

**UN MODELO MULTINIVEL PARA LA EVALUACIÓN DE UN CORREDOR
LOGÍSTICO TIPO “GREEN”**

**DIANA CAROLINA SANABRIA RINCÓN
YULAYTH KATHERINE VEGA PRADA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2015

**UN MODELO MULTINIVEL PARA LA EVALUACIÓN DE UN CORREDOR
LOGÍSTICO TIPO “GREEN”**

**DIANA CAROLINA SANABRIA RINCÓN
YULAYTH KATHERINE VEGA PRADA**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Industrial**

**Director
HENRY LAMOS DÍAZ
Ph.D. en Física-Matemática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

*A Dios, por llenarme de sabiduría y fortaleza, e iluminar siempre mi camino.
Que seas tú Señor quién siempre actúe en mí.*

*A mis padres Luis E. y Olga, por su inmenso amor, sacrificio, paciencia
y apoyo durante esta etapa universitaria.
Los amo, son el motor de mi vida!*

*A mi hermanito Jhon, por su especial compañía, y por alegrar
mis días con los cantos de nuestro equipo del alma.
Te quiero mucho bro!*

*A mis nonitas Waldina y Josefa, porque su ejemplo
de valentía me motiva a seguir adelante.
Que Diosito las siga bendiciendo.*

Diana Carolina Sanabria Rincón

DEDICATORIA

A Dios, por concederme el privilegio de vida y guiar mis pasos en todo momento.

*A mi mamá Martha y mi papá Diego, por su infinito amor y apoyo durante toda mi existencia, especialmente en mi formación académica.
Ustedes son mi gran motivación.*

A mi nonita Lola y mi nonito Luis (†) de quién estoy segura sería la persona más feliz al verme culminar esta etapa.

A Yessika, Sergio, y Juan David, el diminuto caballero capitán tapón, quién con su sonrisa ilumina mi alma.

Yulayth Katherine Vega Prada

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al profesor Ph.D. Henry Lamos, director de este trabajo, por su paciencia, tiempo, ayuda constante, y por compartirnos su conocimiento para la realización del mismo.

Al grupo de investigación OPALO, por la disposición de la sala y equipos de cómputo para llevar a cabo esta investigación.

A la Universidad Industrial de Santander, por formarnos como profesionales a lo largo de estos años.

A nuestros familiares, por estar siempre ahí brindándonos su apoyo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	24
1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO	27
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	27
1.2 JUSTIFICACIÓN	27
1.3 OBJETIVOS	28
1.3.1 Objetivo general	28
1.3.2 Objetivos específicos	28
2. GENERALIDADES	30
2.1 LOGÍSTICA Y TRANSPORTE DE CARGA	30
2.1.1 Modos y medios de transporte	31
2.1.2 Tipos de carga	32
2.2 MOVILIZACIÓN DE CARGA EN COLOMBIA	33

2.2.1 Transporte de carga por carretera	33
2.2.1.1 Tipos de vehículos	34
2.2.1.2 Infraestructura de transporte	37
2.3 CORREDORES LOGÍSTICOS	37
2.4 TRANSPORTE Y MEDIO AMBIENTE	40
3. MARCO TEÓRICO	43
3.1 PROGRAMACIÓN MULTINIVEL	43
3.1.1 Problema de programación binivel	44
3.1.1.1 Solución de problemas binivel	47
3.2 PROBLEMAS DE DISEÑO DE REDES DE TRANSPORTE	50
3.2.1 Diseño de redes de transporte de carga	56
3.2.2 Diseño de redes de transporte considerando aspectos ambientales	58
3.3 EVOLUCIÓN DIFERENCIAL	60
3.3.1 Introducción al algoritmo ED	61
3.3.2 Etapas del algoritmo ED	62

3.3.2.1 Inicialización	62
3.3.2.2 Mutación	62
3.3.2.3 Cruce	63
3.3.2.4 Selección	64
3.3.2.5 Terminación	65
3.3.3 Variantes de la ED	66
3.4 MANEJO DE RESTRICCIONES	71
4. MODELO BINIVEL DE CORREDOR LOGÍSTICO TIPO “GREEN”	73
4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO	73
4.1.1 Funciones utilizadas en el modelo	74
4.2.1 Problema de nivel superior	77
4.2.2 Problema de nivel inferior	78
5. MÉTODO DE SOLUCIÓN PROPUESTO (GMED)	80
5.1 INTERFAZ GAMS/MATLAB	81
5.1.1 Configuración del equipo o PC	81

5.1.2 Archivos GDX	82
5.2 ANÁLISIS NUMÉRICO	84
5.2.1 Solución de problemas binivel tipo académico	85
5.2.2 Solución del problema CNDP	87
6. APLICACIÓN	94
6.1 DESCRIPCIÓN DE LA RED	94
6.2 DATOS DE ENTRADA DEL MODELO	96
7. CONCLUSIONES	105
8. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	124

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tipos de transporte de carga.....	31
Tabla 2. Movilización de carga en Colombia por modo de transporte.....	34
Tabla 3. Clasificación de vehículos según su estructura.....	34
Tabla 4. Tipos de vehículos de carga.....	36
Tabla 5. Infraestructura de transporte (modo carretero) en Colombia.....	38
Tabla 6. Variantes de la ED.....	70
Tabla 7. Mejor solución BIDE y GMED	86
Tabla 8. Estadísticas BIDE.....	86
Tabla 9. Estadísticas GMED	87
Tabla 10. Tiempos de cálculo promedio (minutos) BIDE y GMED	87
Tabla 11. Métodos de solución existentes aplicados al CNDP.....	88
Tabla 12. Resultados de diferentes métodos de solución – Red 1.....	90

Tabla 13. Resultados de diferentes métodos de solución – Red 2.....	91
Tabla 14. Pares w , rutas y enlaces del corredor Bogotá-Yopal.....	95
Tabla 15. Clases de vehículos m	96
Tabla 16. Tiempo a flujo libre ($ta0$).....	96
Tabla 17. Capacidades de los enlaces CAa	98
Tabla 18. Valores qmw	99
Tabla 19. Longitud La	99
Tabla 20. Factores de emisión ajustados para Colombia.....	100
Tabla 21. Correspondencia categorías – tipos de vehículos.....	101
Tabla 22. Factores de emisión Fbm	101
Tabla 23. Mínima ($lowSa$) y máxima ($uppSa$) expansión de capacidad	102
Tabla 24. Matriz enlace-ruta.....	102
Tabla 25. Valores $PCEm$	103

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Enfoque anidado secuencial	49
Figura 2. Ejemplo de la operación mutación	63
Figura 3. Esquema del algoritmo ED (variante clásica).....	66
Figura 4. Esquema de una operación de cruce binomial	68
Figura 5. Esquema de una operación de cruce exponencial.....	68
Figura 6. Edición de la variable del sistema	82
Figura 7. Pseudocódigo del algoritmo GMED	84
Figura 8. Red de prueba 1	89
Figura 9. Red de prueba 2	89
Figura 10. Gráfica de ZminSupGMED vs generaciones – Red 1	92
Figura 11. Gráfica de ZminSupGMED vs generaciones – Red 2	92
Figura 12. Red del corredor Bogotá-Yopal.....	95

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Descripción del proyecto de investigación raíz	124
Anexo B. Código de programación método BIDE – Ejemplo 1.....	129
Anexo C. Código de programación método GMED – Ejemplo 1	143
Anexo D. Código de programación método BIDE – Ejemplo 2	153
Anexo E. Código de programación método GMED – Ejemplo 2	167
Anexo F. Resultados y tiempos de ejemplos tipo académico	177
Anexo G. Formulación del CNDP	185
Anexo H. Datos de entrada – Redes de prueba 1 y 2 CNDP.....	187
Anexo I. Código de programación método GMED – Red 1 CNDP.....	189
Anexo J. Código de programación método GMED – Red 2 CNDP	200
Anexo K. Resultados GMED del CNDP	214

Anexo L. Factores de corrección para cálculo de la capacidad en carreteras de dos carriles.....	224
Anexo M. Capacidad de tramos y enlaces del corredor Bogotá-Yopal	226
Anexo N. Código de programación método GMED – Modelo de corredor logístico tipo “green” (Aplicación)	231
Anexo O. Resultados GMED de la aplicación	249

GLOSARIO

ASIGNACIÓN DE TRÁFICO: proceso mediante el cual se determina el flujo vehicular en cada uno de los enlaces de una red.

BERMA: parte exterior de la calzada, que cumple funciones básicas como protección al pavimento, ofrecer espacio para detenciones ocasionales de los vehículos y para maniobras de emergencia.

CALZADA: ancho de la carretera destinado para la circulación normal de los vehículos; está compuesta por carriles. En carreteras de dos carriles, la calzada está dada por la suma de los anchos de cada carril.

CAPACIDAD: máximo número de vehículos que puede circular por un punto o tramo uniforme de un carril o calzada durante cierto periodo de tiempo, en las condiciones imperantes de la vía y de tránsito.

CARRIL: parte de la calzada destinada al tránsito de una sola fila de vehículos.

CARRETERA: infraestructura del transporte para la circulación de vehículos; puede contener una o varias calzadas, uno o varios sentidos de circulación o uno o varios carriles en cada sentido.

CARRETERA DE DOS CARRILES: aquella que tiene una calzada con un carril para cada sentido de circulación.

CENTROIDE: punto que simboliza el origen y/o destino de los viajes de una zona a otra.

