



Unidad de Planeación
Minero Energética



20
25

Plan Indicativo de **Bioenergía del Pacífico**

Una Apuesta de Transformación
Productiva, Internacionalización y Acción
Climática para el territorio y para el país.



Anexo 7

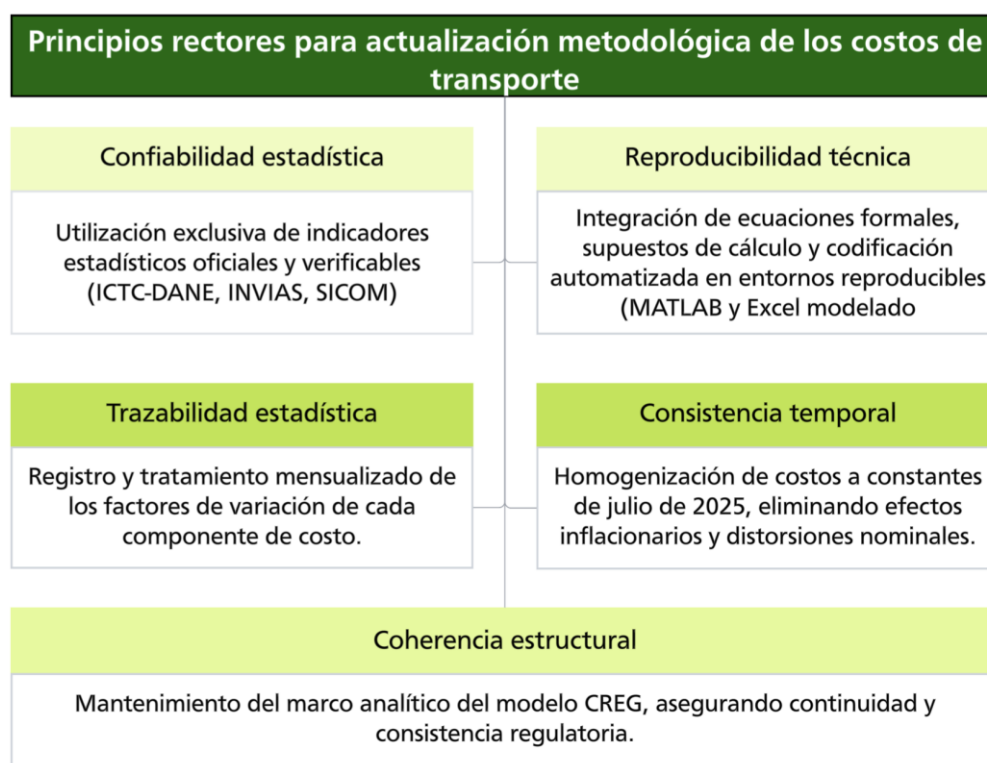
Documento con
metodología de cálculo de costos
de transporte por carretera de
biodiésel y bioetanol



1. Proceso de actualización metodológica

La actualización metodológica de los costos de transporte requiere un marco técnico que garantice la validez estadística, la replicabilidad de los resultados y la coherencia analítica frente al modelo regulatorio vigente. En este contexto, los principios rectores que sustentan el proceso establecen los lineamientos esenciales para asegurar la solidez técnica del ejercicio, la comparabilidad intertemporal de los resultados y la trazabilidad de los datos utilizados (Figura 1). Dichos principios articulan componentes estadísticos, computacionales y normativos, orientados a fortalecer la confiabilidad de los insumos, la reproducibilidad de los procedimientos de cálculo y la homogeneidad de los costos en el tiempo. De esta manera, se consolida una metodología integral que mantiene la consistencia estructural del modelo CREG (CREG, 2017) y responde a las exigencias de actualización derivadas del contexto operativo y económico del transporte de carga en Colombia.

Figura 1. Principios reactores para actualización de costos de transporte de Biocombustibles



Fuente: Elaboración UPME

1.1. Fuentes de información y herramientas empleadas

La caracterización de las rutas y la actualización de los costos asociados al transporte terrestre de biocombustibles se fundamentaron en la integración de información proveniente de fuentes oficiales, verificables y de libre acceso.

