

*Revista Electrónica Nova Scientia*

Determinación de puntos óptimos para la  
localización e implantación de plantas de  
biodiésel en el estado de Tocantins  
Determination of optimal points to the location and  
establishment of biodiésel plants in the state of  
Tocantins

**Karyn Siebert Pinedo<sup>1, 2</sup> y Christian José Quintana Pinedo<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Universidad Federal do Tocantins, Brasil

<sup>2</sup> Centro Educacional Claretiano, Brasil

---

**Brasil**

*Karyn Siebert Pinedo.* E-Mail: [karynpinedo@yahoo.com.br](mailto:karynpinedo@yahoo.com.br)

© Universidad De La Salle Bajío (México)

## Resumen

Este trabajo tiene como objetivo mostrar el resultado de un análisis realizado en el Estado de Tocantins (Brasil) con la finalidad de determinar los puntos óptimos para la instalación de usinas para la fabricación de biodiésel. Para este análisis fueron considerados las variables del tipo transporte, producción, almacenamiento, abastecimiento de materia prima como sebo, aceite o cualquier otro producto que pueda servir para producir biodiésel. Sabemos que en tiempos actuales para obtener un buen resultado, las empresas tienen que centrarse en un análisis riguroso de la cadena logística, que tiene como objetivo a un menor costo posible hacer que los productos y servicios queden disponibles en algún lugar donde sea necesario. Para obtener los resultados usamos en nuestro modelo matemático la Programación Lineal Entera Mixta (PLEM) y después la técnica de escenarios afín de obtener un resultado satisfactorio.

**Palabras clave:** biodiésel, logística, optimización, Programación Lineal Entera Mixta, escenarios.

*Recepción:* 19-08-2011

*Aceptación:* 06-10-2011

## Abstract

This work aims to show the result of an analysis conducted in the State of Tocantins (Brazil) in order to determine the optimal points for the installation of plants for the manufacture of biodiesel. For this analysis were considered variables such transportation, production, storage, supply of raw materials such as grease, oil or any other product that can be used to produce biodiesel. We know that in modern times to get a good result, companies have to focus on a rigorous analysis of the logistics chain, aimed at a lower cost may make the products and services are available somewhere where necessary. To get the results we use in our mathematical model Mixed Integer Linear Programming (PLEM) and after scenarios related technique to obtain a satisfactory result.

**Key words:** biodiesel, logistics, optimization, Mixed Integer Linear Programming (MILP), scenarios.

## Introducción

Estamos viviendo una nueva época de cambios e innovaciones tecnológicas, empresariales y de paradigmas sociales y ambientales. Los cambios de gestión traen ideas nuevas en el sector empresarial que, dentro de las empresas pueden generar impactos tanto en el área interna cuanto en el área externa (medio ambiente). Podemos observar una creciente preocupación por el medio ambiente, a fin de contribuir con el bienestar de los trabajadores y su idoneidad para con su centro de trabajo. Las nuevas tecnologías relacionadas con la informática contribuyen para que el trabajador pueda desempeñar cada vez más sus funciones y tenga la opción de elegir realizarlo dentro de la empresa o fuera de ella.

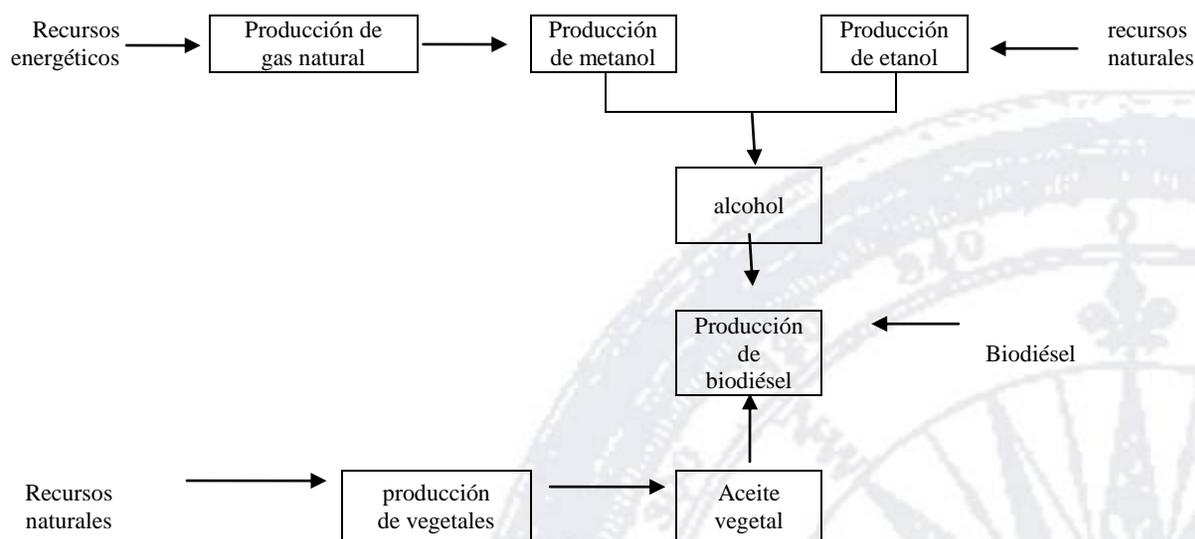
Las empresas e industrias de diversos sectores de actividad utilizan la logística dentro de un proceso estratégico para mantener la eficiencia de las operaciones de producción y distribución. La logística empresarial engloba de forma coordinada todos estos factores, incluyendo la instalación de fábricas, distribuidoras y estudio de factibilidad económica (logística) de los puntos óptimos de ubicación. El transporte de cargas es un servicio fundamental en la cadena de producción y distribución de bienes industriales y agrícolas, y se destaca en la economía del Brasil porque el país tiene dimensiones continentales. La preocupación de las empresas y las industrias en relación a la localización está estrechamente relacionada con la disponibilidad de materias primas, mano de obra y distribución de energía a los puntos de consumo de su producto.