CONGESTIÓN: situación que se crea cuando el volumen de tránsito en uno o más puntos de una vía excede el volumen máximo que puede pasar por ellos.

DESTINO: zona donde los viajes terminan.

ENLACE: en asignación de tráfico, segmento de la red de carreteras con un nodo en cada extremo.

EQUILIBRIO DE USUARIO: en condición de equilibrio, ningún usuario de una red al cambiar de ruta, podrá experimentar un tiempo menor de viaje.

INTERSECCIÓN: punto en el que se encuentran dos o más enlaces.

LEER: hace referencia a copiar, generalmente de una forma de almacenamiento a otro, en particular de almacenamiento externo a almacenamiento interno.

NODO: punto que representa una intersección o un centroide.

ORIGEN: zona donde los viajes comienzan.

PARÁMETRO: datos de entrada para ser utilizados en un programa en particular.

PROGRAMA: conjunto de instrucciones para que un computador resuelva problemas matemáticos o lleve a cabo tareas específicas.

RUTA: combinación de enlaces que conectan dos centroides, esto es, un origen y un destino.

TIEMPO A FLUJO LIBRE: tiempo de viaje cuando no existe congestión.

TRAMO: segmento continuo de la red de carreteras con igual capacidad vial.

VIAJE: movimiento en una sola dirección que empieza en el origen y termina en el destino.

VOLUMEN DE TRÁNSITO: número total de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado.

ZONA: en asignación de tráfico, subdivisión del área de estudio representada por un centroide.

ZONA DE NO REBASE: parte de la carretera donde no es posible el adelantamiento de vehículos.

RESUMEN

TÍTULO: UN MODELO MULTINIVEL PARA LA EVALUACIÓN DE UN CORREDOR LOGÍSTICO TIPO “GREEN”*

AUTORES: DIANA CAROLINA SANABRIA RINCÓN
YULAYTH KATHERINE VEGA PRADA**

PALABRAS CLAVE: Programación multinivel, CNDP, evolución diferencial, corredor logístico green.

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se desarrolla un modelo en el marco de la programación multinivel, el cual simula el funcionamiento de una red de transporte unimodal para el modo carretero; e incluye la principal externalidad ambiental “green” generada por el sector transporte, esto es, las emisiones atmosféricas contaminantes de los vehículos que circulan por la red. La programación multinivel describe situaciones en las que existe una relación líder-seguidor, es decir, hay varios tomadores de decisión en diferentes niveles de planificación, los cuales se encuentran interrelacionados entre sí; motivo por el cual ha sido utilizada para la formulación del modelo, considerando que se representan los intereses de los administradores de la red o gobierno y los de los usuarios. Además, se propone un método de solución binivel llamado GMED, que implementa la metaheurística evolución diferencial (ED) en MATLAB para resolver el problema de nivel superior, y realiza la interfaz con GAMS, haciendo uso de intercambio de archivos GD_X (*GAMS Data Exchange*) para resolver el nivel inferior. El desempeño del método propuesto se evaluó mediante la solución de dos problemas binivel tipo académico y dos redes del problema de diseño de red continuo (CNDP); observando que GMED se desempeña bien, al arrojar resultados similares a los obtenidos por otros métodos de solución. Finalmente, se realiza una aplicación del modelo para evaluar el corredor logístico de importancia estratégica en Colombia: Bogotá-Yopal.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Henry Lamos Díaz, Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: A MULTILEVEL MODEL FOR THE EVALUATION OF A LOGISTIC CORRIDOR TYPE "GREEN"*

AUTHORS: DIANA CAROLINA SANABRIA RINCÓN
YULAYTH KATHERINE VEGA PRADA**

KEYWORDS: Multilevel programming, CNDP, differential evolution, green logistic corridor.

DESCRIPTION

In this work a model is developed in the framework of multilevel programming, which simulates the operation of a transport network unimodal for road mode; and includes the principal environmental externality "green" generated by the transport sector, that is, polluting air emissions from vehicles on the network. Multilevel programming describe situations where there is a leader-follower relationship, that is, there are several decision makers at different levels of planning, which they are interrelated; reason by which it has been used to formulate the model, considering that the interests of network administrators or government and users are represented. In addition, a bilevel solution method called GMED is proposed, which implements the metaheuristic differential evolution (DE) in MATLAB to solve the upper level problem, and makes the interface with GAMS, by making use of GDY (GAMS Data Exchange) files exchange to solve the lower level. The performance of the proposed method was evaluated by solving two bilevel academic type problems and two networks of the continuous network design problem (CNDP); noting that GMED performs well, throwing similar results those obtained by other methods of solution. Finally, an application of the model is performed to assess the logistics corridor of strategic importance in Colombia: Bogotá-Yopal.

* Degree project

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Henry Lamos Díaz, Ph.D.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial trae consigo un mayor consumo de bienes y servicios; así mismo, la globalización y los diversos acuerdos comerciales entre países llevan a un incremento en la movilización de carga, lo que supone un gran reto, ya que se debería contar con un adecuado sistema de transporte.

En Colombia, en el año 2008, con el fin de mejorar el funcionamiento del sistema logístico nacional, se desarrolló la Política Nacional Logística (contenida en el documento CONPES 3547), la cual define las estrategias para el desarrollo de un sistema logístico enfocado en mejorar la productividad y competitividad del país¹. Para contribuir a este propósito, COLCIENCIAS en el año 2012 abrió una convocatoria cuyo objetivo era seleccionar un proyecto de investigación mediante el cual sea posible mejorar la cadena logística del transporte de carga². El proyecto seleccionado fue el titulado “Estudio del sistema logístico de carga en los principales corredores de Colombia E-TRANSCOL” (ver anexo A), siendo este uno de los motivos por los cuales se dio inicio al desarrollo del presente trabajo.

El transporte y la infraestructura representan un motor para el desarrollo económico. Ésta última es considerada por el Foro Económico Mundial (WEF, por su sigla en inglés) como uno de los pilares para clasificar a un país en un cierto nivel de competitividad. Según el Índice Global de Competitividad (principal indicador del WEF), Colombia pasó del puesto 68 entre 139 países al puesto 66

¹ COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. CONPES 3547. Política Nacional Logística [en línea]. 2008. [citado en 2014-05-07]. Disponible en: <<http://wsp.presidencia.gov.co/sneci/politica/Documents/Conpes-3547-27oct2008.pdf>>

² COLCIENCIAS. Convocatoria para la selección de un proyecto de investigación para la optimización de la cadena logística de transporte de carga en Colombia [en línea]. Bogotá. 21 de diciembre de 2012. [citado en 2014-05-07]. Disponible en: <<http://www.colciencias.gov.co/convocatoria/convocatoria-para-la-selecci-n-de-un-proyecto-de-investigaci-n-para-la-optimizaci-n-de->>

entre 144 países, entre los años 2010³ y 2014⁴; sin embargo, en cuanto al pilar de infraestructura, pasó de la posición 79 a la posición 84 —en el mismo periodo—, evidenciando una desmejora en tal aspecto, pese a los esfuerzos del gobierno nacional durante los últimos años.

Además, en vista de que en Colombia, el principal modo de transporte para el movimiento de carga es el terrestre (según cifras del Ministerio de transporte⁵, cerca del 73,197% de la carga movilizada en el país en el año 2013, utilizó como principal modo de transporte el carretero), lo cual contribuye de manera negativa al medio ambiente, generando externalidades negativas como la contaminación del aire mediante la emisión de gases efecto invernadero (GEI) causantes del calentamiento global; se hace indispensable tomar en consideración el aspecto ambiental cuando se traten temas relacionados con el sector transporte. De hecho, durante los últimos años a nivel mundial se ha mostrado mayor interés por este tema. Tal es el caso de la Unión Europea, que en el año 2007 introdujo el concepto de “*green corridors*” con el fin de desarrollar corredores de transporte eficientes, que consideren el aspecto ambiental tanto en su diseño como en su operación⁶.

Con el fin de afrontar la problemática expuesta, se recurre al diseño de redes de transporte, temática que ha sido estudiada desde hace varios años. En estos problemas intervienen no solamente los planificadores de la red sino los usuarios de la misma, quienes tienen sus propios intereses. Por tanto, la formulación

³ FORO ECONÓMICO MUNDIAL. The Global Competitiveness Report 2010–2011. Geneva: Professor Klaus Schwab, 2010. ISBN-10: 92-95044-87-8.

⁴ FORO ECONÓMICO MUNDIAL. The Global Competitiveness Report 2014–2015. Geneva: Professor Klaus Schwab, 2014. ISBN-10: 92-95044-98-3.

⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Transporte en Cifras - Estadísticas 2013 [en línea]. 2013. [citado en 2015-05-07]. Disponible en: <<https://www.mintransporte.gov.co/documentos.php?id=15>>

⁶ ESPAÑA. MINISTERIO DE FOMENTO. SUPERGREEN (Supporting EU's logistics Action Plan on Green Corridors) [en línea]. 2014. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <<https://www.puertogijon.es/index.asp?MP=74&MS=413&MN=3&TR=C&IDR=618>>

pertinente para este tipo de problemas es la programación multinivel o jerárquica, ya que tiene en cuenta los objetivos de distintos tomadores de decisión que se encuentran en diferentes niveles de planificación.

En este trabajo, se presenta un modelo multinivel con el propósito de modelar la situación discutida en los párrafos anteriores, mediante el cual se simula el funcionamiento de una red, para evaluar el rendimiento de un corredor logístico; incluyendo la principal externalidad ambiental “*green*” generada por el sector transporte.

