>SI</th> <th>NO</th> <th>Peso</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>¿Tiene un índice de desempleo mayor al índice de desempleo del país en promedio del año 2008?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>¿Tiene un índice de desempleo igual o un 10% por debajo del índice promedio de desempleo del país en el año 2008?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>¿Tiene un nivel de desempleo más bajo con respecto al índice de desempleo del país en promedio del año 2008, en una proporción de más del 10%?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> <p>CID= (Respuesta afirmativa *Peso criterio / 5)*100 CID= Calificación índice de desempleo</p>			La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso	¿Tiene un índice de desempleo mayor al índice de desempleo del país en promedio del año 2008?	1	0	5	¿Tiene un índice de desempleo igual o un 10% por debajo del índice promedio de desempleo del país en el año 2008?	1	0	3	¿Tiene un nivel de desempleo más bajo con respecto al índice de desempleo del país en promedio del año 2008, en una proporción de más del 10%?	1	0	1
La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso																
¿Tiene un índice de desempleo mayor al índice de desempleo del país en promedio del año 2008?	1	0	5																
¿Tiene un índice de desempleo igual o un 10% por debajo del índice promedio de desempleo del país en el año 2008?	1	0	3																
¿Tiene un nivel de desempleo más bajo con respecto al índice de desempleo del país en promedio del año 2008, en una proporción de más del 10%?	1	0	1																
9. Observaciones.	Existen en Colombia varias fuentes de obtención para el cálculo de este indicador, DANE, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, entre otros, fuentes sobre las cuales se logrará la información requerida para esta medición. A mayor valor obtenido en el índice de desempleo, mayor peso para la selección.																		
10. Indicadores que sirvieron para su formulación	Origen	Indicador																	
	UN- CSD 1996	Tasa de desempleo																	
	UN- CSD -2001	Tasa de desempleo																	
	Costa Rica	Tasas desempleo abierto, subempleo visible e invisible																	

	Chi & Sirakaya	Índice de desempleo
--	----------------	---------------------

IS2. Nivel de calificación de los habitantes de los municipios evaluados

1. Denominación.	Nivel de calificación de los habitantes de los municipios evaluados de acuerdo con la actividad económica del municipio.																						
2. Definición.	Determinar la actividad económica principal del municipio, para sobre esto, determinar la compatibilidad del cultivo de <i>Jatropha curcas</i> con la calificación que tengan los habitantes.																						
3. Justificación e importancia del indicador:	Este indicador nos muestra la compatibilidad del “hacer propio” de los habitantes de los municipios evaluados, de acuerdo con su actividad económica principal.																						
4. Tema al que pertenece	Social																						
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 15%	Indicador 60%																					
6. Periodicidad de actualización.	Cada año.																						
7. Metodología de cálculo.	Previa validación del cumplimiento de las condiciones ambientales requeridas para el cultivo, se busca identificar las actividades económicas principales de cada municipio para sobre ello establecer la compatibilidad de calificación de los habitantes para cultivar <i>Jatropha curcas</i> , subdividiendo la vocación agrícola en policultivos y monocultivos, dado el impacto que esta cualidad genera para la posible incorporación de un nuevo tipo de cultivo, siendo																						
8. Formula de medida.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:</th> <th>SI</th> <th>NO</th> <th>Peso</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>¿La principal actividad económica del municipio es de tipo agrícola? Si la respuesta es afirmativa continúe con los siguientes subcriterios:</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>¿La principal actividad del municipio es la ganadería u otra asociada al pastoreo?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>¿La principal actividad del municipio es el turismo o actividades de tipo forestal?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>¿La principal actividad del municipio es de tipo industrial?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> <p>NCC= (Respuesta afirmativa *Peso criterio / 5)*100 NCC= Nivel de compatibilidad con el cultivo</p>			La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso	¿La principal actividad económica del municipio es de tipo agrícola? Si la respuesta es afirmativa continúe con los siguientes subcriterios:	1	0	5	¿La principal actividad del municipio es la ganadería u otra asociada al pastoreo?	1	0	3	¿La principal actividad del municipio es el turismo o actividades de tipo forestal?	1	0	1	¿La principal actividad del municipio es de tipo industrial?	1	0	1
La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso																				
¿La principal actividad económica del municipio es de tipo agrícola? Si la respuesta es afirmativa continúe con los siguientes subcriterios:	1	0	5																				
¿La principal actividad del municipio es la ganadería u otra asociada al pastoreo?	1	0	3																				
¿La principal actividad del municipio es el turismo o actividades de tipo forestal?	1	0	1																				
¿La principal actividad del municipio es de tipo industrial?	1	0	1																				
9. Observaciones.	Los municipios con actividades predominantes en el sector agrícola tendrán mayor compatibilidad frente a los otros tipos de actividades.																						
10. Indicadores que sirvieron para su formulación	Origen	Indicador																					
	DANE	Informes ICER, ocupados según rama de actividad por informal y formal.																					
	DANE	Informes ICER, ocupados según grupo de edad.																					

II.1. Nivel de seguridad de las regiones donde están ubicados los municipios evaluados