El biodiésel es un biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiesel o gasóleo obtenido del petróleo.

Para la realización del estudio sobre la localización óptima de usinas de biodiésel elegimos para nuestro caso de estudio el Estado de Tocantins en Brasil. Los datos principales y secundarios, tales como: gastos de transporte, demografía, producción de semillas aceitosas, municipios que producen otro tipo de materias primas del tipo aceites y sebo óptimos para la producción de biodiésel también fueron considerados. Datos estadísticos sobre el ganado y los datos de las operaciones con transporte fueron recaudados de los principales municipios del Estado de

Tocantins. El resultado de este trabajo tiene como objetivo determinar los municipios que podrían ser lugares óptimos para la instalación de usinas de producción de biodiésel, considerando menores costos de transporte, de materia prima y distribución del producto final a los centros de consumo.

La ventaja de producir biodiésel de diversas materias primas, es que este producto puede ser obtenido a partir de varias materiales tales como la mamona, el algodón, la soya, el piñón-manso, así como de aceite utilizado en frituras en todos los hogares y sebo de ganado, etc., independiente de las fuentes utilizadas en los procesos, la obtención del biodiésel para estas materias primas son semejantes, apenas variando las dosis y los diagramas de maza. O sea, por el hecho de que los ácidos, componentes de los aceites vegetales, se encontrasen en diferentes porcentajes, en cada uno de ellos, las proporciones de cada uno y la necesidad de aditivos para remover los residuos dependen de un análisis caso a caso para resultar en un producto final que atienda las especificaciones. La figura 1.1 muestra las etapas de producción de biodiésel a partir de varias materias primas.



**Figura 1.2:** Etapas del proceso de fabricación de biodiésel.

**Fuente:** Camargo (2007). <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-07012008-175208/pt-br.php>

Para lograr el objetivo de este análisis de los puntos óptimos, fue necesario minimizar una función objetivo mediante la utilización de Programación Lineal Entera Mixta (PLEM). Esta función objetivo se determinó con variables de producción, localización, marketing, costos de

transporte y coeficientes correctores de los datos. Fueron inicialmente considerados, tres variables principales: (i) Zonas de consumo, (ii) Municipios productores de materias primas; (iii) Situación de diferentes tipos de transporte (fluvial, terrestre y férreo). Elegimos las ciudades que de alguna manera fueron consideradas dentro de los tres principios generales para la elección del punto óptimo de su ubicación.

### **Problemas de localización**

El análisis de los problemas de localización es un área de estudio desde el comienzo del siglo pasado. El primer modelo de localización fue propuesta por Alfred Weber en 1909 y dominó la literatura por muchos años. Sin embargo, el campo unificado del estudio denominado "Ubicación de Instalaciones" emerge en la década de 1960, con la investigación de Hakimi, publicado en 1964, donde presenta importantes resultados en la teoría de localización y el interés que generó fue grande entre los investigadores (Hakimi, 1964).

Los problemas de localización, en su forma más general, pueden describirse como sigue. Un conjunto de clientes distribuidos espacialmente en un área geográfica requieren de un determinado producto o servicio específico. La demanda de los clientes debe estar atendida por una o más instalaciones. Las instalaciones pueden operar dentro de un marco de cooperación o competencia, en función de los productos y servicios solicitados por los clientes. El proceso de decisión establece dónde ubicar las instalaciones en el territorio deseado, teniendo en cuenta las necesidades del cliente y las restricciones geográficas. Entre los problemas de ubicación se pueden identificar tres elementos esenciales. (i) Las instalaciones, que denotan un conjunto de objetos para ser ubicados a fin de prestar servicio o producto. (ii) Los locales, que se refieren a un conjunto de todos los puntos posibles para colocar las instalaciones. (iii) Los clientes que son usuarios finales y necesitan determinados servicios específicos o productos (Owen, 1994).

El término localización se utiliza para referirse a una variedad de bienes y servicios de puntos de instalación o ubicación óptima de edificios, tales como almacenes, fábricas, escuelas, hospitales, centros comerciales, edificios públicos, a fin de optimizar su relación con los ya existentes. Las principales propiedades que caracterizan a estas instalaciones son: su número y tipo. En varios modelos de localización, el número de instalaciones está fijado a priori. En el caso que se

determina localizar solo una instalación en un espacio o territorio en particular es un problema de instalación simple. Pero en el caso general, el modelo considera, a la vez, varias instalaciones y se llama problema de servicios múltiples (Owen, 1994).

Otra propiedad importante para la instalación viene dada por el tipo específico y sus características, tales como la capacidad de servicio y consideraciones sobre su estructura. En los casos simples, cuestiones de ubicación requieren de instalaciones idénticas para prestar el mismo servicio o producto. Los modelos de localización también pueden ser diferenciados en función del servicio sencillo o servicio múltiple, con base en la capacidad de la instalación para suministrar un o más tipos de servicios o productos. Algunos problemas de localización admiten instalaciones donde se considera la capacidad ilimitada, mientras que otros buscan la mejor localización, con una producción limitada. Por lo tanto, los problemas de localización también se pueden clasificar como capacitadas o no capacitadas (Owen, 1994).