1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sector transporte tiene un impacto significativo sobre la productividad del sector empresarial, ya que permite el intercambio de bienes y servicios, lo cual es fundamental para el desarrollo económico de un país. El aumento de la producción colombiana y la apertura de mercados internacionales han dado origen a una mayor movilización de carga tanto a nivel local como internacional. No obstante, en Colombia el transporte de carga es crítico, debido a la poca y deficiente infraestructura vial⁷.

La mayor parte del transporte de carga en el país, se realiza en modo carretero, a través de camiones con motores diesel⁸, los cuales emiten gran cantidad de contaminantes; sin embargo, no se ha otorgado mayor importancia a la contaminación atmosférica producida por la quema de combustibles fósiles, derivada de los vehículos utilizados en el transporte de carga. Por tanto es de suma importancia incluir el aspecto ambiental en el modelado de problemas de transporte.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Como consecuencia de las dificultades presentes en el territorio nacional colombiano, en materia del sistema logístico de carga, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – COLCIENCIAS, en noviembre de 2012, dio inicio a la convocatoria No. 603 para la selección de un proyecto de investigación para la optimización de la cadena logística de transporte

⁷ ANDI. Boletín Gerencia de Logística, Transporte e Infraestructura [en línea]. 2014. [citado en 2014-05-07]. Disponible en: <<http://www.andi.com.co/glti/BOLETINES%202014/Bolet%C3%ADn%202-158.%20Niveles%20de%20Servicio%20en%20los%20Corredores%20Viales.pdf>>

⁸ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Diagnóstico del sector transporte 2011 [en línea]. 2011. [citado en 2014-05-07]. Disponible en: <<https://www.mintransporte.gov.co/documentos.php?id=15>>

de carga en Colombia, en donde fue elegido el proyecto denominado: “Estudio del sistema logístico de carga en los principales corredores de Colombia E-TRANSCOL”, en el que el grupo de Optimización y Organización de Sistemas Productivos, Administrativos y Logísticos (OPALO) se encuentra involucrado.

Luego, en aras de contribuir con el proyecto mencionado anteriormente, y dada la necesidad de contar con una infraestructura eficiente que posibilite el intercambio comercial (local e internacional) de mercancías, el desarrollo, productividad, y competitividad de las regiones, se desarrollará un modelo tipo “green” que permita evaluar un corredor logístico para el transporte de carga por carretera.

Teniendo en cuenta que para la evaluación de corredores logísticos se debe involucrar tanto a los planificadores de la red como a los usuarios de la misma, el marco adecuado para formular este tipo de problemas es la programación multinivel, que permite considerar los objetivos de distintos tomadores de decisión en diferentes niveles de planificación. Además, con la realización del proyecto se pretende aportar conocimiento teórico para futuras investigaciones sobre programación multinivel y corredores de transporte de mercancías.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Construir un modelo de programación matemática multinivel para la evaluación de un corredor logístico tipo “green”.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar la revisión de literatura sobre modelos de programación multinivel aplicados a corredores logísticos tipo “green”.

- Definir los niveles presentes y restricciones asociadas a cada nivel para el diseño del modelo matemático de un corredor logístico tipo “green”.
- Implementar un algoritmo de solución para el modelo multinivel a través de las herramientas computacionales MATLAB y GAMS, usando datos obtenidos de fuentes secundarias.
- Elaborar un artículo de carácter publicable sobre el tema investigado.

2. GENERALIDADES

2.1 LOGÍSTICA Y TRANSPORTE DE CARGA

La logística consiste en planear, implementar y controlar efectiva y eficientemente el flujo de bienes, servicios e información desde el punto de origen hasta el punto de destino con el fin de satisfacer las necesidades del cliente⁹. En el contexto de las empresas manufactureras, la logística coordina tres funciones básicas que son: aprovisionamiento, producción y distribución. El aprovisionamiento tiene que ver con la adquisición de toda la materia prima y/o materiales necesarios para desempeñar las actividades de la organización. La producción es la transformación de la materia prima por medio de la interacción de los factores productivos (talento humano, capital, maquinaria, herramientas, equipo) para obtener un producto terminado. Por último, la distribución integra las actividades de almacenamiento, embalaje, transporte y entrega del producto al cliente final¹⁰.

El transporte es la parte más importante de la logística; este proporciona dos servicios: el movimiento y el almacenamiento de productos¹¹. El movimiento es evidente, es decir, los bienes (materia prima, materiales y/o productos) son trasladados hacia su destino, y el almacenamiento, debido a que la carga se guarda durante el transcurso del viaje, ya sean horas, días, semanas, etc.

Algunos de los participantes que intervienen en la operación del transporte son: el expeditor o aquel que requiere el traslado de la mercancía entre dos puntos¹², el transportista o empresa que realiza el servicio de transporte, y el gobierno, quién

⁹ CASTELLANOS RAMÍREZ, Andrés. Manual de gestión logística y del transporte y distribución de mercancías. Barranquilla: Ediciones Uninorte, 2009. 260 p. ISBN 978-958-741-001-3.

¹⁰ GÓMEZ APARICIO, Juan Miguel. Gestión logística y comercial. España: McGraw-Hill, 2013. 214 p. ISBN 978-84-481-8566-4.

¹¹ CASTELLANOS RAMÍREZ. Op. cit., p. 63.

¹² CHOPRA, Sunil y MEINDL, Peter. Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación. 3 ed. México: Pearson Educación, 2008. 552 p. ISBN: 978-970-26-1192-9.

busca un ambiente de transporte estable y eficiente para apoyar el crecimiento económico¹³.

2.1.1 Modos y medios de transporte. El modo de transporte hace referencia al “espacio aéreo, terrestre o acuático soportado por una infraestructura especializada, en el cual transitan los respectivos medios de transporte y a través de éstos la carga y/o los pasajeros. El modo *terrestre* comprende la infraestructura carretera, férrea, por cable y por ductos; el modo *acuático*, la infraestructura marítima, fluvial y lacustre; y el *aéreo*, la infraestructura aeronáutica y aeroportuaria”¹⁴. Mientras que los vehículos utilizados en cada modo, son los medios, por ejemplo, camiones, trenes, barcos, aviones, entre otros.

Dependiendo del modo de transporte, el transporte de carga se puede clasificar en: transporte marítimo, transporte férreo, transporte aéreo, transporte carretero y transporte multimodal; las principales características de cada uno de ellos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de transporte de carga

Tipo de transporte	Características
Marítimo	<ul style="list-style-type: none"> • Modo de transporte que presenta la mayor capacidad de carga. • Cuenta con gran variedad de medios, facilitando el manejo y la movilización de la carga. • Presenta menores costos por tema de economías de escala. • Tiene una baja accesibilidad puesto que los puertos se encuentran en zonas alejadas. • Es el modo de transporte más lento¹⁵.

¹³ BOWERSOX, Donald J.; CLOSS, David J. y COOPER, M. Bixby. Administración y logística en la cadena de suministros. 2 ed. México: McGraw-Hill, 2007. 409 p. ISBN-13: 978-970-10-6132-9.

¹⁴ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Decreto 736 (10, abril, 2014). Por el cual se reglamenta la planeación de los proyectos de infraestructura de transporte con la finalidad de asegurar la intermodalidad, multimodalidad, su articulación e integración, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 9 de la Ley 1682 de 2013. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2014. 4 p.

¹⁵ CASTELLANOS RAMÍREZ. Op. cit., p. 83.

Tabla 1. (Continuación)

Tipo de transporte	Características
Férreo	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta mayor capacidad de carga en comparación con el transporte carretero o aéreo. • Es restringido debido a su infraestructura férrea. • Requiere integrarse con otro modo de transporte para acercarlo al cliente¹⁶.
Aéreo	<ul style="list-style-type: none"> • Es el modo de transporte más rápido. Utilizado para envíos urgentes. • Tiene una gran cobertura. • Su capacidad de carga no es alta en relación con los modos de transporte carretero o acuático. • No es adecuado para la movilización de carga a granel. • Es el modo de transporte más costoso.
Carretero	<ul style="list-style-type: none"> • Versátil, ya que es accesible a las zonas de carga y descarga, y además ofrece el servicio “puerta a puerta”. • Su capacidad de carga es baja en comparación con los otros modos de transporte. • Se ve afectado por los problemas de congestión del tráfico que se presenten en la infraestructura vial. • Tiene un alto costo para la salud y el medio ambiente, ya que provoca contaminación acústica y emisiones de contaminantes como CO₂.
Multimodal	<ul style="list-style-type: none"> • Combina dos o más modos de transporte. • Utiliza las llamadas unidades de carga intermodal (UCI), por ejemplo, contenedores o cajas móviles. • Mayor eficiencia. • Menores costos. • Mayor seguridad de la carga.

2.1.2 Tipos de carga. De acuerdo a su tipo, la carga se clasifica en: carga general y carga a granel¹⁷.

Carga general: Como su nombre lo indica es todo tipo de carga de distinta naturaleza y que estando embalada o sin embalar, puede ser tratada como

¹⁶ GÓMEZ APARICIO. Op. cit., p. 155.

¹⁷ CASTELLANOS RAMÍREZ. Op. cit., p. 21.

unidad. Esta a su vez se divide en: suelta y unitarizada. La carga suelta son aquellos productos individuales como llantas, botellas, ropa, zapatos, tela, etc., que son manipulados en cajas, sacos, o paquetes. La carga unitarizada es aquella que agrupa la mercancía o carga suelta en una unidad de embarque, por ejemplo, contenedores o *pallets*.