1. Denominación.	Evaluación de niveles de seguridad de la región donde están ubicados los municipios evaluados que cumplan con las condiciones ambientales para el cultivo de <i>Jatropha curcas</i> .																		
2. Definición.	Determinar el nivel de seguridad en términos de hurtos de automotores, secuestros y homicidios en las vías de acceso principales de los municipios evaluados, bajo el conocimiento de los eventos inseguros ocurridos en la región.																		
3. Justificación e importancia del indicador:	Este indicador nos permite evaluar la viabilidad de transporte en los municipios seleccionados inicialmente por su cumplimiento de las condiciones ambientales para el cultivo de <i>Jatropha curcas</i> , en términos de seguridad vial.																		
4. Tema al que pertenece	Logística																		
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 25%	Indicador 20%																	
6. Periodicidad de actualización.	Cada año.																		
7. Metodología de cálculo.	Previa validación del cumplimiento de las condiciones ambientales requeridas para el cultivo, evaluar el número de homicidios, secuestros, ataques terroristas a poblaciones y hurtos en la región y de ser posible en las vías de acceso a las mismas.																		
8. Formula de medida.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:</th> <th>SI</th> <th>NO</th> <th>Peso</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>¿La región tiene una tasa⁶ baja de hurtos de automotores, secuestros de retenes ilegales, ataques u homicidios dentro de la clasificación del Estado (10 primeros lugares)?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>¿La región tiene una tasa media de hurtos de automotores, secuestros de retenes ilegales, ataques u homicidios dentro de la clasificación del estado? (11°-20° lugar)</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>¿La región tiene una tasa alta de hurtos de automotores, secuestros de retenes ilegales, ataques u homicidios dentro de la clasificación del estado?(Del 20° hacia abajo)</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> <p>CNS = (Respuesta afirmativa *Peso criterio / 5)*100 CNS: Calificación nivel de seguridad municipio.</p>			La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso	¿La región tiene una tasa ⁶ baja de hurtos de automotores, secuestros de retenes ilegales, ataques u homicidios dentro de la clasificación del Estado (10 primeros lugares)?	1	0	5	¿La región tiene una tasa media de hurtos de automotores, secuestros de retenes ilegales, ataques u homicidios dentro de la clasificación del estado? (11°-20° lugar)	1	0	3	¿La región tiene una tasa alta de hurtos de automotores, secuestros de retenes ilegales, ataques u homicidios dentro de la clasificación del estado?(Del 20° hacia abajo)	1	0	1
La región de los municipios a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso																
¿La región tiene una tasa ⁶ baja de hurtos de automotores, secuestros de retenes ilegales, ataques u homicidios dentro de la clasificación del Estado (10 primeros lugares)?	1	0	5																
¿La región tiene una tasa media de hurtos de automotores, secuestros de retenes ilegales, ataques u homicidios dentro de la clasificación del estado? (11°-20° lugar)	1	0	3																
¿La región tiene una tasa alta de hurtos de automotores, secuestros de retenes ilegales, ataques u homicidios dentro de la clasificación del estado?(Del 20° hacia abajo)	1	0	1																
9. Observaciones.	A mayor valor obtenido en el nivel de seguridad, mayor potencialidad en la selección del municipio dentro del estudio de macro localización.																		
10. Indicadores que sirvieron para su	Origen	Indicador																	
	Ministerio de Defensa Nacional	Hurto de automotores.																	

⁶ De eventos * cada 100.000 habitantes: Ministerio de Defensa de Colombia

formulación	Ministerio de Defensa Nacional	Secuestros en retenes ilegales
	Ministerio de Defensa Nacional	Homicidios
	Ministerio de Defensa Nacional	Ataques a poblaciones

II.2. Área disponible para el cultivo

1. Denominación.	Área disponible para el cultivo de <i>Jatropha curcas</i> en el municipio a evaluar.	
2. Definición.	Determinar el % de tierra disponible de acuerdo con la extensión del mismo, para el cultivo de <i>Jatropha curcas</i> , cuantificando las tierras ligeramente intervenidas, las no intervenidas con vocación agrícola y las desérticas.	
3. Justificación e importancia del indicador:	Este indicador nos permite evaluar la capacidad disponible en términos de área de tierras en el municipio evaluado, para cultivar <i>Jatropha curcas</i> .	
4. Tema al que pertenece	Logística	
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 25%	Indicador 40%
6. Periodicidad de actualización.	Cada año.	
7. Metodología de cálculo.	Cuantificación de tierras ligeramente intervenidas, más la no intervenidas con vocación agrícola, más las desérticas, sobre el total de área cultivable del municipio, por cien, para obtener un porcentaje de área disponible para el cultivo.	
8. Formula de medida.		
9. Observaciones.	A mayor valor obtenido en el % de área disponible, mayor probabilidad de selección en la localización para la producción de biodiesel hacia el sistema cliente.	
10. Indicadores que sirvieron para su formulación	Origen	Indicador
	Participación relativa, en área de las coberturas de uso agrícola, respecto al total de tierras en agricultura	Estudio de conflicto del uso de los Suelos en Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Corporación Colombiana de Investigación Agropuecuaria, 2001

II.3. Acceso a infraestructura vial

1. Denominación.	Evaluación de estado de las vías principales de los municipios analizados.																										
2. Definición.	Determinar la facilidad de acceso a los municipios seleccionados.																										
3. Justificación e importancia del indicador:	Este indicador nos permite evaluar la viabilidad de transporte en los municipios seleccionados en cuanto al estado de las vías, partiendo de la premisa de que una vía en mal estado encarece el transporte por lo que significa un mayor desgaste de los vehículos que transportan.																										
4. Tema al que pertenece	Logística																										
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 25%	Indicador 20%																									
6. Periodicidad de actualización.	Cada año.																										
7. Metodología de cálculo.	Previa validación del cumplimiento de las condiciones ambientales requeridas para el cultivo, cuantificar los kilómetros de vías principales multiplicados por un peso dado al estado de la vía, que nos permita obtener una calificación ponderada a las vías principales del municipio seleccionado.																										
8. Formula de medida.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>El municipio a evaluar cumple con las siguientes características:</th> <th>SI</th> <th>NO</th> <th>Peso</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>¿Las vías principales del municipio están pavimentadas y en buen estado?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>¿Las vías principales del municipio están pavimentadas y en regular estado?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>¿Las vías principales del municipio están pavimentadas y en mal estado?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>¿Las vías principales del municipio están afirmadas?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>¿Las vías principales del municipio están sin pavimentar y sin afirmar?</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> <p>CEV= ((ΣRespuestas afirmativas *Peso criterio* cantidad de kilómetros que cumplen el criterio) / (Máximo peso posible (5) * cantidad total de kilómetros de la vía principal))*100 CEV= Calificación estado de la vía</p> <p style="text-align: center;">$(\Sigma CEV / (100 * \text{Número de vías evaluadas}) * 100$</p>			El municipio a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso	¿Las vías principales del municipio están pavimentadas y en buen estado?	1	0	5	¿Las vías principales del municipio están pavimentadas y en regular estado?	1	0	4	¿Las vías principales del municipio están pavimentadas y en mal estado?	1	0	3	¿Las vías principales del municipio están afirmadas?	1	0	2	¿Las vías principales del municipio están sin pavimentar y sin afirmar?	1	0	1
El municipio a evaluar cumple con las siguientes características:	SI	NO	Peso																								
¿Las vías principales del municipio están pavimentadas y en buen estado?	1	0	5																								
¿Las vías principales del municipio están pavimentadas y en regular estado?	1	0	4																								
¿Las vías principales del municipio están pavimentadas y en mal estado?	1	0	3																								
¿Las vías principales del municipio están afirmadas?	1	0	2																								
¿Las vías principales del municipio están sin pavimentar y sin afirmar?	1	0	1																								
9. Observaciones.	A mayor valor obtenido en la calificación del estado de la vía, mayor probabilidad de selección de dicho municipio.																										
10. Indicadores que sirvieron para su formulación	Origen	Indicador																									
	INVIAS	Estado de red pavimentada																									
	INVIAS	Estado de red afirmada																									
	INVIAS	Estado de red Total																									

II.4. Priorización de municipios de acuerdo con distancia al sistema cliente.