Tabla 1. Fuentes oficiales y herramientas utilizadas en la actualización metodológica 2025

Fuente de información / Herramienta	Entidad / Plataforma	Propósito técnico y aplicación metodológica
Hermes – Sistema de Información Vial (INVÍAS, 2025)	Instituto Nacional de Vías (INVIAS)	La plataforma Hermes – Sistema de Información Vial fue utilizada para la delimitación precisa de rutas, determinación del número de peajes y cálculo del valor total de peajes por categoría vehicular.
Google Earth Pro (v.2025.1)	Google LLC	Obtención de coordenadas geográficas, altitudes y perfiles altimétricos precisos de las rutas de transporte.
SICOM (MinEnergía, 2025)	Sistema de Información de Combustibles – Ministerio de Minas y Energía	Plataforma oficial utilizada para la identificación de puntos de origen y destino asociados a las plantas mezcladoras, terminales logísticas, centros de distribución y agentes minoristas de biodiésel y bioetanol. Adicionalmente, el sistema fue empleado para la actualización de los volúmenes despachados (galones) por tipo de biocombustible y ruta operativa, información que permitió calibrar los flujos logísticos y ajustar las matrices de transporte en la modelación de costos.
DANE – ICTC (Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera, 2015–2025)	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)	Fuente oficial para la actualización económica de los costos del transporte terrestre. Se emplearon las series mensuales históricas del ICTC y sus subcomponentes (combustible, peajes, mantenimiento, llantas, lubricantes, seguros, personal, recuperación de capital, entre otros). La información permitió ajustar los valores nominales a precios constantes de julio de 2025, garantizando comparabilidad intertemporal.