Carga a granel: Es aquella que se transporta en grandes cantidades, no requiere embalaje y utiliza el vehículo como su único recipiente. Algunos ejemplos de carga a granel según su estado de la materia son:

- Sólido: Granos, fertilizantes, abonos, entre otros.
- Líquido: Petróleo, lubricantes, gasolina, diesel, entre otros.
- Gaseoso: Gas propano, butano, entre otros.

2.2 MOVILIZACIÓN DE CARGA EN COLOMBIA

La movilización de carga de un país da un indicio de su nivel de desarrollo, productividad y competitividad¹⁸. La tabla 2 muestra la cantidad de carga movilizada a nivel nacional por diferentes modos de transporte para el periodo 2002 - 2013. Como se observa, ha habido un incremento sostenido en la cantidad de carga transportada a lo largo de estos años; además, la movilización se realiza principalmente por el modo carretero, ya que más del 72% de la carga total transportada en los últimos cinco años circuló a través de él.

2.2.1 Transporte de carga por carretera. Los tipos de vehículos del principal modo de transporte en Colombia, así como la infraestructura de transporte existente en el territorio nacional, se presentan en las siguientes secciones.

¹⁸ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE, Diagnóstico del sector transporte 2011, Op. cit., p. 20.

Tabla 2. Movilización de carga en Colombia por modo de transporte

AÑO	CARRETERO	FERROVIARIO			FLUVIAL	AÉREO	CABOTAJE	TOTAL
		Concesiones (sin incluir carbón)	Carbón	Total				
2002	84.019	ND	31.032	31.032	3.480	122	532	119.185
2003	99.782	37	42.744	42.781	3.725	132	928	147.348
2004	117.597	317	45.865	46.182	4.211	129	588	168.707
2005	139.646	308	48.919	49.227	4.863	135	400	194.271
2006	155.196	314	49.394	49.708	4.025	138	509	209.576
2007	183.126	375	52.829	53.204	4.563	137	454	241.484
2008	169.714	236	58.236	58.472	4.953	123	372	233.634
2009	173.558	254	59.144	59.398	4.070	109	364	237.499
2010	181.021	366	66.659	67.025	3.691	119	353	252.209
2011	191.701	204	74.350	74.554	3.650	124	ND	270.029
2012	199.369	20	76.780	76.800	3.474	127	388	280.158
2013	220.309	97	76.684	76.781	2.968	149	774	300.981

Miles de toneladas

Fuente. COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE

2.2.1.1 Tipos de vehículos. Los vehículos se clasifican de acuerdo a su estructura en: vehículos rígidos y vehículos articulados¹⁹ (ver tabla 3).

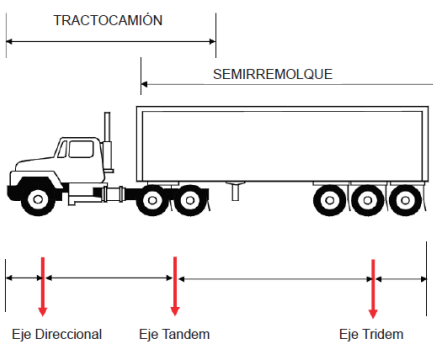
Tabla 3. Clasificación de vehículos según su estructura

Vehículos rígidos	<p>Vehículos cuya tracción (motor) y unidad de carga forman una sola estructura, por ejemplo, los camiones. Un camión es un vehículo automotor que por su tamaño y destinación se usa para transportar carga²⁰.</p>	<p>El diagrama muestra un camión rígido con una cabina y una carrocería (unidad de carga) que forman una sola estructura. Se indican el eje direccional en la parte delantera y el eje de tracción tándem en la parte trasera.</p>
--------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

¹⁹ CASTELLANOS RAMÍREZ. Op. cit., p. 91.

²⁰ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 769 (6, agosto, 2002). Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá D.C., 2002. no. 44932. 96 p.

Tabla 3. (Continuación)

Vehículos articulados	<p>Vehículos integrados por una unidad tractora (por ejemplo, tractocamión) y un semirremolque o remolque. <i>El tractocamión</i> es un vehículo automotor destinado a arrastrar uno o varios semirremolques o remolques, equipado con acople adecuado para tal fin. El <i>semirremolque</i> es un vehículo sin motor, a ser halado por un automotor sobre el cual se apoya y le transmite parte de su peso. El <i>remolque</i> es un vehículo no motorizado, halado por una unidad tractora a la cual no le transmite peso²¹.</p>	 <p>El diagrama muestra un tractocamión con un semirremolque. El tractocamión tiene un eje direccional. El semirremolque tiene un eje tandem y un eje tridem. Se muestran líneas dimensionales para el tractocamión y el semirremolque, y flechas rojas que indican la posición de los ejes.</p>
------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

En la resolución N° 4100 de 2004²² del Ministerio de Transporte de la República de Colombia, los vehículos de transporte de carga por carretera se designan de acuerdo a la configuración de sus ejes así:

- Con el primer dígito se denota el número de ejes del camión o del tractocamión (Cabezote).
- La letra S significa semirremolque y el dígito inmediato indica el número de sus ejes.
- La letra R significa remolque y el dígito inmediato indica el número de sus ejes.

Considerando la designación anterior, algunos de los tipos de vehículos se muestran en la tabla 4.

²¹ Ibid., p. 9.

²² COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 4100 (28, diciembre, 2004). Por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2004. 9 p.

Tabla 4. Tipos de vehículos de carga

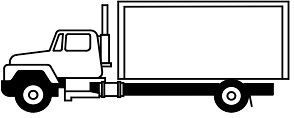
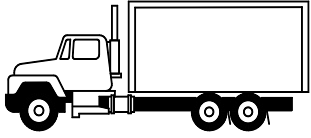
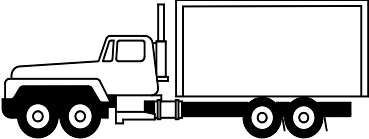
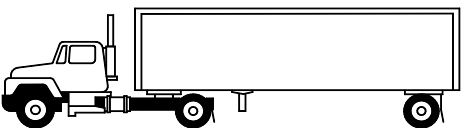
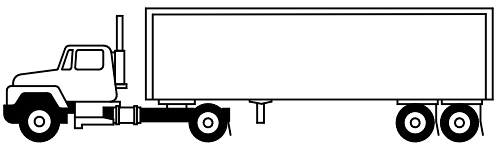
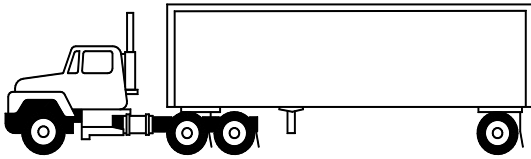
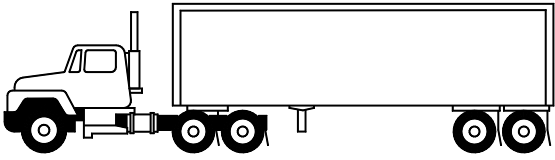
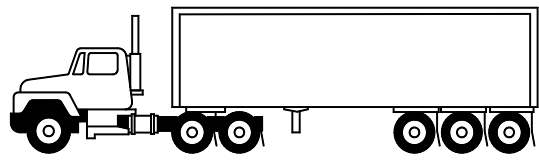
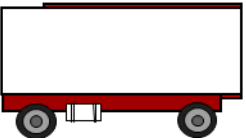

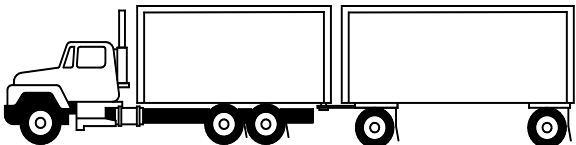
	Designación	Configuración	Descripción
Vehículos rígidos	2		Camión de dos ejes Camión Sencillo
	3		Camión de tres ejes Dobletroque
	4		Camión de cuatro ejes
Vehículos articulados	2S1		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de un eje
	2S2		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de dos ejes
	3S1		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de un eje
	3S2		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes
	3S3		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes
	R2		Remolque de dos ejes

Tabla 4. (Continuación)

	Designación	Configuración	Descripción
Vehículos articulados	2R2		Camión de dos ejes con remolque de dos ejes
	3R2		Camión de tres ejes Dobletroque con remolque de dos ejes

Fuente. COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE

2.2.1.2 Infraestructura de transporte. En Colombia, la infraestructura de transporte para el modo carretero se divide en: vías primarias (a cargo de la nación), vías secundarias (a cargo de los departamentos) y vías terciarias (a cargo de la nación, departamentos y municipios). A diciembre de 2013, la red vial primaria nacional contaba con 17.037 km; sin embargo, evidenciando la insuficiente infraestructura vial, Colombia ha buscado mejorar la capacidad para facilitar la conectividad de los principales centros de producción con los de consumo y aumentar la competitividad del país, mediante la ampliación de vías existentes y/o construcción de nuevos kilómetros. Los kilómetros de vías existentes durante el periodo 2002-2013, se muestran en la tabla 5.