1. Denominación.	Priorización del municipio de acuerdo con distancia del mismo al sistema cliente.	
2. Definición.	Clasificación de municipios evaluados de acuerdo con distancia de los mismos con respecto al sistema cliente.	
3. Justificación e importancia del indicador:	En términos logísticos, a una menor distancia de las plantas productivas respecto al sistema cliente, podríamos suponer menores costos en el transporte, por lo cual se requiere la clasificación de municipios que cumplan con las condiciones obligatorias para ser considerados como puntos de localización de una planta productiva y sobre ello estimar cuáles municipios ofrecen mayores ventajas por su cercanía al sistema cliente.	
4. Tema al que pertenece	Logística	
5. Peso relativo dentro del sistema.	Tema 25%	Indicador 20%
6. Periodicidad de actualización.	Se hace una vez.	
7. Metodología de cálculo.	Previa validación de las condiciones obligatorias para que el municipio sea considerado como punto de localización (condiciones ambientales y área disponible para el cultivo), priorizar aquellos que tengan una menor distancia respecto al sistema cliente.	
8. Formula de medida.	<p style="text-align: center;">Clasificación de municipios por distancia respecto al sistema cliente</p> <p>CMD =</p>	
9. Observaciones.	Este indicador busca generar una clasificación de los municipios que cumplan las condiciones ambientales y dar un mayor peso a los que tengan mayor cercanía al sistema cliente.	
10. Indicadores que sirvieron para su formulación	Origen	Indicador

Anexo 4. Código Gams

sets

i Municipio tipo i/i1*i50/

j Plantas extractoras/j1*j16/

k Refinerias/k1*k2/

l mayoristas/l1*l2/

m Clientes /m1*m7/

t Periodo t/t1*t8/

g Grado de desertificacion del area cultivable /g1*g3/

ma Grupo de clientes A /m2, m3, m4, m5, m7/

mb Grupo de clientes B /m1, m6/ ;

option optcr=0.0;

parameter

\$ontext

HT(i) Total de hectareas deserticas por municipio i

/i1 4790

i2 220

i3 2650

i4 1260

i5 2340

i6 1890

i7 813

i8 1000

i9 710

i10 1430

i11 679

i12 880

i13	780
i14	390
i15	322
i16	910
i17	1090
i18	244
i19	243
i20	242
i21	940
i22	480
i23	250
i24	850
i25	220
i26	170
i27	306
i28	90
i29	62.4
i30	60
i31	50
i32	30
i33	12.5
i34	770
i35	130
i36	300
i37	3120
i38	1210
i39	470

i40	380
i41	700
i42	1250
i43	510
i44	440
i45	220
i46	2180
i47	590
i48	560
i49	360
i50	650 /

\$Offtext

CCA (i) Costos asociados al cumplimiento ambiental al asignar el municipio i de acuerdo con el AHP

/i1	200000
i2	200000
i3	500000
i4	200000
i5	300000
i6	200000
i7	300000
i8	200000
i9	200000
i10	300000
i11	500000
i12	300000
i13	300000

i14	500000
i15	300000
i16	200000
i17	200000
i18	300000
i19	300000
i20	500000
i21	300000
i22	200000
i23	200000
i24	300000
i25	500000
i26	200000
i27	200000
i28	500000
i29	500000
i30	500000
i31	300000
i32	200000
i33	500000
i34	100000
i35	200000
i36	200000
i37	500000
i38	200000
i39	200000
i40	200000

i41	100000	
i42	100000	
i43	200000	
i44	500000	
i45	200000	
i46	100000	
i47	200000	
i48	200000	
i49	200000	
i50	100000	/

CSA(i) Costos asociados a la sustentabilidad ambiental al asignar el municipio i de acuerdo con el AHP

/

i1	100000
i2	500000
i3	200000
i4	300000
i5	200000
i6	300000
i7	300000
i8	300000
i9	300000
i10	300000
i11	300000
i12	300000
i13	300000

i14	500000
i15	500000
i16	300000
i17	300000
i18	500000
i19	500000
i20	500000
i21	300000
i22	500000
i23	500000
i24	300000
i25	500000
i26	500000
i27	500000
i28	500000
i29	500000
i30	500000
i31	500000
i32	500000
i33	500000
i34	200000
i35	500000
i36	500000
i37	100000
i38	200000
i39	300000
i40	300000

i41	300000
i42	200000
i43	300000
i44	300000
i45	500000
i46	100000
i47	300000
i48	300000
i49	500000
i50	300000

/

CCE (i) Costos asociados a la compatibilidad economica al asignar el municipio i de acuerdo con el AHP

/i1	200000
i2	500000
i3	200000
i4	500000
i5	200000
i6	200000
i7	200000
i8	200000
i9	500000
i10	200000
i11	200000
i12	200000
i13	200000
i14	200000
i15	200000

i16	500000
i17	500000
i18	200000
i19	200000
i20	500000
i21	200000
i22	200000
i23	500000
i24	200000
i25	200000
i26	200000
i27	500000
i28	500000
i29	200000
i30	200000
i31	200000
i32	200000
i33	200000
i34	100000
i35	100000
i36	100000
i37	500000
i38	100000
i39	100000
i40	500000
i41	100000
i42	100000

i43	100000
i44	100000
i45	300000
i46	100000
i47	100000
i48	100000
i49	300000
i50	100000 /

CIV (i) Costos asociados al cumplimiento de la infraestructura vial asignar el municipio i de acuerdo con el AHP