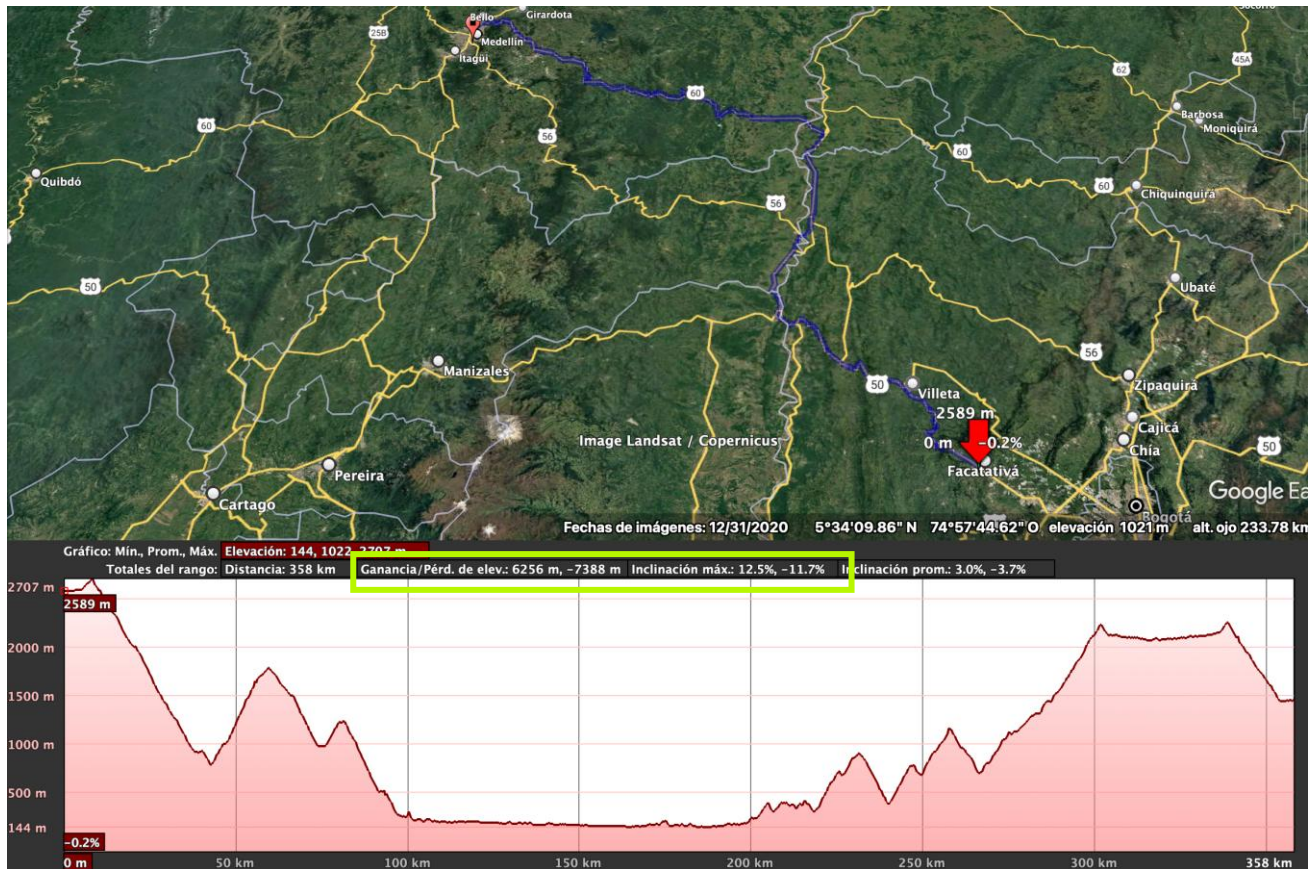
Fuente: Elaboración UPME

1.2. Caracterización geométrica y altimétrica de rutas

El análisis geométrico y altimétrico de las rutas de transporte constituye un componente fundamental en la determinación del rendimiento energético real (km/galón) y en la estimación del costo operativo total (COP/km-galón), dado que la pendiente y morfología del terreno inciden directamente en la demanda de torque, consumo de combustible y tiempo efectivo de recorrido.

Para la actualización metodológica 2025, se incorporó un proceso de caracterización geoespacial de rutas, basado en la integración de datos de INVÍAS (Red Vial Nacional, clasificación primaria y secundaria) y en el levantamiento digital de perfiles altimétricos mediante Google Earth Pro (versión 2025.1). El procedimiento permitió definir, para cada corredor logístico, la distancia efectiva, el número de peajes, el perfil topográfico y la pendiente media ponderada.

Figura 2. Caracterización geoespacial de las rutas



Fuente: Google Earth Pro

1.3. Cálculo del rendimiento promedio en ruta (km/galón)

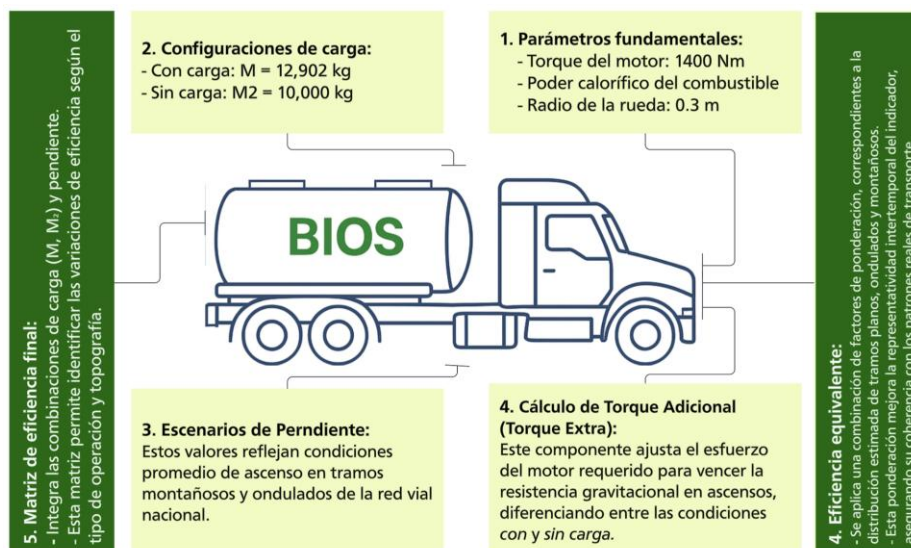
Uno de los elementos diferenciadores de la actualización metodológica 2025 consistió en el desarrollo de un modelo físico-mecánico de rendimiento energético, orientado a refinar la estimación del consumo de combustible por ruta, considerando la interacción entre carga, pendiente, torque y condiciones geométricas del terreno.

En contraste con el enfoque estático adoptado en la metodología CREG (2015) (CREG, 2017), donde los rendimientos se asumían como valores fijos por tipología de terreno y categoría vehicular, el nuevo esquema introduce un componente dinámico basado en simulación.