También de acuerdo con el autor el factor clave para los modelos de localización es el lugar físico donde será ubicada la instalación. El conjunto de puntos óptimos para la ubicación se llama comúnmente de “espacio de soluciones” y se puede representar de manera continua, discreta o en forma de red que son:

- **El espacio discreto:** Cuando se puede especificar en una lista de posibles lugares para ubicar las instalaciones. En este caso, ofrece flexibilidad, ya que es posible incorporar características al modelo de tipo geográfico y económico.
- **Espacio continuo:** Se consideran los problemas en el espacio euclidiano. El caso más típico, es considerar un espacio euclidiano de dos dimensiones.
- **Representación de las redes:** Para muchas aplicaciones en las que se consideran servicios públicos y privados, se estudian los problemas de localización en la que se debe operar con una red de determinadas infraestructuras (red viaria, red fluvial, red ferroviaria, red de aeropuertos, tuberías. etc.), generalmente representado por un gráfico. Los problemas de red puede ser discretos o continuos, comúnmente las estaciones de servicio pueden estar situados en los vértices del gráfico que representa en contrapartida la red de infraestructuras. Cuando un modelo se define por una representación de red, el gráfico puede adoptar diversas formas: (i) gráfico dirigido (ii) gráfico no direccionado.

Para Rezende (2003), los problemas de localización surgen de la necesidad de ubicar los centros para satisfacer la gran demanda de una gama de clientes. La palabra "cliente" se utiliza para designar los objetos que requieren acceso a un servicio o la demanda del producto. En un intento de examinar las cuestiones de localización, debe interactuar con los clientes, por lo que es necesario conocer su distribución, aplicación y uso compartido.

- Para la distribución hay que suponer que la carga por cliente se distribuye uniformemente o estén situados en un punto específico o en los vértices de una red.
- En el caso de la demanda, a cada cliente se le asigna un valor que expresa la cantidad de servicio requerido. La acción puede representar la cantidad del producto o servicio solicitado por un usuario o área o región geográfica. En ambos casos, no puede ser conocido con certeza.
- La última característica del cliente es el comportamiento. En algunos casos, el cliente es libre de elegir la instalación que desea ser servido, y lleva a la pregunta: ¿El cliente siempre va a la instalación más cercana o utiliza de otros criterios y preferencias para elegir una instalación? Además, los clientes pueden actuar individualmente o en grupos.

Un problema clásico de localización es el problema de la  $p$ -mediana. Este problema en su forma más simple se caracteriza por el tipo de instalaciones y su ubicación con el cliente. La ubicación de los locales no tiene limitaciones de capacidad. El número de instalaciones se establece de acuerdo a un parámetro  $p$ , y se ofrecen el mismo servicio. Los clientes requieren una cantidad fija de bienes o servicios y comodidad, y siempre optan por la asistencia de la instalación más cercana a su domicilio. La relación con los lugares se expresa a través de una función de distancia que representa el camino más corto en la red para llegar a su ubicación (Rezende, 2003).

Con cierta frecuencia, las empresas o los grandes inversores se encuentran frente a situaciones en las que existe la necesidad de elegir alternativas favorables. A veces, estas situaciones pueden ser limitadas al conocimiento de algunos conceptos de costos. Sin embargo, hay otras situaciones en que los empresarios y los inversores enfrentan problemas importantes relacionados con los recursos limitados de la producción, distribución, ventas y otros factores (Rosa, 2005).

En estos casos, los empresarios necesitan herramientas más adecuadas a fin de evitar estos factores limitantes para tomar decisiones, operaciones de control y simulación del rendimiento. En este caso es necesario el uso de programación lineal como una técnica matemática que permite la ayuda en la elección de la mejor decisión.

En cualquier rama del conocimiento, una teoría es un conjunto de ideas, experiencias, propiedades, fenómenos causales, teoremas, etc. lo que hace un todo coherente. Estas teorías se han desarrollado para explicar un mayor número de hechos o fenómenos en virtud de leyes generales o universales. Toda teoría, por su naturaleza, es amplia y general.

A partir de la realidad observada, analizada por una línea óptica con una postura teórica particular, tratamos de identificar los elementos relevantes del sistema y las relaciones. Con estos elementos y relaciones estructuradas a través de lenguaje formal, matemático, analógico, gráficos, etc. Se construye una representación del sistema real, que se llama Modelo (Alvarenga, 2001).

De acuerdo con Alvarenga (2001) un modelo representa un único punto de vista o escenario de un fragmento del todo. Normalmente, para estudiar un fenómeno complejo, varios modelos se crean con la intención de construir una imagen simplificada de la realidad. Un modelo matemático es una representación simplificada o la interpretación de la realidad o una interpretación de un fragmento de un sistema, según una estructura de conceptos mentales o experimentales. Los modelos matemáticos se utilizan en prácticamente todos los ámbitos de la ciencia, por ejemplo, en biología, química, física, economía, ingeniería y matemática pura.

En la aplicación de modelos es común el uso de algoritmos y procesos heurísticos. Un algoritmo es una secuencia finita de instrucciones bien definidas y sin ambigüedades, cada una de las cuales se puede ejecutar mecánicamente en un período de tiempo finito y con una cantidad finita de esfuerzo. El concepto de algoritmo se ilustra a menudo cuando, por ejemplo usamos una receta de cocina, aunque muchos algoritmos son más complejos. Ellos pueden repetir los procesos, hacer interacciones o requerir decisiones (como la lógica) hasta que la tarea sea completada (Schwartz, 1999).

Para que un algoritmo se desarrolle correctamente y sea ejecutado debe estar con sus premisas apropiadas para el problema real que debemos resolver. Un algoritmo no representa necesariamente un programa de computadora, y si los pasos necesarios para completar una tarea.

Es esencial que estas suposiciones sean adecuadas para el sistema. De lo contrario, las soluciones pueden ser matemáticamente óptimas, pero no representan la realidad de las operaciones (Bandera, 2006).