/i1	200000
i2	200000
i3	500000
i4	500000
i5	200000
i6	500000
i7	200000
i8	200000
i9	500000
i10	200000
i11	200000
i12	200000
i13	500000
i14	200000
i15	200000
i16	200000
i17	500000

i18	200000
i19	200000
i20	500000
i21	200000
i22	500000
i23	200000
i24	500000
i25	200000
i26	200000
i27	200000
i28	200000
i29	200000
i30	200000
i31	200000
i32	500000
i33	200000
i34	300000
i35	300000
i36	300000
i37	100000
i38	100000
i39	100000
i40	300000
i41	300000
i42	300000
i43	100000
i44	200000

i45 100000
i46 300000
i47 100000
i48 200000
i49 300000
i50 100000 / ;

table Ht(i,g) Hectareas del municipio i con el grado de desertificacion g

	g1	g2	g3
i1	1190	26126.1	20583.9
i2	917.5	0	1282.5
i3	88	12152	14260
i4	6	6480.7	6113.3
i5	12841	4460.4	6098.6
i6	9485	7712.9	1702.1
i7	0	33.6	8097.4
i8	2410	2550	5040
i9	0	912	6194
i10	6951	1386	5963
i11	0	0	6787.444444
i12	2483.3	5028.5	1288.2
i13	1953.6	4032	1814.4
i14	0	3407.5	492.5
i15	0.4	3218.6	0
i16	7154.2	0	1945.8
i17	7858.5	1534.5	1503.5
i18	0.24	946.4	1492.96
i19	0	218.7	2211.3

i20	0.4	1910.8	505.8
i21	7134.6	385.4	1880
i22	2712.6	377.3	1710.1
i23	720	1447.5	332.5
i24	6901	1045.5	553.5
i25	636.24	1557.6	6.16
i26	0	1697.4	2.6
i27	1754.5	1189	116
i28	4	0	896
i29	0	257.4	366.6
i30	28.0000176	0	571.9999824
i31	28.5	471.5	0
i32	80.04	0	219.96
i33	0	125.4	0
i34	5811	1942.2	0
i35	370	59.2	821.4
i36	11.828	2983.2	0
i37	15567.5	13124.6	2442.9
i38	8776.8	1526.4	1812.6
i39	4408.2	0	331.8
i40	1375.6	0	2424.4
i41	6544.8	0	518.4
i42	12500	0	0
i43	5100	0	0
i44	290.4	0	3775.2
i45	0	404	2131.1
i46	18659.2	0	3182.4

i47 5829 0 0
i48 5607 0 0
i49 3585.6 0 0
i50 4885.8 132.6 1540.2 ;

table dc(i,j) Distancia del cultivo i a la planta extractora j (en kms)

	j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7	j8	j9
j10	j11	j12	j13	j14	j15	j16			
i1	289.93877	120.78484	226.81275	230.23746	319.59558	321.56453			
	252.25687	476.23414	266.57582	351.84539	1000000	1000000	1000000		
	1000000	1000000	1000000						
i2	241.18564	72.03171	178.05962	181.48433	270.84245	272.8114			
	203.50374	427.48101	217.82269	303.09226	1000000	1000000	1000000		
	1000000	1000000	1000000						
i3	326.62088	157.46695	263.49486	266.91957	356.27769	358.24664			
	288.93898	512.91625	303.25793	388.5275	1000000	1000000	1000000		
	1000000	1000000	1000000						
i4	283.24727	114.09334	220.12125	223.54596	312.90408	315.87303			
	245.56537	469.54264	259.88432	345.15389	1000000	1000000	1000000		
	1000000	1000000	1000000						
i5	287.88214	118.72821	224.75612	228.18083	317.53895	319.5079			
	250.20024	474.17751	264.51919	349.78876	1000000	1000000	1000000		
	1000000	1000000	1000000						
i6	304.93964	135.78571	241.81362	245.23833	334.59645	336.5654			
	267.25774	491.23501	281.57669	366.84626	1000000	1000000	1000000		
	1000000	1000000	1000000						
i7	287.85208	118.69815	224.72606	228.15077	317.50889	319.47784			
	250.17018	474.14745	264.48913	349.7587	1000000	1000000	1000000		
	1000000	1000000	1000000						
i8	316.91924	147.76531	253.79322	257.21793	346.57605	348.545			
	279.23734	503.21461	293.55629	378.82586	1000000	1000000	1000000		
	1000000	1000000	1000000						
i9	321.63649	152.48256	258.51047	261.93518	351.2933	353.26225			
	283.95459	507.93186	298.27354	383.54311	1000000	1000000	1000000		
	1000000	1000000	1000000						

i10 305.51659 138.70816 254.74298 255.46131 335.1734 334.43597
278.72308 501.45799 291.79967 377.06924 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i11 293.20701 124.05308 230.08099 233.5057 322.86382 324.83277
255.52511 479.50238 269.84406 355.11363 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i12 275.85421 106.70028 212.72819 216.1529 305.51102 307.47997
238.17231 462.14958 252.49126 337.76083 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i13 296.6169 123.30143 249.79203 253.21674 342.57486 344.54381
275.23615 499.21342 289.5551 374.82467 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i14 257.05832 87.90439 193.9323 197.35701 286.71513 288.68408
219.37642 443.35369 233.69537 318.96494 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i15 250.40599 88.06828 200.87474 204.29945 280.0628 244.34985
226.31886 450.29613 240.63781 325.90738 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i16 298.05503 128.9011 234.92901 238.35372 327.71184 329.68079
260.37313 484.3504 274.69208 359.96165 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i17 334.49838 165.34445 271.37236 274.79707 364.15519 366.12414
296.81648 520.79375 311.13543 396.405 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i18 276.4181 120.859 226.88685 230.31156 306.07491 308.04386
252.33097 476.30824 266.64992 351.91949 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i19 271.44447 102.29054 224.72606 211.74316 301.10128 303.07023
233.76257 457.73984 248.08152 333.35109 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i20 376.92641 207.77248 313.80039 317.2251 406.58322 408.55217
339.24451 563.22178 353.56346 438.83303 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i21 302.25193 138.14988 251.47832 254.90303 331.90874 333.87769
278.1648 500.89971 291.24139 376.51096 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000