Este modelo fue implementado en MATLAB (Figura 3) y permitió estimar los rendimientos promedio (km/galón) para condiciones con carga y sin carga de manera más realista, atendiendo a la pendiente efectiva y al esfuerzo de tracción requerido en cada tipo de terreno (plano, ondulado y montañoso). El cálculo del rendimiento energético se formuló a partir del balance de energía mecánica disponible en el motor diésel y la energía útil transmitida a las ruedas motrices. Integra el torque motor (T) y el radio de la rueda (r) para representar la conversión de energía rotacional en energía lineal, con un rendimiento global del sistema (η_{mec}) del 40 %, en concordancia con valores medios de eficiencia

de motores diésel para transporte pesado. El modelo incluye además el cálculo de un torque adicional (T_{extra}), derivado del esfuerzo requerido para vencer la componente gravitacional de la pendiente.

Figura 3. Modelo de cálculo del rendimiento energético vehicular



Fuente: Elaboración UPME

Su implementación permitió:

- Incorporar la influencia real de la topografía y la carga útil.
- Generar rendimientos específicos por tipo de terreno.
- Fortalecer la coherencia entre los componentes geoespaciales (Google Earth, INVIAS) y los energéticos (ICTC-Combustible).
- Aumentar la confiabilidad de los costos unitarios por ruta y tipo de biocombustible (biodiésel y bioetanol).

1.4. Actualización económica mediante el Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC)

Con el propósito de reflejar la evolución real de los precios de insumos, repuestos y servicios asociados al transporte terrestre de carga, los valores base del modelo de costos CREG (2015) fueron actualizados al año 2025 mediante la aplicación del Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC), publicado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE (DANE, 2025).

El ICTC constituye el indicador oficial que mide las variaciones promedio de los precios de un conjunto representativo de bienes y servicios requeridos para la operación de vehículos de carga, tales como combustible, llantas, lubricantes, filtros, mantenimiento, seguros, personal y otros costos fijos.

Su estructura metodológica incorpora ponderaciones sectoriales basadas en la composición típica de costos operativos del transporte carretero en Colombia, convirtiéndose en una herramienta

fundamental para la planeación pública, la actualización tarifaria y la gestión de costos empresariales en el sector transporte.

1.4.1. Aplicación Metodológica del ICTC

Para la actualización del modelo, se utilizaron las series mensuales históricas del ICTC y sus subcomponentes comprendidas entre enero de 2016 y julio de 2025. El procesamiento de esta información permitió calcular la variación acumulada total por año y por ítem, considerando las fluctuaciones mes a mes dentro de cada año calendario. De esta forma, el ajuste captura no solo las tendencias anuales generales, sino también las variaciones intraanuales derivadas de la dinámica inflacionaria, la estacionalidad de los precios de insumos, la tasa de cambio y las condiciones internacionales del mercado energético.