La Investigación Operacional (IO) o Investigación Operativa (O) es una rama interdisciplinaria de la matemática aplicada que utiliza modelos matemáticos y algoritmos estadísticos para ayudar en la toma de decisiones y problemas de logística. Se utiliza principalmente para analizar sistemas complejos del mundo real, por lo general con el objetivo de mejorar o aumentar el rendimiento.

En este artículo, se optó por utilizar un modelo matemático - PLEM - para alcanzar los objetivos propuestos, que consiste en determinar la localización de puntos óptimos para instalación de refinerías de biodiésel en el Estado de Tocantins (Brasil).

### **Método**

Debido a la cantidad de datos, los cálculos usados en la Programación Lineal Entera Mixta (PLEM) fueron trabajados mediante Excel, lo que permitió elegir los datos que se utilizaron en el modelo matemático y la realización de los escenarios. Fueron utilizados como premisas: 1) Los municipios del Estado con más de 10,000 habitantes o aquellos que están clasificados con actividad económica de “ingresos altos” según el IBGE (2009), 2) En cada municipio se instalará una usina, 3) los municipios productores de oleaginosas que pueden ser transformados en biodiésel como sebo aceite de cocina como materia prima, 4) descentralización de la producción, 5) municipios cercanos a diversos medios de transporte, 6) distancia máxima de 500 km entre una usina hasta la ciudad considerada como una zona de consumo; 7) la capacidad de producción de cada usina, como máximo de 10,000 de litros semanales, 8) todas las usinas con el mismo costo de instalación; 9) la misma capacidad de producción y almacenamiento de todas las usinas; 10) Cuando el proveedor de materias primas, área de consumo y la usina coinciden en el mismo punto (ciudad) se considera 1 km para de distancia entre ellas.

Con los datos de clasificación de la población y la economía de los principales puntos donde será distribuido el biodiésel obtuvimos un grupo de 32 puntos. A estos puntos de distribución se estima el factor que relaciona la cantidad de vehículos que consumirán biodiésel, ese factor es igual a 0,125 veces el número de habitantes. Por ejemplo, en el municipio de Araguaina habitan 115.759 habitantes, luego por el factor de relación, tendríamos que 14.702 vehículos serían los consumidores de biodiésel. Los 32 puntos de zona de consumo serán clasificados en nuestra “función objetivo” con el índice  $i = 1, 2, 3, \dots, 30, 31, 32$ .

Según los datos del IBGE (2007) señala que la ciudad de Araguaina tiene la mayor concentración de granos oleaginosos y carne. Teniendo este municipio un gran potencial para la instalación una usina, este municipio podría proporcionar la materia prima y ser un gran consumidor del producto final. Después de ser considerado los municipios por la capacidad de producción de materias primas, que también fueron analizados por la ubicación geográfica, teniendo en cuenta el transporte terrestre, fluvial y el férreo, fueron considerados 26 puntos óptimos, cada proveedor de la materia prima se identifica con un número de código de  $k = 1, 2, 3, \dots, 23, 24, 25, 26$ :

Estos municipios además de tener una capacidad de producción de materia prima, su ubicación permite la disposición final del producto y la recepción de materia prima, utilizando uno o más tipos de “modales” disponibles en el Estado, por lo que algunos están cerca de la carretera, vías navegables y el otro etc.

Según fuentes del IBGE (2009), los puntos óptimos en condiciones de proporcionar materia prima para la producción de biodiésel son: 1) Araguaina, 2) Nova Olinda, 3) Palmeirante, 4) Darcinópolis, 5) Gurupi, 6) Brejinho de Nazaré, 7) Figueirópolis, 8) Alvorada, 9) Guarai, 10) Brasilândia do Tocantins, 11) Tupirama, 12) Tupiratins, 13) Presidente Kennedy, 14) Formoso do Araguaia, 15) Araguaçu, 16) Lagoa da Confusão, 17) Dianópolis, 18) Santa Rosa do Tocantins, 19) Mateiros, 20) Campos Lindos, 21) Porto Nacional, 22) Monte do Carmo, 23) Pedro Afonso, 24) Bom Jesus do Tocantins, 25) Silvanópolis, 26) Santa María do Tocantins. En nuestro modelo,  $k=8$  se refiere a la ciudad de Alvorada.

El punto óptimo para la instalación de una usina de biodiésel será aquel que pueda cumplir con los requisitos de ofrecer el menor costo de instalación, mayor facilidad de flujo a un menor costo de transporte y producción, así como la recepción de materias primas y estar cerca del centro de consumo y la adquisición de mano de obra calificada.

Para el análisis, el modelo adecuado para nuestro propósito es dado por la función objetivo.

$$Z = \sum_{j=1}^{25} \sum_{k=1}^{26} C_{kj} U_{kj} + \sum_{j=1}^{25} \sum_{i=1}^{32} D_{ij} w_i X_{ji} + \sum_{j=1}^{25} \sum_{r=1}^R F_{rj} Y_{rj} \quad (3.0)$$

Nuestra meta es minimizar nuestra “función objetivo”, esto es, estudiar el resultado de la función

$$\text{mín. } Z = \sum_{j=1}^{25} \sum_{k=1}^{26} C_{kj} U_{kj} + \sum_{j=1}^{25} \sum_{i=1}^{32} D_{ij} w_i X_{ji} + \sum_{j=1}^{25} \sum_{r=1}^R F_{rj} Y_{rj} \quad (3.1)$$

Las restricciones para este modelo son:

$$\sum_{j=1}^{25} X_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 32 \quad (3.2)$$

Esta ecuación (3.2) restringe el abastecimiento de la demanda de cada zona de consumo  $i$  por algunas usinas  $j$  (proveedores), aquí consideramos la producción total semanal como un todo, representado por la unidad. El municipio de Araguaína queda solamente con el 80% de su producción y distribuye los otros 20% para el municipio de Wanderlândia.