i22	357.71904	188.56511	294.59302	298.01783	387.37585	389.3448
	320.03714	544.01441	334.35609	419.62566	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i23	342.14062	172.98669	279.0146	282.43941	371.79743	373.76638
	304.45872	528.43599	318.77767	404.04724	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i24	262.96211	93.80818	199836.09	203.2608	292.61892	294.58787
	225.28021	449.25748	239.59916	324.86873	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i25	254.52569	98.96659	204.99444	208.41915	284.1825	286.15145
	230.43856	454.41583	244.75751	330.02708	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i26	242.98509	84.93938	190.84949	175.45247	270.29252	253.18477
	197.47188	421.44915	211.79083	297.0604	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i27	233.65755	78.09845	184.1263	187.55101	263.31436	265.28331
	209.57042	433.54769	223.88937	309.15894	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i28	308.7183	139.56437	245.59228	249.01699	338.37511	340.34406
	271.0364	495.01367	285.35535	370.62492	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i29	258.32882	102.76976	208.79761	212.22232	287.98563	289.95458
	234.24169	458.219	248.56068	333.83025	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i30	319.0701	163.51104	269.53889	272.9636	348.72691	350.69586
	294.98296	518.96028	309.30196	394.57153	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i31	211.52454	55.96544	161.99329	165.418	241.18135	243.1503
	241.18135	411.41468	201.75636	287.02593	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i32	259.75945	90.60552	196.63343	200.05814	289.41626	291.38521
	222.07755	446.05482	236.3965	321.66607	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			
i33	247.17601	78.02208	184.04999	187.4747	276.83282	278.80177
	209.49411	433.47138	223.81306	309.08263	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000			

i34 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 197.11005 127.41478 104.12753
111.02922 102.17657 125.13623

i35 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 173.55742 284.44496 261.15771
268.0594 275.73399 298.69315

i36 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 32.36602 159.7808 136.49355
146.99602 134.54259 157.50225

i37 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 28.0111 122.2016 98.91435
76.49201 138.45129 161.41095

i38 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 29.16608 140.05362 116.76637
94.34403 131.34265 154.30231

i39 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 90.94239 210.09355 186.8063
164.38396 201.38258 224.34224

i40 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 90.84835 209.99931 186.71206
164.28972 201.28834 224.248

i41 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 97.53431 216.68527 193.39802
170.97568 207.9743 230.93396

i42 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 111.49994 230.6509 193.39802
184.94131 221.93993 244.89959

i43 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 166.77475 199.93001 176.64276
85.06956 268.95132 291.91098

i44 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 186.135 310.40252 287.11527
195.54207 288.31157 311.27123

i45 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
1000000 1000000 1000000 1000000 8.26362 119.15116 95.86391
73.44157 110.44019 133.39985

i46	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000	1000000	53.10244	163.98998
	118.28039	155.27901	178.23867			140.70273
i47	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000	1000000	97.34596	216.49712
	170.78753	207.78615	230.74581			193.20987
i48	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000	1000000	147.68852	180.84378
	65.98333	249.86509	272.82475			157.55653
i49	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000	1000000	104.96429	222.71198
	107.85153	215.40448	238.36414			192.1327
i50	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	1000000	1000000	1000000	1000000	73.51041	192.66157
	146.95198	183.9506	206.91026			169.37432

table dp(j,k) Distancia de la planta extractora j a la refineria k (en km)

	k1	k2
j1	214.92075	1000000
j2	52.58304	1000000
j3	165.3895	1000000
j4	168.81421	1000000
j5	244.57756	1000000
j6	208.86461	1000000
j7	190.83362	1000000
j8	414.81089	1000000
j9	205.15257	1000000
j10	290.42214	1000000
j11	1000000	108.75498

j12	1000000	86.5251
j13	1000000	63.23785
j14	1000000	96.20065
j15	1000000	210.93155
j16	1000000	233.89121 ;

table dr(k,l) Distancia de la refineria k al mayorista l (en km)

	l1	l2
k1	0	0
k2	517.99681	517.99681 ;

table dm(l,m) Distancia del mayorista l al cliente m (en km)

	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7
l1	53.94259	43.30404	37.27893	49.55859	49.55859	54.29883	54.46012
l2	53.94259	43.30404	37.27893	49.55859	49.55859	54.29883	54.46012 ;

table CEP(j,t) Capacidad de extraccion de la planta j en el trimestre t (capacidad dada en tn de fruto)

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8
j1	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259	22464.2361	21873.072
j2	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259	22464.2361	21873.072
j3	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259	22464.2361	21873.072
j4	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259	22464.2361	21873.072

j5	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259
	22464.2361	21873.072				
j6	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259
	22464.2361	21873.072				
j7	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259
	22464.2361	21873.072				
j8	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259
	22464.2361	21873.072				
j9	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259
	22464.2361	21873.072				
j10	20897.6	20050.4	21462.4	20897.6	21873.072	20986.3259
	22464.2361	21873.072				
j11	24568	23572	25232	24568	26491.9729	25417.974
	27207.9722	26491.9729				
j12	24568	23572	25232	24568	26491.9729	25417.974
	27207.9722	26491.9729				
j13	24568	23572	25232	24568	26491.9729	25417.974
	27207.9722	26491.9729				
j14	24568	23572	25232	24568	26491.9729	25417.974
	27207.9722	26491.9729				
j15	24568	23572	25232	24568	26491.9729	25417.974
	27207.9722	26491.9729				
j16	24568	23572	25232	24568	26491.9729	25417.974
	27207.9722	26491.9729 ;				

table CPR(k,t) Capacidad de refinacion de la refinaria k el trimestre t (capacidad dada en galones de aceite)

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8
k1	2663136.96	2701190.51	2891405.84	2815316.21	2663136.96			
	2701181.77	2891405.84	2815316.21					
k2	6627392.21	6358714.15	6806510.92	6627392.21	6627392.21			
	6358714.15	6806510.92	6627392.21 ;					

i50 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000 1000000
 1000000 1000000 1000000 107860.8 107860.8 107860.8 107860.8 107860.8
 107860.8 ;

table Cr(j,k) Costos de refinacion de aceite de la planta j a biodiesel en la refineria k

	k1	k2
j1	4243.28	1000000
j2	4243.28	1000000
j3	4243.28	1000000
j4	4243.28	1000000
j5	4243.28	1000000
j6	4243.28	1000000
j7	4243.28	1000000
j8	4243.28	1000000
j9	4243.28	1000000
j10	4243.28	1000000
j11	1000000	4243.28
j12	1000000	4243.28
j13	1000000	4243.28
j14	1000000	4243.28
j15	1000000	4243.28
j16	1000000	4243.28 ;

table CC(i,j) Costos de transporte del municipio tipo i a la planta j en pesos por tonelada por Km en la ruta de referencia