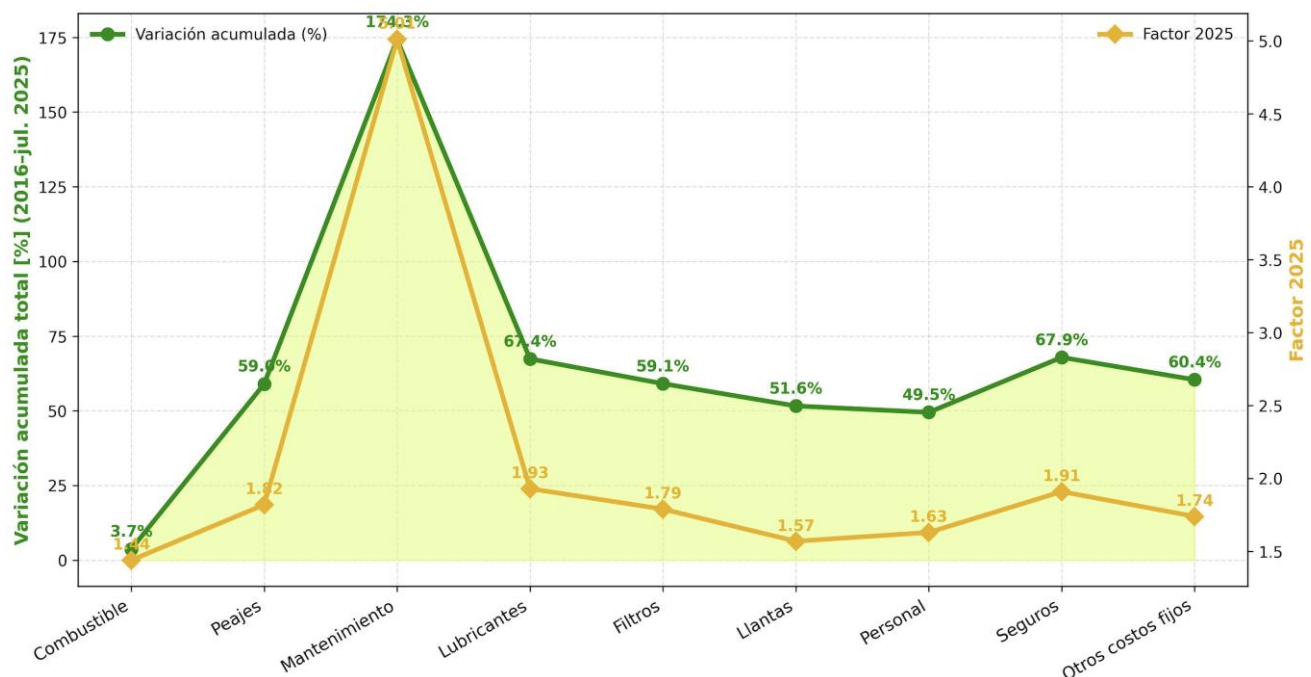
El resultado de este proceso mostró un comportamiento heterogéneo entre los componentes de costo, con incrementos acumulados superiores al 170 % en rubros de alta dependencia importada (como mantenimiento y lubricantes), y crecimientos moderados en componentes de baja elasticidad, como combustible y peajes (Figura 4).

1.4.2. Derivación de Factores de Actualización 2025

A partir de las variaciones acumuladas anuales y mensuales, se calcularon los factores de actualización (Factor 2025), que expresan la relación entre los precios de referencia de 2015 y los valores ajustados a julio de 2025 (Figura 4).

Estos factores fueron aplicados directamente sobre los valores base del modelo CREG (2015), permitiendo obtener una estructura actualizada de costos unitarios coherente con el comportamiento económico y operativo del sector transporte en la última década.

Figura 4. Evolución comparativa de los componentes de costo (2016-2025)