2.3 CORREDORES LOGÍSTICOS

La definición de corredor puede tener diferentes interpretaciones. Priemus y Zonneveld (2003) lo definen como aquella “infraestructura que une dos o más áreas urbanas. Estas pueden ser carreteras, conexiones ferroviarias, conexiones marítimas y conexiones aéreas”²³. De igual manera, Rodrigue, Comtois y Slack

²³ PRIEMUS, Hugo y ZONNEVELD, Wil. What are corridors and what are the issues? Introduction to special issue: the governance of corridors. Journal of Transport Geography [en línea]. 2003, vol. 11, no. 3 [citado en 2014-10-10], p. 167-177. Disponible en ScienceDirect.

(2012)²⁴ asocian el concepto de corredor de transporte con la conexión de lugares que actúan como puntos de origen y/o destino de rutas de transporte.

Tabla 5. Infraestructura de transporte (modo carretero) en Colombia

AÑO	PRIMARIAS			SECUNDARIAS	TERCIARIAS			TOTAL RED VIAL NACIONAL	
	A cargo de la Nación		Subtotal	A cargo de los departamentos - PVR	A cargo de la Nación - INVIAS	A cargo de los departamentos	A cargo de los municipios		Subtotal
	Concesionado - ANI	No concesionado - INVIAS							
2002	0	16.531	16.531	27.918	240	ND	72.561	72.801	117.250
2003	0	16.528	16.528	34.918	240	ND	65.653	65.893	117.339
2004	0	16.677	16.677	34.918	145	ND	72.761	72.906	124.501
2005	0	16.750	16.750	34.918	145	ND	72.761	72.906	124.574
2006	2.628	14.143	16.771	34.918	145	ND	72.761	72.906	124.595
2007	3.380	13.296	16.676	34.918	145	ND	72.761	72.906	124.500
2008	3.400	13.276	16.676	34.918	27.577	ND	72.761	100.338	151.932
2009	3.400	13.386	16.786	34.918	27.577	ND	37.953	65.530	117.234
2010	5.680	11.463	17.143	38.315	27.577	21.469	86.633	135.679	191.137
2011	5.578	11.320	16.898	42.954	27.577	13.959	100.409	141.945	201.797
2012	5.262	11.856	17.118	43.327	27.577	13.959	100.409	141.945	202.390
2013	5.202	11.835	17.037	44.399	27.577	13.959	100.419	141.955	203.391

Fuente. COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE

Como es sabido, los corredores pueden ser utilizados para el transporte de pasajeros y/o mercancías; de manera tal que se requiere una visión más amplia acerca de lo que éstos significan. Además, teniendo en cuenta que el transporte, es parte de la logística y es esencial para el intercambio de mercancías; es posible adicionar al concepto aspectos logísticos, llegando así a lo que se conoce como “corredor logístico”.

El Banco Mundial define un corredor logístico como “aquel que articula de manera integral orígenes y destinos en aspectos físicos y funcionales como la

²⁴ RODRIGUE, Jean-Paul; COMTOIS, Claude y SLACK, Brian. The geography of transport systems. Citado por REGMI, Madan B. y HANAOKA, Shinya. Assessment of intermodal transport corridors: Cases from North-East and Central Asia. Research in Transportation Business & Management [en línea]. 2012, vol. 5 [citado en 2014-10-10], p. 27-37. Disponible en ScienceDirect.

infraestructura de transporte, los flujos de información y comunicaciones, las prácticas comerciales y de facilitación del comercio”²⁵. Así mismo, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) establece que es aquel que permite el movimiento de mercancías y físicamente no solo considera tramos sino también diferentes nodos de infraestructura (puertos, aeropuertos, pasos de frontera, etc.). De esta manera el corredor logístico integra dos aspectos: la infraestructura (tramos, nodos, modos) y las operaciones, con base en las cadenas logísticas que los utilizan²⁶.

De la misma forma, el Ministerio de Transporte de la República de Colombia, mediante el decreto número 736 de 2014 define un corredor logístico como un “sistema integrado que articula de manera continua la infraestructura de transporte con los nodos de transporte, con un nivel de servicio adecuado, sirviendo tanto a la producción y al consumo interno como al comercio exterior”²⁷.

En definitiva, el concepto de corredor se ha transformado, por el hecho de que actualmente no solo son concebidos como medios para interconectar zonas, guiar a los gobiernos al momento de ajustar la urbanización futura, sino que permiten el intercambio comercial y hacerlo de manera eficiente impacta directamente la competitividad de un país.

Por otra parte, la Comisión Europea (CE) reconoce que los corredores de transporte tienen un fuerte impacto en la calidad del aire, debido a las emisiones de GEI, y una de las situaciones comunes que se presentan en estos, son los llamados cuellos de botella (donde se produce congestión vehicular), los cuales

²⁵ BANCO MUNDIAL. DEPARTAMENTO DE FINANZAS, SECTOR PRIVADO E INFRAESTRUCTURA. Infraestructura logística y de calidad para la competitividad de Colombia [en línea]. Ene. 2006. [citado en 2014-10-10]. Disponible en: <<http://documentos.bancomundial.org/curated/es/2006/01/6998094/infraestructura-logistica-y-de-calidad-para-la-competitividad-de-colombia>>

²⁶ BID. Análisis, estrategia e instrumentos para el mejoramiento de la logística de cargas y el comercio en Mesoamérica. Modelo evaluación de corredores y cadenas logísticas [en línea]. [citado en 2014-05-19]. Disponible en: <http://67.228.126.86/1_INFORMES/1_3_MODELO/1_3_modelo.aspx>

²⁷ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE, Decreto 736, Op. cit., p. 2.

generan largos tiempos de espera, consumo adicional de combustible y a su vez mayores emisiones de CO₂²⁸; mostrando con ello la afectación al medio ambiente por parte del sector transporte, y la importancia de considerar el aspecto ambiental en la definición de corredores.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el año 2007 la CE introduce el concepto de “corredores verdes”, el cual es entendido como sistemas de transporte de mercancías y pasajeros, en los que la logística y el medio ambiente son los principales criterios de diseño y operación²⁹. Lo que busca es el desarrollo de corredores de transporte eficientes y sostenibles ambientalmente; a través de la implementación de TICs, políticas para la reducción de emisiones, utilización de transporte intermodal, etc.³⁰

En conclusión, los corredores de transporte no simplemente pueden entenderse en términos de infraestructura para la interconexión de dos o más áreas, más aún cuando se habla de corredores de transporte de mercancías, donde la logística y el medio ambiente son factores de suma importancia. De esta forma, un corredor logístico “green” se puede definir como aquel que articula infraestructura con servicios logísticos y en su diseño, tiene en cuenta el aspecto ambiental.

2.4 TRANSPORTE Y MEDIO AMBIENTE

Uno de los grandes retos en la sociedad tiene que ver con el aspecto ambiental, debido al fenómeno del calentamiento global. Según cifras del año 2013, el 95% de la causa del calentamiento es el aumento de gases de efecto invernadero (GEI), que resultan de actividades humanas como la quema de combustibles

²⁸ CLAUSEN, Uwe; GEIGER, Christiane y BEHMER, Carl. Green corridors by means of ICT applications. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* [en línea]. 2012, vol. 48 [citado en 2014-04-10], p. 1877-1886. Disponible en ScienceDirect.

²⁹ ESPAÑA. MINISTERIO DE FOMENTO. Op. cit., p. 1.

³⁰ PSARAFTIS, Harilaos N. y PANAGAKOS, George. Green Corridors in European surface freight logistics and the SuperGreen Project. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* [en línea]. 2012, vol. 48. [citado en 2014-04-10], p. 1723-1732. Disponible en ScienceDirect.

fósiles (carbón, gasolina, gas natural y petróleo) y la deforestación³¹. El dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y el Ozono (O₃) son los principales GEI presentes en la atmósfera³².

El GEI que tiene mayor implicación en el calentamiento global es el CO₂³³, el cual genera consecuencias tales como aumento en el nivel del mar, inundaciones, pérdida de la biodiversidad, etc. Luego es de vital importancia su reducción, puesto que a concentraciones superiores a 350 ppmv (partes por millón por volumen) contribuye activamente a las consecuencias del cambio climático³⁴.

Si bien, el transporte de pasajeros como de carga es importante para el crecimiento económico y desarrollo mundial, tiene efectos secundarios negativos como la contaminación acústica, la degradación de los recursos naturales y la contaminación atmosférica, este último producto del alto consumo de combustibles fósiles³⁵. Como ejemplo, “cada litro de combustible que se quema, produce aproximadamente 100 gramos de monóxido de carbono (CO), 20 gramos de compuestos orgánicos volátiles, 30 gramos de N₂O, 2.5 kilogramos de CO₂ y otra serie de sustancias que incluyen compuestos del plomo, del azufre así como partículas ligeras. Todos estos componentes están relacionados, en mayor o menor grado, con los problemas de contaminación atmosférica”³⁶. Por

³¹ BBC News. IPCC climate report: humans 'dominant cause' of warming [en línea]. Septiembre de 2013. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <<http://www.bbc.com/news/science-environment-24292615>>

³² INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Cambio Climático [en línea]. Actualizado en enero de 2014. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>>

³³ TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE y TEXAS A&M UNIVERSITY SYSTEM, COLLEGE STATION, TEXAS. Sustentabilidad de los corredores de transporte de carga en América del Norte [en línea]. 2010. [citado en 2014-04-13]. Disponible en: <<http://www3.cec.org/islandora/es/item/4093-greening-north-american-transportation-corridors-es.pdf>>

³⁴ NOCERA, Silvio y CAVALLARO, Federico. Policy Effectiveness for containing CO₂ Emissions in Transportation. *Procedia Social and Behavioral Sciences* [en línea]. 2011, vol. 20 [citado en 2014-04-13], p. 703-713. Disponible en ScienceDirect.