Esta previsto para Palmas una demanda de 60 mil litros de biodiésel por semana recibida de las usinas: Peixe la cantidad de 8.000 litros; Lagoa da confusão la cantidad de 10.000 litros; Dianópolis la cantidad de 1.000 litros; Arraias 3.000 litros; Natividade 8.000 litros; Concepción do Tocantins 10.000 litros; Santa Rosa do Tocantins 10.000 litros; São Felix do Tocantins 10.000 litros.

$$\sum_{j=1}^{25} w_i X_{ij} \leq \sum_{r=1}^R r_j Y_{rj} \quad \forall j = 1, 2, 3, \dots, 25 \quad (3.3)$$

La restricción representada por la ecuación (3.3) garantiza que la demanda de las zonas de consumo sea inferior a la capacidad de entrega por los proveedores  $j$ . Estamos trabajando con una prevista de entrega diferenciada para diferentes municipios.

$$\sum_{r=1}^R r_j Y_{rj} \leq 1 \quad \forall j = 1, 2, 3, \dots, 25 \quad (3.4)$$

La ecuación (3.4) permite que la capacidad máxima de 10.000 litros semanales sean atribuidos a cada usina. En todo este trabajo estamos considerando la capacidad de producción  $r_j$  constante para todas las usinas, pues todas tienen las mismas características de producción y tienen estoque suficiente para la entrega.

$$\sum_{i=1}^{32} w_i X_{ij} \leq \sum_{k=1}^{26} U_{kj} \quad \forall j = 1, 2, 3, \dots, 25 \quad (3.5)$$

La ecuación (3.5) asegura que la suma de la demanda de las zonas de consumo  $i$  no sobrepasen la capacidad de producción de la usina  $j$  con la materia prima recibida de todos los proveedores  $k$ , aquí estamos suponiendo que con cinco toneladas de materia prima se obtenga 10.000 litros de biodiésel

$$\sum_{j=1}^{25} U_{kj} \leq v_k \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots, 26 \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) da garantías que la cantidad del producto distribuido por la usina  $j$  sea inferior a la capacidad de producción del proveedor de materia prima  $k$ .

$$Y_{rj} \in \{0, 1\} \quad (3.7)$$

La ecuación (3.7) es la variable binaria entera positiva, será uno, si la usina  $j$  con capacidad  $r$  tiene biodiésel para pronta entrega; cero caso contrario.

$$U_{ij} \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 22, \quad \forall j = 1, 2, 3, \dots, 25 \quad (3.8)$$

La ecuación (3.8) indica que la cantidad de producto transportado del proveedor **k** para La usina **j** (toneladas), siempre existirá. Será considerada una distancia mínima de un kilómetro cuando el proveedor **k** de la materia prima es del mismo punto de la instalación de la usina **j**.

La variable  $C_{kj}$  representa el costo unitario de transporte por tonelada y kilómetro transportado de materia prima del proveedor **k** para la usina **j**, al precio de mercado U\$ 0,41 tonelada a cada kilómetro transportado. Podemos suponer que la cantidad transportada de materia prima  $U_{kj}$  es constante igual a cinco toneladas diarias (**k** para la usina **j**), así obtenemos  $C_{kj} U_{kj}$  que será la primera componente de nuestra función objetivo (3.1). El costo parcial ocasionado por el transporte del proveedor **k**, hasta la usina **j** se muestra en el cuadro 3.2.

Siendo la variable  $U_{kj} = 5$  toneladas la cantidad de producto transportado del proveedor **k** para la usina **j** (en toneladas) tendremos el costo preliminar. Un resultado parcial se muestra en el cuadro 3.1 a seguir.

**Cuadro 3.1:** Costo total de transporte de materia prima del proveedor **k** para la usina **j** (U\$/ 5000 kilos)

		Proveedor de materia prima							
		Araguaina	Nova Olinda	Palmeirante	Darcinópolis.	Gurupi	Brejinho de Nazaré	Figueirópolis	Alvorada
Instalación de usinas	Araguaina	2,03	117,57	194,59	174,32	1.083,78	948,65	1.383,78	1.264,86
	Arapoema	297,30	202,70	281,08	391,89	1.010,81	840,54	1.113,51	1.200,00
	Tocantinópolis	337,84	410,81	394,59	137,84	1.378,38	1.197,30	1.497,30	1.559,46
	Araguatins	513,51	629,73	564,86	272,97	1.597,30	1.475,68	1.621,62	1.802,70
	Gurupi	1.083,78	967,57	1.002,70	1.424,32	2,03	214,86	111,62	182,43
	Alvorada	1.264,86	1.148,65	1.189,19	1.464,86	182,43	386,49	95,41	2,03
	Peixe	1.232,43	1.116,22	1.048,65	1.475,68	148,11	249,46	172,43	198,65
	Guarai	391,89	272,97	275,68	572,97	694,59	554,05	835,14	916,22
	Araguacema	916,22	800,00	481,08	702,70	675,68	616,22	832,43	918,92
	Caseara	1.067,57	1.005,41	632,43	837,84	575,68	564,86	756,76	845,95
	Palmeirópolis	1.605,41	1.489,19	1.432,43	1.570,27	400,00	524,32	289,19	222,97

El cuadro 3.2 muestra un primer resultado parcial para la ecuación (3.1), esto es, representa el costo en reales R\$ del transporte de la materia prima del proveedor  $k$  para la usina  $j$ , todos los proveedores entregan la misma cantidad en toneladas a todas las 25 usinas. Para el caso de un proveedor  $k$  de materia prima tuviese que entregar a la usina  $j$  situada en el mismo local, fue considerado una distancia fija de un kilómetro.