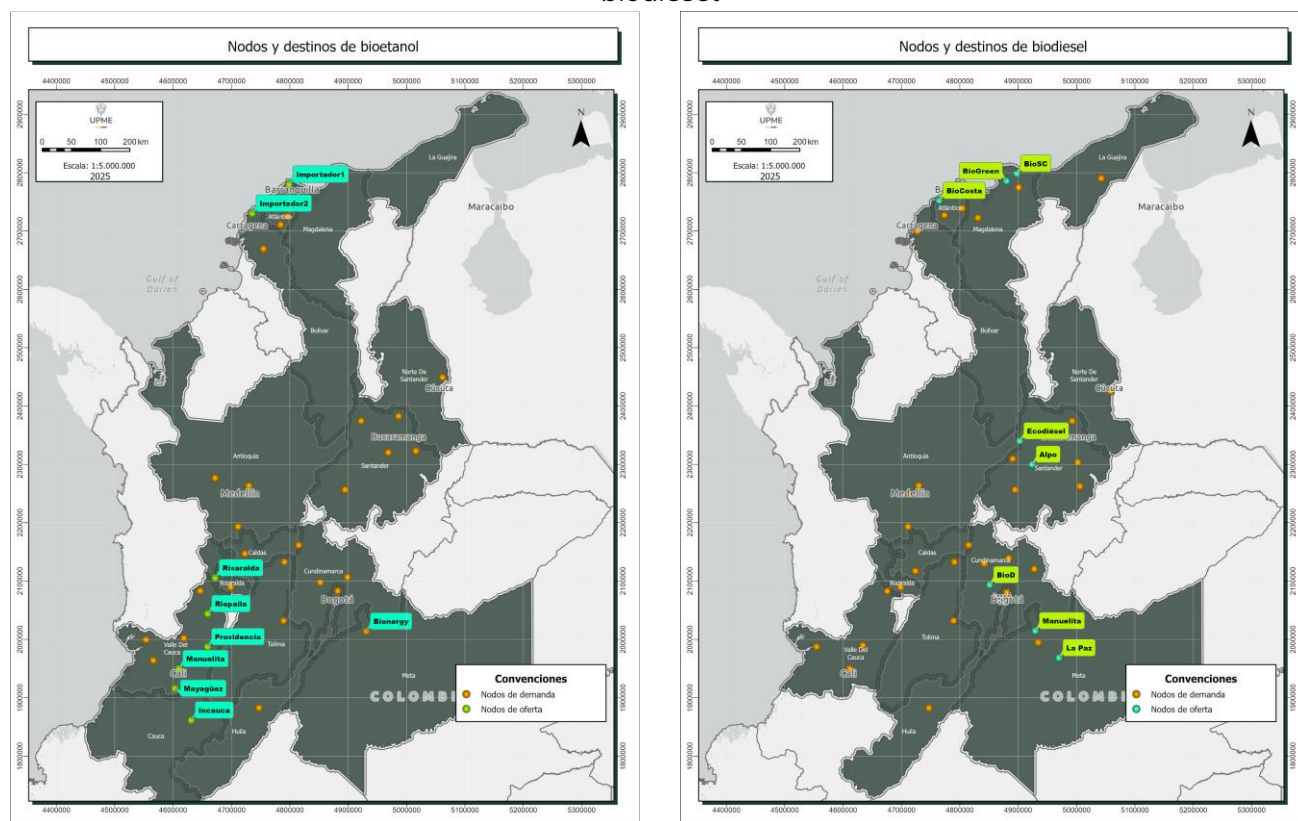


Fuente: Elaboración UPME basada en datos de (DANE, 2025)

2. Modelo de transporte de Etanol y Biodiésel

De acuerdo con las rutas seguidas por los nodos tanto la red de biodiésel como la de etanol se pudieron simplificar a 28 nodos y 41 tramos y 26 nodos y 28 tramos respectivamente. Los costos obtenidos en el capítulo 2, se establecieron como sumas de costos de tramos de acuerdo con la configuración de cada red, y los flujos de red se calcularon de acuerdo con un modelo de optimización de mínimo costo operativo de acuerdo con cada una de las infraestructuras presentes. Los mapas asociados a cada red se muestran en la figura 5.

Figura 5. Estructura de la red de biodiésel y etanol. Izquierda: Red de etanol; Derecha: Red de biodiésel



Fuente: Elaboración UPME

Complementario a los mapas mostrados a la Figura 5, en las tablas 2 y 3 se muestra la estructura de red donde se mencionan los nodos anteriormente descritos.

Tabla 2. Red de Etanol

Nodo fuente	Nodo destino
Cimitarra	Tocancipá
Girón	Betulia
La Dorada	Mariquita
La Dorada	Coello

Anexo 7 : Plan Indicativo de Bioenergía del Pacífico-PIBE PACÍFICO-

Coello	Neiva
La Dorada	Facatativá
Facatativá	Bogotá
Bogotá	Villavicencio
Girardota	Medellín
Medellín	La Pintada
La Pintada	Manizales
Manizales	Pereira
Pereira	Cartago
Cartago	Buga
Buga	Yumbo
Buga	Buenaventura
Baranoa	Barranquilla
Manizales	Mariquita
La Dorada	Betulia
La Dorada	Barrancabermeja
La Dorada	Cimitarra
Bogotá	Tocancipá
La Dorada	Girón
Girón	Bucaramanga
Bucaramanga	Villa del Rosario
Girardota	Cartagena
Cartagena	Baranoa
Coello	Villavicencio

Fuente: Elaboración UPME.