³⁵ CENTRO DE TRANSPORTE SOSTENIBLE. El papel del transporte en el Cambio Climático [en línea]. México. 2014. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <<http://finanzascarbono.org/comunidad/pg/file/gabrielaNi%C3%B1o/read/5424/el-papel-del-transporte-en-el-cambio-climatico-cts-mexico>>

³⁶ MEDIO AMBIENTE, ENERGÍA Y TRANSPORTE. [en línea]. 2003. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <http://www.eu-portal.net/material/downloadarea/kt5_wm_es.pdf>

consiguiente, el aumento del transporte mundial trae consigo un incremento en las emisiones de GEI y constituye uno de los principales contribuyentes del cambio climático³⁷.

Considerando que la mayor parte del transporte de carga por carretera se realiza a través de vehículos que emiten una gran cantidad de contaminantes como N₂O, CO₂, partículas en suspensión (PM), óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos (HC), los cuales resultan perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la salud humana³⁸, el aspecto ambiental debe ser incluido en los modelos de optimización existentes para la evaluación y/o diseño de corredores, con el fin de disminuir los efectos negativos que se puedan llegar a generar.

³⁷ FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL. Invertir en el transporte urbano sostenible. La experiencia del FMAM [en línea]. *sine facta*. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <https://www.thegef.org/gef/sites/thegef.org/files/publication/urban-transport-ES_0.pdf>

³⁸ *Ibid.*, p. 775.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 PROGRAMACIÓN MULTINIVEL

En términos generales, un problema de programación matemática con restricciones puede ser formulado como³⁹:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar/Maximizar}_y \quad & f(\mathbf{y}) \\ \text{s. a} \quad & \mathbf{g}_j(\mathbf{y}) \geq \mathbf{0}, \quad j = 1, \dots, J \\ & \mathbf{h}_k(\mathbf{y}) = \mathbf{0}, \quad k = 1, \dots, K \\ & \mathbf{y}_i^l \leq \mathbf{y}_i \leq \mathbf{y}_i^u, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

Donde la solución \mathbf{y} es un vector de n variables de decisión; $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_n]^T$. La función $f(\mathbf{y})$ es la función objetivo, $\mathbf{g}_j(\mathbf{y})$ es el conjunto de restricciones de desigualdad y $\mathbf{h}_k(\mathbf{y})$ es el conjunto de restricciones de igualdad. El último conjunto de restricciones indica que cada variable de decisión puede tomar un valor dentro del rango $[\mathbf{y}_i^l, \mathbf{y}_i^u]$. En el problema (1), se supone existe un único objetivo que corresponde a un solo tomador de decisión; sin embargo, muchos problemas del mundo real implican el análisis de varios objetivos, en algunas ocasiones contrapuestos entre sí. Para analizar múltiples objetivos se han desarrollado técnicas de optimización denominadas multiobjetivo cuya formulación general es⁴⁰:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar/Maximizar}_y \quad & (f_1(\mathbf{y}), f_2(\mathbf{y}), \dots, f_m(\mathbf{y})) \\ \text{s. a} \quad & \mathbf{g}_j(\mathbf{y}) \geq \mathbf{0}, \quad j = 1, \dots, J \\ & \mathbf{h}_k(\mathbf{y}) = \mathbf{0}, \quad k = 1, \dots, K \\ & \mathbf{y}_i^l \leq \mathbf{y}_i \leq \mathbf{y}_i^u, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

³⁹ DEB, Kalyanmoy. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [en línea]. 2000, vol. 186, no. 2-4 [citado en 2015-02-15], p. 311–338. Disponible en ScienceDirect.

⁴⁰ DEB, Kalyanmoy. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 497 p. ISBN 0-471-87339-X.

El problema (2) supone se tienen varios objetivos que corresponden a un solo planificador y éstos se encuentran al mismo nivel; sin embargo, se presentan situaciones en las que existe una estructura jerárquica, es decir, hay varios tomadores de decisión en distintos niveles de planificación, interrelacionados entre sí.

Un ejemplo de estructura jerárquica, reconocido en la literatura, es el problema de optimización de peaje, en el que los administradores de una red de transporte buscan maximizar los ingresos recaudados por concepto de los peajes establecidos en determinados enlaces de la red, y al mismo tiempo los usuarios de la misma intentan minimizar su costo de viaje total. Una vez los administradores de la red han establecido los peajes, los viajeros *reaccionan* seleccionando su ruta de manera tal que el costo de tiempo, distancia y peajes sean minimizados⁴¹; de esta forma, se puede observar la relación jerárquica entre los dos tomadores de decisión (administradores y usuarios).

Con base en lo anterior, un problema de programación multinivel u optimización jerárquica, describe un sistema compuesto por dos o más niveles de toma de decisiones, y al igual que la optimización multiobjetivo, es una generalización de la programación matemática⁴², con la diferencia de que analiza los objetivos en todos los niveles.

3.1.1 Problema de programación binivel. El modelo más simple de programación multinivel es el problema de programación binivel (BPP, por su sigla en inglés), el cual es un problema de optimización jerárquico que incluye como

⁴¹ HIZIR, Ahmet Esat. Using emission functions in mathematical programming models for sustainable urban transportation: an application in bilevel optimization. Tesis de Master of Science. Istanbul: Sabanci University. Graduate School of Engineering and Natural Sciences. 2006. 69 p.

⁴² CHINCHULUUN, Altannar, PARDALOS, Panos M. y HUANG, Hong-Xuan. Multilevel (Hierarchical) Optimization. Complexity Issues, Optimality Conditions, Algorithms. Advances in Mechanics and Mathematics [en línea]. 2009, vol. 17 [citado en 2014-04-10], p. 197-221. Disponible en SpringerLink. ISBN 978-0-387-75714-8.

restricción otro problema de optimización. Como su nombre lo indica, consta de dos niveles, el nivel superior o “líder” y el nivel inferior o “seguidor”. En este sistema jerárquico, el líder toma su decisión con el fin de optimizar su objetivo, y el seguidor, observa la decisión tomada por el líder (tiene en cuenta lo impuesto) y reacciona de manera personal tomando otra decisión que optimice su propio objetivo⁴³. Es decir, el tomador de decisión en el nivel inferior intenta optimizar su función objetivo, considerando los parámetros dados por el tomador de decisión del nivel superior, quien a su vez elige las variables (“parámetros” para el seguidor) con el fin de optimizar su función objetivo basado en información completa sobre las posibles respuestas del tomador de decisión de nivel inferior. Aunque cada jugador intenta optimizar su propio objetivo sin considerar el objetivo del otro, sus decisiones son interdependientes, ya que la decisión de uno afecta el objetivo y el espacio de decisión factible del otro⁴⁴.

El modelo general del BPP es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Minimizar/Maximizar}_z \quad F(z, x) \\
 & \textit{s. a} \quad G_j(z, x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J \\
 & \quad \quad H_k(z, x) = 0, \quad k = 1, \dots, K \\
 & \quad \quad z_i^l \leq z_i \leq z_i^u, \quad i = 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 & \textit{Minimizar/Maximizar}_x \quad f(z, x) \\
 & \textit{s. a} \quad g_j(z, x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J \\
 & \quad \quad h_k(z, x) = 0, \quad k = 1, \dots, K \\
 & \quad \quad x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, \quad i = 1, \dots, n
 \end{aligned}$$

⁴³ ZHU, Xiaobo; YU, Qian y WANG, Xianjia. A hybrid differential evolution algorithm for solving nonlinear bilevel programming with linear constraints. *En*: International Conference on Cognitive Informatics (5: 17-19, julio, 2006: Beijing). IEEE. 2006. p. 126-131. ISBN 1-4244-0475-4.

⁴⁴ LI, Xiangyong; TIAN, Peng y MIN, Xiaoping. A hierarchical particle swarm optimization for solving bilevel programming problems. *Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2006* [en línea]. 2006, vol. 4029 [citado en 2015-02-15], p. 1169-1178. Disponible en SpringerLink. ISBN 978-3-540-35750-6.

Donde $z \in R^{n_1}$ representa el vector de variables de decisión del nivel superior y $x \in R^{n_2}$ el vector de variables de decisión del nivel inferior. F y f son las funciones objetivo de nivel superior e inferior, respectivamente. Así mismo, $G_j(z, x)$, $H_k(z, x)$, $z_i^l \leq z_i \leq z_i^u$ y $g_j(z, x)$, $h_k(z, x)$, $x_i^l \leq x_i \leq x_i^u$, denotan las restricciones de nivel superior e inferior⁴⁵.

La formulación original del BPP apareció en 1973 en documentos de los autores J. Bracken y J. McGill; sin embargo, los términos programación multinivel y binivel fueron acuñados por Candler y Norton⁴⁶.

Como en cualquier problema de optimización, los problemas binivel pueden tener funciones objetivo lineales o no lineales, y las variables de decisión pueden ser continuas, discretas o mixtas. Cuando las funciones objetivo y restricciones del nivel superior e inferior son lineales, el problema (3) se conoce como “problema de programación lineal binivel” (BLPP, por su sigla en inglés). Si al menos una de las funciones objetivo o restricciones son no lineales, el problema se denomina “problema de programación no lineal binivel” (BLNPP, por su sigla en inglés)⁴⁷.