	j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7	j8	j9	j10	j11
j12	j13	j14	j15	j16							

table Ctp (j,k) Costos de transporte de la planta extractora j a la refineria k por km por galon en la ruta de referencia

	k1	k2
j1	23.415	1000
j2	23.415	1000
j3	38.79	1000
j4	38.79	1000
j5	38.79	1000
j6	38.79	1000
j7	38.79	1000
j8	38.79	1000
j9	38.79	1000
j10	38.79	1000
j11	1000	23.415
j12	1000	23.415
j13	1000	23.415
j14	1000	23.415
j15	1000	23.415
j16	1000	23.415 ;

table CTR (k,l) Costos de transporte de la refineria k al mayorista l por Km por unidad de carga en la ruta en referencia

	l1	l2
k1	0	0
k2	71.06	71.06 ;

scalar

CAC Capacidad de almacenamiento en el cliente m en el periodo t (3 tanques de 10000 gn por patio)

/30000/

CAM Costo de almacenamiento 10% de costo de refinacion

/424.328/

CTM Costos de transporte del mayorista l hasta el cliente m en Km por galon

/32/

Kf Kilogramos de frutos obtenidos por hectarea de cualquier grado de desertificacion

/3500/

Rac Rendimiento del fruto al convertirse en aceite expresado en gn

/203.625/

Rbd Rendimiento del aceite al transformarse en biodiesel en porcentaje

/0.921/

CAIt Capacidad de almacenamiento del mayorista l el trimestre t (capacidad dada en galones de biodiesel)

/168000/

CPC Capacidad camiones para cultivadores (toneladas)

/4.5/

CPCR Capacidad camiones para refinarias y mayoristas (galones)

/9900/ ;

variables

z Valor de la funcion objetivo

$x(i,g,j,t)$ Ha del municipio i del grado g asignada a las plantas de extraccion tipo j en el periodo t

$y(j,k,t)$ Cantidad de aceite a transportar de j a la biorefineria k en el periodo t

$Q(i,j,t)$ Cantidad de kg de fruto a transportar del municipio i a la planta extractora j en el periodo t

$ZA(k,l,t)$ Cantidad de aceite procesado en biodiesel en K para transportar al mayorista l en el periodo t

$ZBA(l,ma,t)$ Cantidad de biodiesel a transportar del mayorista l al grupo de clientes ma en el periodo t

$ZBB(l,mb,t)$ Cantidad de biodiesel a transportar del mayorista l al grupo de clientes mb en el periodo t

$Nr(k,l,t)$ Numero de viajes en el periodo t (desde la refineria hasta el mayorista 9900 gal)

$Np(j,k,t)$ Numero de viajes en el periodo t (desde la planta hasta la refineria 9900 gal)

$Nma(l,ma,t)$ Numero de viajes en el periodo t (desde el mayorista hasta el cliente ma 9900 gal)

$Nmb(l,mb,t)$ Numero de viajes en el periodo t (desde el mayorista hasta el cliente mb 9900 gal)

$Nc(i,j,t)$ Numero de viajes en el periodo t (desde el cultivador hasta la extractora 4.5 tn)

$IN(l,t)$ Inventario en el mayorista l para el periodo t

$CS(i,j,t)$ Cosecha en el municipio i asignado del que se obtiene fruto para la planta j en el periodo t

positive variable $X(i,g,j,t)$;

positive variable $Y(j,k,t)$;

positive variable $Q(i,j,t)$;

positive variable $ZA(k,l,t)$;

positive variable $ZBA(l,ma,t)$;

positive variable $ZBB(l,mb,t)$;

positive variable $IN(l,t)$;

positive variable $CS(i,j,t)$;

integer Variable $Np(j,k,t)$;

integer Variable $Nr(k,l,t)$;

integer Variable $Nc(i,j,t)$;

integer Variable $Nma(l,ma,t)$;

integer Variable $Nmb(l,mb,t)$;

equations

Costo funcion objetivo

Capacidaddelatierra(i,g,t) Ecuacion de capacidad de las municipios tipo i para cultivar en area del grado tipo g

Ciclod cosecha(i,j,t) Ecuacion que determina cuando se recoge el fruto de los cultivos en tierras grado g del municipio i en el periodo t

Iniciod cosechauno (i,j,t) Inicio de cosecha en el periodo t igual a uno

Iniciod cosechados(i,j,t) Inicio de cosecha en el periodo t igual a dos

Equilibriocultivosplantas (i,j,t) Ecuacion que muestra que la cantidad de fruto que sale de los cultivos es la misma que ingresa a las plantas

Capacidaddelasplantas(j,t) Ecuacion de capacidad de las plantas tipo j para procesar los Kg de fruto de los municipios i

Equilibrioplantarefinerias(j,t) Ecuacion que describe que la cantidad de aceite que sale de las extractoras entra a las refineries

Equilibrioaceitebiod (k,t) Ecuacion que determina que la cantidad de aceite que sale de las refineries entra a l

Capacidadcamiones(i,j,t) Ecuacion que muestra la capacidad de los camiones de los cultivadores

Capacidadrefinerias(k,t) Ecuacion de capacidad de las refineries k para procesar el aceite de la planta j

Capacidadcarrotanqueextractora(j,k,t) Ecuacion que muestra la capacidad de los carrotanques desde la extractora hasta la refineria

Capacidadcarrotanquesrefineria(k,l,t) Ecuacion que muestra la capacidad de los camiones de los cultivadores

Equilibriomayoristas(l,t) Ecuacion que muestra que lo que sale del mayorista debe ser igual a lo que entra al cliente

Capacidaddealmacenamiento (l,t) Ecuacion que presenta la capacidad de almacenamiento del mayorista para guardar biodiesel

Capacidadcarrotanquesmayora (l,ma,t) Ecuacion que describe la capacidad de los carrotanques de los mayoristas para transportar a los clientes ma

Capacidadcarrotanquesmayorb (l,mb,t) Ecuacion que describe la capacidad de los carrotanques de los mayoristas para transportar a los clientes mb