Tabla 3. Red de biodiésel

Nodo fuente	Nodo destino
Santa Marta (Pozos Colorados)	Albania
Santa Marta (Pozos Colorados)	Villa del Rosario
Santa Marta (Pozos Colorados)	Barrancabermeja
Santa Marta (Pozos Colorados)	La Dorada
Santa Marta (Pozos Colorados)	Bucaramanga
Bucaramanga	Girón
Santa Marta (Pozos Colorados)	Barranquilla
Barranquilla	Sitio Nuevo
Barranquilla	Baranoa
Barranquilla	Cartagena
Santa Marta (Pozos Colorados)	Betulia
Betulia	Cimitarra
Cimitarra	Tocancipá
Betulia	Coello
Betulia	Bogotá
Betulia	Facatativá
Betulia	Neiva

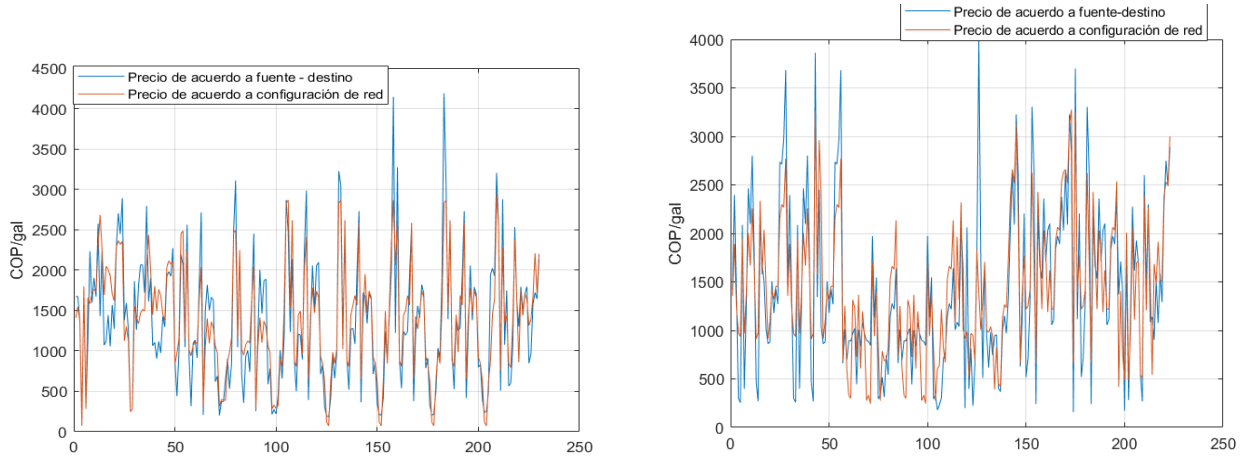
Anexo 7 : Plan Indicativo de Bioenergía del Pacífico-PIBE PACÍFICO-

Betulia	Mariquita
Mariquita	Manizales
Bogotá	Villavicencio
Barranquilla	Girardota
Girardota	Medellín
Medellín	La Pintada
La Pintada	Pereira
Pereira	Cartago
Cartago	Buga
Buga	Yumbo
Buga	Buenaventura
Betulia	Albania
Betulia	Sitio Nuevo
Betulia	Cartagena
Betulia	Baranoa
Betulia	Girón
Bucaramanga	Villa del Rosario
Manizales	Pereira
Facatativá	Cartagena
Facatativá	Tocancipá
Facatativá	La Dorada
Facatativá	Barrancabermeja
Facatativá	Coello
Facatativá	Neiva

Fuente: Elaboración UPME

Si bien la matriz fuente destino descrita en el capítulo 2 puede estar sujeta a variaciones de acuerdo con contratos y con el modelo calculado por el sistema Hermes, presentado en la Tabla 1, la descripción por sumas de tramos descrita en los modelos representados en los mapas de la Figura 6 representa una buena fidelidad a juzgar por los elevados coeficientes de correlación que se exhiben en ambas estructuras de red. En la Figura 6 se muestran los resultados del ajuste.

Figura 6. Relación de costos de tramos de acuerdo con el modelo Hermes: (Relación Fuente-Destino) y mediante sumas de tramos provenientes de cada modelo de red. Izquierda: Precios Etanol, Derecha: Precios de Biodiésel



Fuente: Elaboración UPME.

En el caso de ajustes de precios de Etanol se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.89793 y en el caso de Biodiésel se obtuvo 0.8390. Los coeficientes son suficientemente elevados como para considerar la red simplificada como una buena representación de la actualización de los costos calculados por el modelo Hermes mostrado en la Tabla 1.