Diversas situaciones se pueden modelar en el marco de la programación binivel; sin embargo, la falta de algoritmos eficientes para resolver problemas de gran escala, es la razón principal para que su implementación en la vida real sea más bien escasa⁴⁸. Además, el BPP es considerado un problema *NP-hard*, lo que significa que el esfuerzo computacional requerido para obtener las mejores soluciones crece exponencialmente con el tamaño del problema⁴⁹, siendo difícil de

⁴⁵ BARD, Jonathan F. Practical Bilevel Optimization. Algorithms and Applications. [s.l.]: Springer, 1998. 473 p. (Serie Nonconvex Optimization and Its Applications; no. 30). ISBN 978-1-4419-4807-6.

⁴⁶ VICENTE, Luis N. y CALAMAI, Paul H. Bilevel and Multilevel Programming: A Bibliography Review. Journal of Global Optimization [en línea]. 1994, vol. 5, no. 3 [citado en 2014-10-14], p. 291-306. Disponible en SpringerLink. ISSN 1573-2916.

⁴⁷ CHINCHULUUN, PARDALOS y HUANG. Op. cit., p. 198.

⁴⁸ HIZIR. Op. cit., p. 17.

⁴⁹ SZETO, W. Y.; WANG, Yi y WONG, S. C. The Chemical Reaction Optimization Approach to Solving the Environmentally Sustainable Network Design Problem. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering [en línea]. 2014, vol. 29, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 140-158. Disponible en Scopus. ISSN 10939687.

resolver. Incluso el modelo más simple, el BLPP, resultó ser *NP-hard* en el trabajo realizado por Ben Ayed y otros⁵⁰.

Al comparar los modelos de programación binivel con los de un solo nivel, se pueden observar dos ventajas importantes del primero, que son:

- Analiza de manera simultánea dos objetivos diferentes e incluso conflictivos en el proceso de toma de decisiones.
- Modela situaciones de la vida real de naturaleza jerárquica en donde existe una relación líder-seguidor⁵¹.

Generalmente los problemas de programación binivel incluyen solo un líder y un seguidor; sin embargo, es posible que el nivel inferior involucre varias unidades de decisión, es decir, se trate de un problema de programación binivel de múltiples seguidores⁵², lo cual no se tratará en este documento.

3.1.1.1 Solución de problemas binivel. Debido a su complejidad intrínseca (relación implícita entre las variables de decisión de nivel superior e inferior), los modelos binivel son reconocidos como problemas difíciles y desafiantes de resolver. Según El-Ghazali Talbi (2013)⁵³, dos enfoques para resolverlos son: el anidado secuencial y la transformación a un solo nivel; sin embargo, en este

⁵⁰ GAO, Ziyou, WU, Jianjun y SUN, Huijun. Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. *Transportation Research Part B* [en línea]. 2005, vol. 39, no. 6 [citado en 2014-04-10], p. 479-495. Disponible en ScienceDirect.

⁵¹ GAO, Ziyou, WU, Jianjun y SUN, Huijun. A bi-level programming model and solution algorithm for the location of logistics distribution centers. *Applied Mathematical Modelling* [en línea]. 2008, vol. 32, no. 4 [citado en 2014-04-12], p. 610-616. Disponible en ScienceDirect.

⁵² LU, Jie, SHI, Chenggen y ZHANG, Guangquan. On bilevel multi-follower decision making. General framework and solutions. *Information Sciences* [en línea]. 2006, vol. 176, no. 11 [citado en 2014-04-12], p. 1607-1627. Disponible en ScienceDirect.

⁵³ TALBI, El-Ghazali. *Metaheuristics for Bi-level Optimization*. [s.l.]: Springer, 2013. 288 p. (Serie Studies in Computational Intelligence; no. 482). ISBN 978-3-642-37838-6.

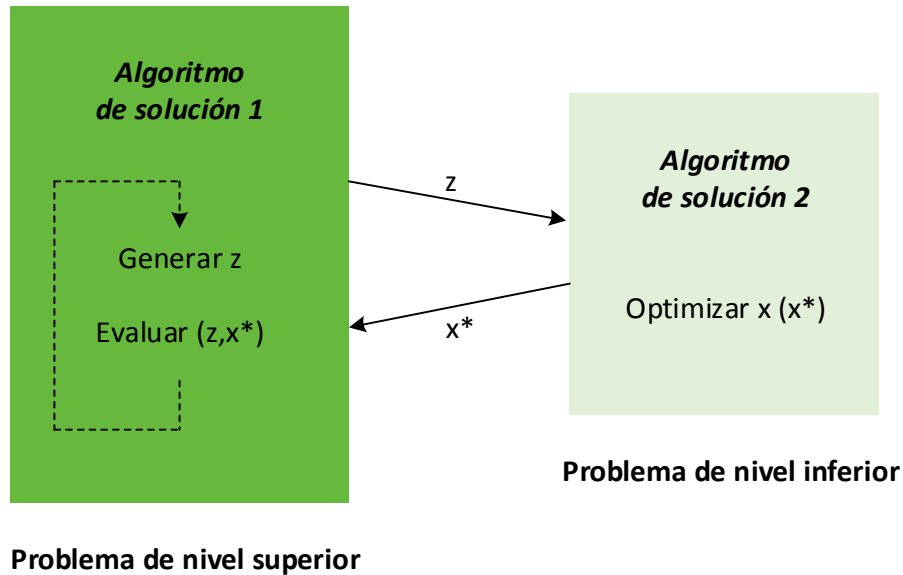
trabajo solo se describirá el funcionamiento del primero, por ser el utilizado en el algoritmo propuesto (GMED).

El enfoque anidado secuencial consiste en resolver los dos niveles secuencialmente, e ir evaluando y mejorando las soluciones generadas en cada nivel para conseguir una buena solución global en ambos niveles. En este enfoque, inicialmente se genera una solución en el nivel superior (es decir, z), la cual es enviada al problema de nivel inferior. En el nivel inferior, se procede a fijar la variable z como parámetro, y mediante un algoritmo de optimización, el problema de nivel inferior se resuelve para encontrar una solución de x (es decir, x^*). Luego, la solución del nivel inferior se transmite al nivel superior para evaluar el objetivo del nivel superior por cada solución (z, x^*) . Lo anterior itera hasta cumplirse un criterio de parada. En la figura 1 se muestra un esquema del enfoque.

Con base en lo anterior, es importante resaltar que para cada solución del problema de nivel superior es necesario resolver el problema de nivel inferior, luego la eficiencia del enfoque depende de la dificultad en resolver este último.

El enfoque anidado se caracteriza por utilizar cualquier estrategia de optimización para resolver el problema de nivel superior e inferior; dependiendo de la complejidad de cada uno de ellos. Cuando el conjunto de soluciones factibles se puede explorar de forma exhaustiva, los *métodos exactos* son utilizados; en caso contrario, se emplean métodos aproximados como *metaheurísticas*. Generalmente, el problema de nivel superior se resuelve a través de metaheurísticas; y si una misma metaheurística es utilizada en ambos niveles, el enfoque anidado se denomina “homogéneo”.

Figura 1. Enfoque anidado secuencial



Fuente. TALBI, El-Ghazali.

Los métodos exactos encuentran la solución óptima de un problema de optimización en un tiempo determinado; sin embargo, en problemas *NP-hard* tardarían tanto tiempo que los hace completamente inaplicables⁵⁴. La búsqueda exhaustiva y la familia de algoritmos *Branch and X* son ejemplos de este tipo. La búsqueda exhaustiva es el enfoque más antiguo para solucionar un problema, consiste en generar y evaluar todas las posibles soluciones dentro del espacio de búsqueda factible; aunque su principal desventaja es el excesivo consumo de tiempo de cálculo⁵⁵. La familia de algoritmos *Branch and X* (*Branch and Bound*, *Branch and Cut*, *Branch and Price*) básicamente utilizan una estrategia de

⁵⁴ VIDAL ESMORÍS, Aitana. Algoritmos heurísticos en optimización. Tesis Máster en Técnicas Estadísticas. Santiago de Compostela, España: Universidad de Santiago de Compostela. Facultad de Matemáticas, 2013. 94 p.

⁵⁵ MORILLO, Daniel; MORENO, Luis y DÍAZ, Javier. Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSp): una revisión. Parte 1. Ingeniería y Ciencia [en línea]. 2014, vol. 10, no. 19 [citado 05 febrero 2015], p. 247-271. Disponible en: <<http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v10n19/v10n19a13.pdf>>. ISSN 1794-9165.

fraccionar y dominar, donde el espacio de soluciones se divide en subproblemas y luego se resuelve cada uno de manera individual⁵⁶.

Los métodos aproximados, a diferencia de los exactos, no garantizan encontrar una solución óptima sino una “buena” solución para el problema de optimización. Dentro de estos métodos se encuentran las metaheurísticas, definidas como algoritmos de búsqueda “inteligentes” que encuentran soluciones satisfactorias en un tiempo razonable⁵⁷. Según Gendreau y Potvin (2005)⁵⁸, las metaheurísticas se clasifican en metaheurísticas de única solución (también conocidas como metaheurísticas de trayectoria) y metaheurísticas de población. Las *metaheurísticas de única solución*, parten de una solución y a través de la exploración del vecindario se va actualizando la solución actual, formando así una trayectoria⁵⁹. Ejemplos de este tipo son el recocido simulado y la búsqueda tabú. En tanto que, las *metaheurísticas basadas en población*, mejoran un conjunto de soluciones (población) de forma inteligente explorando el espacio de búsqueda, hasta que se cumple un determinado criterio de parada (por ejemplo, número máximo de generaciones)⁶⁰; algoritmos genéticos, colonia artificial de abejas, sistema de hormigas, y optimización de enjambre de partículas, son algunos ejemplos.