Demandaclientesma (l,t) Ecuacion de demanda del grupo de clientes ma

Demandaclientesmb(l,t) Ecuacion de demanda del grupo de clientes mb ;

costo.. z=e=sum((i),(CCA(i)+CSA(i)+ CCE(i)+
 CIV(i))*sum((g,j,t),x(i,g,j,t))+sum((i,j),(cc(i,j)*dc(i,j))*sum(t,Q(i,j,t)))+sum((j,k,t),y(j,k,t)*ctp(j,k)*d
 p(j,k))+ sum((k,l,t),ZA(k,l,t)*ctr(k,l)* dr(k,l))+ ctm*sum((l,ma,t),ZBa(l,ma,t)*da(ma,t))+
 sum((l,mb,t),ZBb(l,mb,t)*db(mb,t))+ sum((i,j,t),Q(i,j,t)*CEP(j,t)) + sum((j,k,t),y(j,k,t)*cr(j,k)) +
 CAM*sum((l,t),IN(l,t))+sum((i,j,t),CPC * Nc(i,j,t))*1000+ sum ((j,k,t), cpcr* np(j,k,t))/100+ sum
 ((k,l,t), CPCR * Nr(k,l,t))/100+ sum((l,ma,t),CPCR * Nma(l,ma,t))/100+ sum ((l,mb,t),CPCR *
 Nmb(l,mb,t))/100;

Capacidaddelatierra(i,g,t).. sum((j),x(i,g,j,t))=l=ht(i,g);

Ciclodecosecha(i,j,t).. Kf* sum((g),x(i,g,j,t))=e=CS(i,j,t+2)\$ (ord(t)<=8);

Iniciodecosechauno(i,j,"t1"..CS(i,j,"t1")=e=0 ;

Iniciodecosechados(i,j,"t2"..CS(i,j,"t2")=e=0 ;

Equilibriocultivosplantas(i,j,t).. CS(i,j,t)=e=Q(i,j,t);

capacidaddelasplantas(j,t).. sum((i),Q(i,j,t))=l=cep(j,t);

Equilibrioplantarefinerías(j,t).. Rac * sum((i),Q(i,j,t))=e=sum((k),y(j,k,t));

Equilibrioaceitebiod (k,t)..Rbd * sum (j,y(j,k,t))=e= sum(l,ZA(k,l,t));

Capacidadcamiones(i,j,t)..Q(i,j,t)=l=CPC * Nc(i,j,t);

Capacidadrefinerías(k,t).. sum((j),y(j,k,t))=l=(cpr(k,t));

Capacidadcarrotanqueextractora(j,k,t).. y(j,k,t)=l=cpcr*(np(j,k,t));

Capacidadcarrotanquesrefinería(k,l,t)..ZA(k,l,t)=l=CPCR * Nr(k,l,t);

Equilibriomayoristas(l,t).. IN(l,t-1)\$ (ord(t)>1)+
 sum((k),ZA(k,l,t))=e=sum(ma,ZBa(l,ma,t))+sum(mb,ZBb(l,mb,t)) + IN(l,t);

Capacidaddealmacenamiento(l,t).. IN(l,t)=l=calt;

Capacidadcarrotanquesmayora("l1",ma,t)..ZBa("l1",ma,t)=l=CPCR * Nma("l1",ma,t);

Capacidadcarrotanquesmayorb("l2",mb,t)..ZBb("l2",mb,t)=l=CPCR * Nmb("l2",mb,t);

Demandaclientesma("l1",t)\$ (ord(t)>2).. sum((ma),ZBa("l1",ma,t))=e= sum(ma, da(ma,t));

Demandaclientesmb("l2",t)\$ (ord(t)>2).. sum((mb),ZBb("l2",mb,t))=e= sum(mb, db(mb,t));

model Cadena /all/;

solve Cadena using mip minimizing z;

Display X.l, Y.l, Q.l, ZA.l, ZBA.l, ZBB.l, IN.l, Nr.l, Nc.l, Nma.l, Nmb.l;

BIBLIOGRAFÍA

1. Achten W.M.J, Verchot L., Franken Y.J., Mathijs E., Singh V.P, Aerts R., Muys B., *Jatropha* bio-diesel production and use, *Biomass and bioenergy*, volume 32, 2008, páginas 1063-1084.
2. Berchmans Hanny Johanes, Hirata Shizuko, [Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids](#), *Bioresource Technology*. [New York, NY]: Elsevier Ltd., v. 99, 6, pág 1716, abril de 2008.
3. Cano-Asseleih, L. M., Chemical investigation of *Jatropha curcas* L. seeds. Ph.D. Thesis, 1986, University of London, U.K.
4. Cano-Asseleih, L.M., Plumbly, R.A., Hylands, P.J, Purification and partial characterization of the hemagglutination from seeds of *Jatropha curcas*. *Jour. Food Biochem*, 1989, volumen 13, páginas 1–20.
5. Cenipalma, Ecopetrol, SI99 S.A, Fedepalma, Informe avance Proyecto biodiesel- TM 2008, septiembre de 2008.
6. Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación, CONPES 3510, marzo de 2008.
7. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, Informe: Unidos por el Clima, 2007.
8. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Indicadores de mercado laboral, Serie Trimestral 2001 - 2008. Total Nacional, Cabeceras, Zona Rural.
9. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Indicadores de mercado laboral. Serie semestral 2001 - 2006. Regiones - Zona Rural.
10. ECOPETROL, Estructura de precios de combustible líquidos precios vigentes desde el 1 de octubre de 2008, tomado de <http://www.ecopetrol.gov.co/contenido.aspx?catID=192&conID=36336>, consultado el 19 de octubre de 2008.
11. Ecopetrol, Informe: Estudio preliminar de Mercados de glicerina y subproductos, marzo de 2008.