2.1. Descripción del modelo

Ya una vez establecida la red tanto para Etanol como para Biodiésel, los flujos derivados del transporte se calculan mediante la minimización de costo operativo. Este costo está descrito por la ecuación 1.

$$OC = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{n,m}^R (D_{n,m} - \delta_{n,m}) + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{n,m}^S \sigma_{n,m} + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M c_{l,m}^{TRANS} |f_{l,m}| \quad (1)$$

Este costo operativo tiene tres componentes, de acuerdo al orden de aparición en la ecuación 1. El primero es el costo de racionamiento, establecido como el costo de no suministrar el combustible, el segundo corresponde al costo de producción y el tercero corresponde al costo de transporte. Tanto en producción como en transporte, los costos fueron inferidos de la simplificación de la red de la cual se obtiene como resultado el ajuste presentado en la Figura 6. De esta ecuación los parámetros del sistema son los siguientes:

N : Es el número de nodos del sistema

M : Es el número de combustibles del sistema. En ambos modelos $M=2$, ya que en Etanol se tiene el Etanol propiamente dicho y el azúcar, y en el caso del modelo de Biodiésel se tiene el Biodiésel y el aceite.

- $p_{n,m}^R$: Corresponde al costo de racionamiento de no suministrar al nodo n bien sea biodiésel ($m=1$) o aceite ($m=2$) en el modelo de biodiésel y en el caso de Etanol ($m=1$) correspondería a Etanol y ($m=1$) correspondería a azúcar.
- $D_{n,m}$: Corresponde a las demandas de cada combustible para cada nodo n . Las convenciones para m se mantienen idénticas. Estas fueron calculadas para sostener los porcentajes de mezcla de acuerdo con el resultado del modelo del Plan Indicativo de Combustibles Líquidos. Las demandas de los combustibles alternativos se establecieron como suficientemente elevadas. De esta forma se pueden modelar en este algoritmo diferentes políticas de incentivos para los dos combustibles orgánicos.
- $\delta_{n,m}$: Corresponde al consumo debido a las restricciones operativas del sistema.
- $p_{n,m}^S$: Corresponde al costo de producción de cada combustible, inferido del ajuste en la Figura 6, tanto para el modelo de biodiésel como el de etanol. Las convenciones de m se mantienen idénticas.
- $\sigma_{n,m}$: Es la producción sujeta a los límites de oferta que tiene cada planta de producción y a las restricciones propias del sistema.
- $S_{n,m}$: Corresponde a la oferta del nodo n del combustible m .
- L : Corresponde al número de tramos del sistema.
- $c_{l,m}^{TRANS}$: Corresponde al costo de transporte de cada tramo, inferidos del ajuste de la Figura 6.
- $f_{l,m}$: Corresponde al flujo del tramo l para el combustible m .

Las restricciones operativas son las siguientes:

$$0 \leq \delta_{n,m} \leq D_{n,m} \quad (2)$$

$$0 \leq \sigma_{n,m} \leq S_{n,m} \quad (3)$$

$$-k_l^D \chi_{l,m} \leq f_{l,m} \leq k_l^U \chi_{l,m} \quad (4.1)$$

$$\sum_{m=1}^M \chi_{l,m} = 1 \quad (4.2)$$

$$\chi_{l,m} \geq 0 \quad (4.3)$$

$$\sigma_{n,m} + \sum_{l=1, l \in IN(n)}^L f_{l,m} = \delta_{n,m} + \sum_{l=1, l \in OUT(n)}^L f_{l,m} \quad (5)$$

La ecuación (2) representa que el consumo no puede exceder la demanda y que este debe ser una variable no negativa. La ecuación (3) representa que la producción no debe exceder la oferta. El sistema de ecuaciones (4) representa los límites de capacidad de los tramos, con una capacidad en la dirección convencional establecida por k_l^U y de contraflujo establecida por k_l^D . $\chi_{l,m}$ representa la proporción del combustible m que ocupa el tramo l . Finalmente, la ecuación (5) representa el balance en cada nodo donde $IN(n)$ son los tramos entrantes al nodo n y $OUT(n)$ son los tramos salientes.

Bibliografía

CREG. (2017). *Publicaciones del sector - modelo de costos de transporte terrestre*.

DANE. (2025). *Índice de costos de transporte de carga por carretera (ICTC)*.

INVÍAS. (2025). *Sistema de Información Vial (SIV)*.

MinEnergía. (2025). *SICOM-MME*. <https://www.sicom.gov.co/>