En la siguiente etapa se calcula los costos con transporte del biodiésel para las zonas de consumo. Consideremos la variable  $X_{ij}$  en el intervalo  $0 < X_{ij} \leq 1$ , si la zona de consumo  $i$  recibe el producto de la usina  $j$  (máxima distancia entre ellas de 500 km);  $X_{ij} = 0$ , caso contrario (distancia entre ellas sea mayor que 501 km) o para el caso que la zona de consumo  $i$  no reciba producto de la usina  $j$  en el cuadro 3.13 en Pinedo (2010) se muestra como fue realizada una análisis de cuanto cada municipio necesitará para quedar abastecido de biodiésel.

**Cuadro 3.2:** Costo total de transporte en U\$ de materia prima del proveedor  $k$  para cada usina  $j$ .

$\sum_{k=1}^{26} C_{kj} U_{kj}$ = Suma total del costo de transporte del proveedor $k$ de materia prima para una usina $j$ , cada proveedor entrega una misma cantidad $U_{kj}$ a cada usina					
Instalación de usinas	Costo U\$	Instalación de usinas	Costo U\$	Instalación de usinas	Costo U\$
Araguaina	19.456,08	Caseara	17810,81	Formoso do Araguaia	17349,05
Arapoema	18.515,68	Palmeirópolis	22850	São Felix do Tocantins	16887,3
Paraná	20.851,35	Tupiratins	13667,97	Concepcion do Tocantins	20270,27
Araguatins	31986,49	Tocantinópolis	26167,57	Santa Rosa do Tocantins	15736,89
Gurupi	16064,46	Araguazu.	23602,03	Lagoa da confusão	16758,24
Alvorada	19153,65	Dianópolis	19839,86	Campos lindos	24229,05
Peixe	17170,00	Arraias	26948,65	Porto Nacional	15054,46
Guarai	12880,95	Natividade	16794,32	Santa Maria do Tocantins	15522,03
Araguacema	17110,81				

Por ejemplo, para una planta instalada en Araguaína del total de su producción 80% (8.000 litros) queda en el punto de consumo de Araguaína, los otros 20% (2.000 litros) son distribuidos para Wanderlândia, así tenemos  $X_{11} = 0,8$  y  $X_{15} = 0,2$ , como la usina localizada en Araguaína no distribuye para los otros puntos de consumo se tiene que  $X_{ij} = 0$ . La usina de Tupiratins distribuye para Araguaína 20% , luego  $X_{21} = 0,2$ , para Nova Olinda 10%, luego  $X_{22} = 0,1$ ,

para Colinas do Tocantins 20% luego  $X_{(2)(1)} = 0.2$ , para Miranorte 20% luego  $X_{(2)(1)} = 0.2$ , también distribuye para Araguañã y Wanderlândia.

Los datos de las  $w_j$  del cuadro 3.3 en Pinedo (2010) son calculados teniendo como referencia la población de cada municipio, mediante el factor de 20% del total da población para las zonas de consumo que representan los principales municipios con un buen desarrollo económico y el factor de 13,33% para las otras zonas de consumo. Este número de vehículos se multiplica por la cantidad media de consumo de biodiésel semanal y obtenemos la cantidad de biodiésel necesario para abastecer cada uno de los puntos de la zona de consumo.

El precio a pagar por metro cúbico de combustible transportado es de US 0,19  $\text{km}/\text{m}^3$ , la variable  $C_{kj}$  indica estos costos entre los diversos puntos.

El producto de costo unitario  $D_{ij}$  de transporte de la usina  $j$  para la zona de consumo  $i$  (US\$/metro cúbico), por la demanda  $w_i$  por producto en la zona de consumo  $i$  (unid/período) veces el factor  $X_{ij}$  representa el costo total de transporte de cada usina  $j$  al punto de distribución  $i$ , este producto es denotado por  $D_{ij}w_iX_{ij}$  y indica los costos de distribución de usina a todos los 32 puntos de zona de consumo. La suma de todos estos costos está representada por  $\sum_{i=1}^{32} D_{ij}w_iX_{ij}$

Es el costo total de transporte de cada usina a todas las zonas de consumo, el resultado de esta suma se puede observar en el cuadro 3.3.

**Cuadro 3.3:** Parciales de costos de transporte de biodiésel de las zonas de producción a las zonas de consumo

$\sum_{i=1}^{32} D_{ij}w_iX_{ij}$	Instalación de usinas	Costo de transporte da materia prima en US\$
Suma de los costos de transporte de cada usina $j$ para cada una de las zonas de consumo $i$ con demanda media $w_i$ . Fue considerado un factor $X_{ij}$ que depende de la cantidad de biodiésel que recibe la zona de consumo $i$ de la usina $j$ con distancia entre ellas a menos de 500 km.	Araguaina	12.146,57
	Arapoema;	62.439,42
	Tocantinópolis	77.587,21
	Araguatins	8.178,54
	Gurupi	220.071,68
	Alvorada	97.656,08

	Peixe	1.006.843,48
	Guarai	16.019,94
	Araguacema	915.466,64
	Caseara	87.373,19
	Palmeirópolis	79.163,60
	Tupiratins	108.845,35
	Lagoa da confusão	420.410,05
	Formoso do Araguaia	59.819,16
	Araguaçu.	241.444,32
	Dianópolis	178.509,31
	Arraias	506.561,14
	Paraná	207.027,07
	Natividade	722.156,37
	Conceição do Tocantins	1.103.094,27
	Santa Rosa do Tocantins	582.402,92
	São Felix do Tocantins	825.392,22
	Campos lindos	650.758,92
	Porto Nacional	4.896,22
	Santa Maria do Tocantins	770.899,03

Con los datos del cuadro 3.2 y cuadro 3.3 se obtienen los costos para obtener la materia prima y distribuir el producto final (biodiésel) para el consumo (Pinedo, 2010). Esos resultados se obtuvieron a partir del primer y del segundo resultado parcial. A estos costos parciales se debe adicionar los costos de instalación y precios da cada una de las usinas a ser instalada.