12. Ecopetrol, el biodiesel pide pista, http://www.ecopetrol.com.co/especiales/CartaPetroleraDic06/rev_empresa.htm, consultado en septiembre del 2008.
13. Federación Nacional de cultivadores de Palma de Aceite, Anuario estadístico 2007, mayo de 2008.
14. Garnayak D.K., R.C. Pradhan, S.N. Naikand N. Bhatnagar, Moisture-dependent physical properties of *Jatropha* seed (*Jatropha curcas* L.), pág 123 y 124, octubre de 2007.
15. García Jorge Luís, Noriega Salvador A., Díaz Juan José, De la Riva Jorge, Aplicación del Proceso de Jerarquía Analítica en la selección de tecnología agrícola, Agronomía costarricense, marzo de 2006.
16. Ghiani Gian Paolo, Laporte Gilbert, Musmanno Roberto, Introduction to logistics system planning and control, pág 74-98 ed. Willey, 2004.
17. Gubitz, G.M., Mittelbach, M., Trabi, M., 1999. Exploitation of tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. Bioresource Technology 67, 73–82.
18. Gutiérrez-Fernández, F et al. 2007. Propuesta de un sistema de indicadores de sostenibilidad para áreas naturales con uso turístico. XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. LUGO, 26-28 Septiembre, 2007.
19. Gutiérrez Franco Edgar, Tesis de Maestría, Modelo de optimización para la red de suministro de biodiesel en Colombia, Universidad de los Andes, 2008.
20. Heller, Joachim, Physic nut. *Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 1. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/ International Plant Genetic Resources Institute, 1996, Rome.
21. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, zonificación de los conflictos de uso de las tierras en colombia, Capítulos I, II, III y IV, Bogotá, 2002.
22. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Atlas de Colombia quinta edición en versión CD Room 1 y 2, Capítulos I, II, III, IV y V, 2001.
23. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Atlas Climático, 2005.
24. Kalbande S. R. & More G. R. & Nadre R. G., Biodiesel Production from Non-edible Oils of *Jatropha* and *Karanj* for Utilization in Electrical Generator, bioenergy research, 2008, páginas 170-178.
25. Kumar Ashwani, Sharma Satyawati, [An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses \(*Jatropha curcas* L.\): A review](#), Industrial Crops and Products, Volume 28, Issue 1, July 2008, Páginas 1-10.
26. Landeta Jon, El método Delphi, Editorial Ariel, 1999, Barcelona.

27. Linstone H. A., Turoff M., 1977, *The Delphi Method*, Londres, Addison-Wesley Publishing Co. 1977, páginas 433-462.
28. Moritz Fleischmann; Patrick Beullens, Jacqueline M Bloemhof-Ruwaard, Luk N. Van Wassenhove, The impact of product recovery on logistics network design, *Production and Operations Management*, 2001, volumen 10, número 2, página 156-166.
29. Mapa vial y turístico de Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2005.
30. Mapas de Ruta IGAC escala 1:700.000; Ruta 1, Ruta 2, Ruta 3, Ruta 4, Ruta 5.
31. Masood A. Badri, Amr K. Mortagy, Colonel Ali Alsayed, [A multi-objective model for locating fire stations](#), *European Journal of Operational Research*, Octubre de 1998, Páginas 243-260.
32. Ministerio de Agricultura, Logros cultivos priorizados y otros cultivos, estadística área sembrada en Hectáreas, 2008.
33. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Observatorio Agrocadenas Colombia, La Industria de aceites y grasas en Colombia, Bogotá, Junio de 2005.
34. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Plan de Acción Nacional, Lucha contra la desertificación y la Sequía Pan, 2005.
35. Ministerio de Transporte de Colombia, Oficina Asesora de Planeación, Diagnóstico del Sector Transporte, 2008.
36. Mogollón, Ruth Maritza, Proceso analítico jerárquico y su aplicación para determinar los usos de las tierras, caso Brasil, proyecto regional "información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible", 2000.
37. Molano Adriana, Tesis de Maestría Modelo de localización de áreas urbanas para construir nuevos parques vecinales en Bogotá, Universidad de los Andes, Bogotá, 2007.
38. Mundo Energía, 150 Asistentes a la I Conferencia sobre *Jatropha* curcas, consultado en <http://www.mundoenergia.com/asistentes-conferencia-jatropha-curcas.html> el 30 de septiembre de 2007.
39. Noori Hamid, Radford Rusell, Administración de Operaciones y Producción: Calidad Total y respuesta sensible rápida, Mc Graw Hill, Bogotá, Colombia, 1997, páginas 90-121.
40. Oboulhas Conrad Tsahat onesime, Xu Xiaofei and Zhan Dechen, A Decision Support System for Supplier Selection Process *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 2004, Volumen 3, Número 3, páginas 453-470.
41. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Informe: El estado de la Inseguridad Alimentaria en el Mundo, 2006.
42. Policía Nacional, CEACS, Región Capital, Bogotá Cundinamarca consultado en http://www.ceacsc.gov.co/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=62&Itemid=199 en enero de 2009.

43. Policía Nacional, Dirección de Investigación Criminal, Delitos de impacto periodo de 01 de enero a 31 de octubre años 2006-2007.
44. Pramanik K. Properties and use of *Jatropha curcas* oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Renewable Energy*, 2003, volumen 28, páginas 239–248.
45. Prawda, Métodos y modelos de Investigación de Operaciones, vol. 2, Editorial Limusa, México, 1996, páginas 579-626.
46. Saaty Thomas Método Analítico Jerárquico (AHP): Principios Básicos en: Evaluación y Decisión Multicriterio, Reflexiones y Experiencias, editado por Eduardo Martínez y Mauricio Escudey, Editorial Universidad de Santiago, 1998, páginas 17-46.
47. Sirisomboon P., Kitchaiya P., Pholpho T., Mahuttanyavanitch W., Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L, fruits, nuts and kernels, *Biosystems Engineering* , 2007, Volumen 97, número 2 , páginas 201-207.
48. Sotolongo Pérez, José A., Evaluación de las fuentes de energía, sus potencialidades y principales impactos medioambientales en la provincia de Guantánamo, *Tecnología Química*, volumen XXVII, páginas 76-82.
49. Stepanov Alexander, Smith MacGregor James, Multi-objective evacuation routing in transportation networks, *European Journal of Operational Research*, 2009, páginas 435-446.
50. SciDev.Net, India aprueba aumento de combustibles (artículo en Internet), consultado en <http://www.wbcsd.org/templates/TemplateWBCSD5/layout.asp?type=p&MenuId=MQ&doOpen=1&ClickMenu=LeftMenu>, consultado el 17 de septiembre de 2008.
51. Takeda, Y., 1982. Development Study on *Jatropha curcas* (Sabu Dum) Oil as a Substitute for Diesel Engine Oil in Thailand, Interim Report of the Ministry of Agriculture, 1982, Thailand.
52. Tapanes Neyda C. Om, Gomes Aranda Donato A., Mesquita Carneiro José W. de, Ceva Antunes Octavio A., Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction, Elsevier, 2008, páginas 2286-2294.
53. Vélez Ignacio, Decisiones empresariales bajo riesgo e incertidumbre, Editorial Norma, Bogotá, 2003.