Considerando que todas las usinas  $j$  tienen las mismas características de su fabricación, instalación y capacidad de producción  $r$ , luego todas ellas tienen un costo fijo de  $F_{ij}$  que es constante. También suponemos que todas las usinas  $j$  tienen capacidad de producir  $r = 10.000$  litros de biodiésel para entrega inmediata semanalmente, en este caso la variable binaria  $Y_{ij} = 1$ , luego se tiene el tercer resultado esperado

$$\sum_{i=1}^R F_{ij} Y_{ij} \quad (3.9)$$

igual a una constante  $C$  para cada usina  $j = 1, 2, 3, \dots, 24, 25$ .

Los valores de costos para la instalación de cada usina se muestran en el cuadro 3.4 estos costos de instalación están determinados por la función objetivo  $Z$  (costo total de implantación) más  $C$ , que representa los costos de instalación (instalaciones, máquinas, equipamientos y otros que son necesarios para dejar las instalaciones prontas para comenzar a ser utilizada) de cada una de las usinas.

**Cuadro 3.4:** Relación de municipios (en orden creciente de costos) para implantación de usinas.

Instalación de usinas	min $Z =$
Porto Nacional	= 19.950,68 + C
Araguaina	= 31.602,65 + C
Guaraí	= 28.900,88 + C
Araguatins	= 40.165,03 + C
Formoso do Araguaia	= 77.168,22 + C
Arapoema	= 80.955,08 + C
Palmeirópolis	= 102.013,62 + C
Tocantinópolis	= 103.754,76 + C
Caseara	= 105.184,00 + C
Alvorada	= 116.809,73 + C
Tupiratins	= 122.513,35 + C
Dianópolis	= 198.349,19 + C
Paraná	= 227.878,43 + C
Gurupi	= 236.136,16 + C
Araguaçu.	= 265.046,38 + C
Lagoa da confusão	= 437.168,32 + C
Arraías	= 533.509,78 + C
Santa Rosa do Tocantins	= 598.140,00 + C
Campos lindos	= 674.988,11 + C
Natividade	= 738.950,81 + C
Santa Maria do Tocantins	= 786.421,08 + C
São Felix do Tocantins	= 842.279,46 + C
Araguacema	= 932.577,30 + C
Peixe	= 1.024.013,51 + C
Concepción do Tocantins	= 1.123.364,32 + C

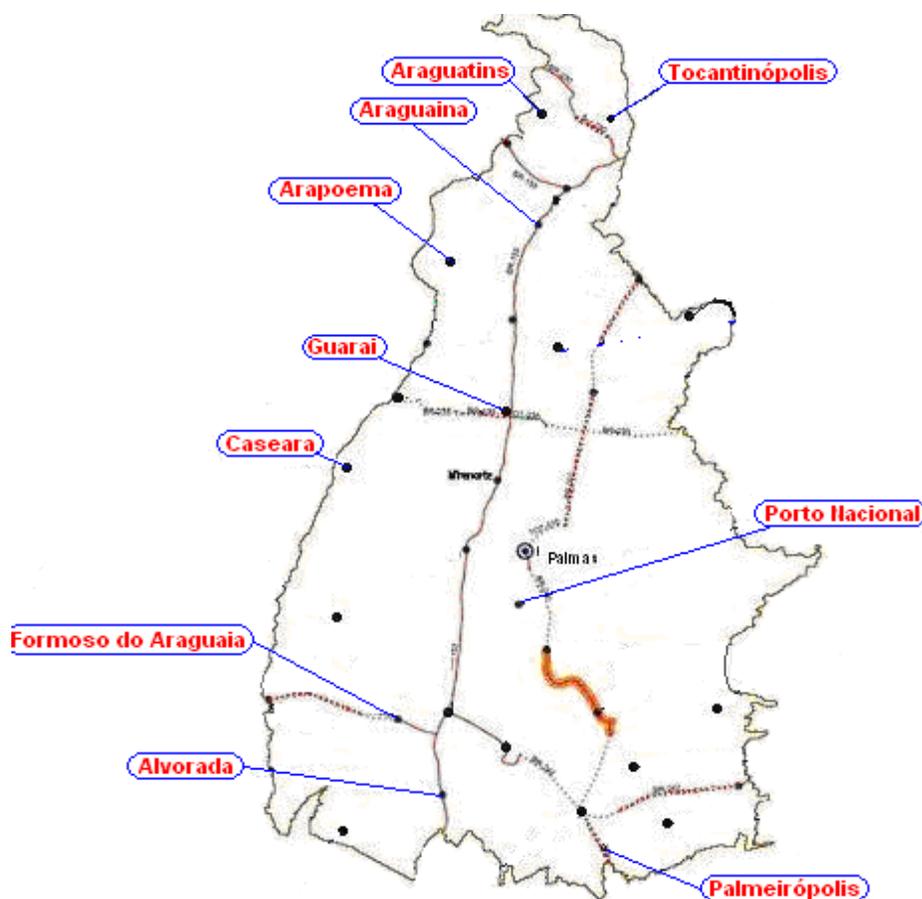
**Fuente:** Elaboración propia a partir de la aplicación del modelo.

Este cuadro está indicando los valores de veinticinco municipios para la implantación de usinas. De esos veinticinco municipios fue determinado que apenas los diez primeros con sus respectivos costos fueron el foco de nuestro análisis.

## Análisis de los resultados obtenidos

De los 25 puntos (municipios) escogidos para análisis en el modelo matemático, solamente diez fueron considerados como puntos óptimos para la implantación de las usinas. Tal determinación llevo en consideración que estos propician un costo menor de instalación. En el mapa 4.1, se puede observar la localización de los puntos óptimos que fueron considerados, para este escenario.

**Mapa 4.1 :** Estado de Tocantins y 10 puntos para instalación de usinas de biodiésel



Fuente: Elaboración propia

En el mapa podemos observar que la localización de las diez primeras usinas de bajo costo según el cuadro 3.4 para su instalación y producción es estratégica, pues abarca todo el Estado de Tocantins

## Conclusiones

El Estado de Tocantins relativamente es nuevo fue creado a fines de la década de 1980, tiene pocos municipios potencialmente prontos para recibir usinas de fabricación de biodiésel, la metodología adecuada es la apropiada, porque utilizamos pocas variables. El trabajo completo de este artículo puede servir como base para trabajos futuros en otras áreas donde se tenga la intención de localización en el Estado pues de manera detallada se analizan diferentes sectores de la actividad económica, de comunicación, geográfica entre otros del Estado de Tocantins.

Este estudio se valió del modelo matemático de La Programación Lineal Entera Mixta, trabajada con Excel para localizar los puntos óptimos para implantación de usinas de biodiésel. Para determinación y ejecución del modelo utilizamos como premisas: 1) Los municipios (puntos óptimos) con más de 10,000 habitantes; 2) No fueron considerados municipios que tuvieron demografía bastante encima o abajo de la media y también los que ya tenían usinas de biodiésel; 3) Municipios productores de materia prima para la producción de biodiésel; 4) Descentralización de la producción de biodiésel; 5) Municipios cerca a la redes de transportes (terrestre, fluvial y férrea); 6) Fue considerada la entrega de cinco toneladas de materia prima semanalmente por el proveedor. Aquí podríamos haber considerado diferentes cantidades de abastecimiento, el modelo matemático funciona sin dificultad; 7) Hasta una distancia de 500km de la usina de biodiésel hasta la ciudad considerada como zona de consumo; 8) La usina de biodiésel produce hasta 10,000 litros por semana de biodiésel; 9) un mismo precio de construcción de cada usina en relación a costos de infraestructura; 10) La misma capacidad de producción y almacenamiento por cada usina 11) Cuando el proveedor de materia prima, zona de consumo y usina de biodiésel están en el mismo lugar fue considerado 1km para el desplazamiento con transporte.

Este estudio fue elaborado en base al referencial teórico de la logística y teoría de localización. Los municipios tocantinenses escogidos para la ejecución del modelo matemático fueron inicialmente 33, el modelo matemático después de aplicado utilizando los datos preestablecidos se redujo a 25 municipios con mayor potencial para el recibimiento de nuevas usinas de biodiésel, estos municipios foram: Porto Nacional, (2) Araguaína, (3) Guaraí, (4) Araguaína, (5) Formoso do Araguaia, (6) Arapoema, (7) Palmeirópolis, (8) Tocantinópolis, (9) Caseara, (10) Alvorada, (11) Tupiratins, (12) Dianópolis, (13) Paraná, (14) Concepción do Tocantins,

(15)Gurupi, (16) Araguaçu, (17) Lagoa da confusão, (18) Arraias, (19) Santa Rosa do Tocantins, (20) Campos lindos, (21)Natividade, (22) Santa Maria do Tocantins, (23) São Felix do Tocantins, (24)Araguacema, (25) Peixe.

Otros estudios relacionados a logística, modelo PLEM y estudio de localización de usinas de biodiésel podrán ser elaborados en el futuro. El presente estudio se limitó a considerar solamente la materia prima oleaginosa y sebo, pues el tiempo no permitió que se extendiese e incluyese el etanol y otros que pertenecen a la cadena de producción del biodiésel. No obstante los resultados obtenidos fueron satisfactorios y correspondieron las expectativas de las investigaciones.

## Referencias

- ALVARENGA, A.C. **Logística aplicada, suprimento e distribuição física**. São Paulo: Pioneira, 2001.
- BANDEIRA Renata A. de M. **Proposta de um sistema de Análise para Localização de Depósitos**. Disertación de Maestria. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escuela de Ingeniería. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção. 2006. 150pg.
- CAIXETA-FILHO José V. **Pesquisa Operacional: Técnicas aplicadas a sistema agroindustriais**. 2da. Edição São Paulo Editora Atlas 2004 pg 170.
- HAKIMI, S. L. **Optimum location of switching centers and the absolute centers and medians of a graph**. Operations Research, v.12, p.450-459, 1964. (HAKIMI 1964).
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. Disponible en <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?uf=to>. Acceso día 20/11/2009.
- OWEN, Mal. **SPC and Continuous Improvement**. 1 ed. USA: IFS Publications, 1994.
- PINEDO Siebert. K. **Estudo sobre determinação de pontos ótimos para localização e implantação de usinas de Biodiésel no Estado do Tocantins**. Biblioteca virtual de Derecho, Economía y Ciencias Sociales. España 2010. Disponible en: <http://www.eumed.net/libros/2010f/892/indice.htm>. Acceso en: 14 julio 2011.
- RESENDE, E. **Situação atual dos transportes no Brasil**. Revista Transportes Agora 2003. Disponible en [http://www.transportes.gov.br/ascom/transporte Agora/](http://www.transportes.gov.br/ascom/transporte_Agora/), acceso día 05/06/2009.
- ROSA, Denise P., 2005. **O Planejamento de Centros Logísticos com Base na Agregação de Valor por Serviços Logísticos em Terminais de Transportes**. (Tesis de Doctorado).
- SCHWARTZ, J. **Air pollution and daily mortality in Birmingham**, Alabama, American Journal of Epidemiology, Baltimore, v. 137, n.10, p.1136-1147, 1999.