3.2 PROBLEMAS DE DISEÑO DE REDES DE TRANSPORTE

Diversas situaciones del mundo real en las que se toman decisiones para fijar ciertas políticas, las cuales generan una respuesta o reacción de los usuarios de

⁵⁶ JOURDAN, L.; BASSEUR, M. y TALBI, E.-G. Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. European Journal of Operational Research [en línea]. 2009, vol. 199, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 620-629. Disponible en ScienceDirect.

⁵⁷ TALBI, El-Ghazali. Metaheuristics. From Design to Implementation. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 593 p. ISBN 978-0-470-27858-1.

⁵⁸ GENDREAU, Michel y POTVIN, Jean-Yves. Metaheuristics in Combinatorial Optimization. Annals of Operations Research [en línea]. 2005, vol. 140, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 189-213. Disponible en SpringerLink. ISSN 1572-9338.

⁵⁹ CHICANO GARCÍA, José Francisco. Metaheurísticas e Ingeniería del Software. Tesis Doctoral. Málaga: Universidad de Málaga. Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación, 2007. 267 p.

⁶⁰ TALBI, Metaheuristics for Bi-level Optimization, Op. cit., p. 19.

un sistema, podrían ser modeladas de forma adecuada mediante la programación binivel, debido a la naturaleza jerárquica existente entre quienes deciden las políticas y los usuarios⁶¹. Algunos campos en los cuales se encuentran aplicaciones de la programación binivel son: la economía, la ecología, la ingeniería y el transporte⁶². De hecho, las primeras aplicaciones se hallan en el sector transporte⁶³; siendo el problema de diseño de red de transporte (TNDP, por su sigla en inglés), también conocido como problema de diseño de red vial (RNDP, por su sigla en inglés) o problema de diseño de red (NDP, por su sigla en inglés), como en adelante se llamará en este documento, uno de los temas ampliamente investigado en este sector, y relacionado con la inversión en infraestructura.

Los NDP son formulados como problemas de programación binivel, teniendo en cuenta la existencia de dos tomadores de decisión en el sistema de transporte: los que deciden sobre la configuración o mejora de la red con el fin de hacer un uso eficiente de sus recursos (*planificadores* —en el nivel superior—), y aquellos que eligen las rutas para realizar sus viajes (*usuarios* —en el nivel inferior—)⁶⁴; ambos interrelacionados entre sí y cada uno afectando la decisión del otro, ya que los planificadores deben tener en cuenta el comportamiento de los usuarios, y la reacción de estos últimos se da con base en las decisiones tomadas por los primeros, que a su vez afecta la decisión de los planificadores⁶⁵.

Tradicionalmente en los NDP, el problema de nivel superior determina la ampliación y/o adición óptima de enlaces para minimizar una medida de rendimiento del sistema, por ejemplo, el tiempo o costo de viaje total, sujeto a

⁶¹ HIZIR. Op. cit., p. 17.

⁶² DEMPE, Stephan. BILEVEL PROGRAMMING - A SURVEY [en línea]. [citado en 2015-05-10]. Disponible en: <http://www.mathe.tu-freiberg.de/~dempe/Artikel/bilevel_survey.pdf>

⁶³ BARD. Op. cit., p. 391.

⁶⁴ SHARMA, Sushant y MATHEW, Tom V. Multiobjective network design for emission and travel-time trade-off for a sustainable large urban transportation network. *Environment and Planning B: Planning and Design* [en línea]. 2011, vol. 38, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 520-538. Disponible en Scopus. ISSN 02658135.

⁶⁵ CHEN, Anthony y XU, Xiangdong. Goal programming approach to solving network design problem with multiple objectives and demand uncertainty. *Expert Systems with Applications* [en línea]. 2012, vol. 39, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 4160-4170. Disponible en ScienceDirect.

unas restricciones; y el problema de nivel inferior, corresponde al problema de equilibrio de usuario determinista (DUE, por su sigla en inglés), el cual tiene como objetivo minimizar el tiempo o costo de viaje de los usuarios, describiendo el comportamiento de los mismos a través de la determinación de los patrones de flujo de la red⁶⁶.

Dependiendo de la naturaleza de las decisiones consideradas en el nivel superior, el NDP puede ser abordado de diferentes maneras, tales como:

- El problema de diseño de red continuo (CNDP), en el que las variables de decisión involucradas son continuas.
- El problema de diseño de red discreto (DNDP), cuyas variables de decisión son discretas.

El diseño de las redes de transporte, se puede llevar a cabo de diversas formas; dos de las más comunes son el aumento de la capacidad de los enlaces existentes y/o la construcción o adición de nuevos enlaces. Si en el nivel superior se establece como variable de decisión el aumento de la capacidad de algunos enlaces existentes y dicha variable es *continua*, este es considerado un problema CNDP, que determina cuánto se deben mejorar los enlaces en términos de capacidad vial.

En la literatura, se identificaron tres modelos CNDP binivel típicos, en los que varía el problema de nivel superior, ya que el nivel inferior continúa siendo el tradicional problema DUE. La diferencia radica en que, algunos estudios consideran en la función objetivo de nivel superior el costo de inversión (modelo 1), y la definen como una función de tiempo de viaje generalizada, que corresponde a la suma del

⁶⁶ WANG, Guangmin, *et al.* Models and a relaxation algorithm for continuous network design problem with tradable credits scheme and equity constraints. *Computers & Operations Research* [en línea]. 2014, vol. 42, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 252-261. Disponible en ScienceDirect.

tiempo de viaje total en la red y el costo de inversión total de las expansiones de capacidad, este último trasladado a unidades de tiempo mediante un factor de conversión; algunos trabajos que utilizan este enfoque son los desarrollados por Abdulaal y LeBlanc (1979)⁶⁷, Suwansirikul, Friesz y Tobin (1987)⁶⁸, Marcotte y Marquis (1992)⁶⁹, Meng, Yang y Bell (2001)⁷⁰, Chiou (2005)⁷¹, Koh (2007)⁷², Xu, Wei y Wang (2009)⁷³, Baskan y Dell'Orco (2012)⁷⁴, Baskan (2013)⁷⁵, Baskan (2014)⁷⁶, y Baskan y Ceylan (2014)⁷⁷. Mientras que, el efectuado por Wang y Lo (2010)⁷⁸, a diferencia del anterior, simplemente estableció que el tiempo de viaje total se traslada a unidades de costo monetario (modelo 2), usando también un factor de conversión.

⁶⁷ ABDULAAL, Mustafa y LEBLANC, Larry J. Continuous equilibrium network design models. *Transportation Research Part B* [en línea]. 1979, vol. 13, no.1 [citado en 2015-02-15], p. 19-32. Disponible en ScienceDirect.

⁶⁸ SUWANSIRIKUL, Chaisak; FRIESZ, Terry L. y TOBIN, Roger L. Equilibrium Decomposed Optimization: A Heuristic for the Continuous Equilibrium Network Design Problem. *Transportation Science* [en línea]. 1987, vol. 21, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 254-263. Disponible en JSTOR Journals. ISSN 0041-1655.

⁶⁹ MARCOTTE, Patrice y MARQUIS, Gérald. Efficient implementation of heuristics for the continuous network design problem. *Annals of Operations Research* [en línea]. 1992, vol. 34, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 163-176. Disponible en SpringerLink. ISSN 1572-9338.

⁷⁰ MENG, Q.; YANG, H. y BELL, M.G.H. An equivalent continuously differentiable model and a locally convergent algorithm for the continuous network design problem. *Transportation Research Part B* [en línea]. 2001, vol. 35, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 83-105. Disponible en ScienceDirect.

⁷¹ CHIOU, Suh-Wen. Bilevel programming for the continuous transport network design problem. *Transportation Research Part B* [en línea]. 2005, vol. 39, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 361-383. Disponible en ScienceDirect.

⁷² KOH, Andrew. Solving transportation bi-level programs with Differential Evolution. *En: Congress on Evolutionary Computation (25-28, septiembre, 2007: Singapore)*. IEEE. 2007. p. 2243-2250. ISBN 978-1-4244-1340-9.

⁷³ XU, Tianze; WEI, Heng y HU, Guanghua. Study on continuous network design problem using simulated annealing and genetic algorithm. *Expert Systems with Applications* [en línea]. 2009, vol. 36, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 1322-1328. Disponible en ScienceDirect.

⁷⁴ BASKAN, O. y DELL'ORCO, M. Artificial bee colony algorithm for continuous network design problem with link capacity expansions. *En: International Congress on Advances in Civil Engineering (10: 17-19, octubre, 2012: Ankara, Turkey)*.

⁷⁵ BASKAN, Ozgur. Determining Optimal Link Capacity Expansions in Road Networks Using Cuckoo Search Algorithm with Lévy Flights. *Journal of Applied Mathematics* [en línea]. 2013 [citado en 2015-02-15], 11 p. Disponible en: <<http://www.hindawi.com/journals/jam/2013/718015/>>

⁷⁶ BASKAN, Ozgur. Harmony search algorithm for continuous network design problem with link capacity expansions. *KSCE Journal of Civil Engineering* [en línea]. 2014, vol. 18, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 273-283. Disponible en SpringerLink. ISSN 1976-3808.

⁷⁷ BASKAN, Ozgur y CEYLAN, Huseyin. Modified differential evolution algorithm for the continuous network design problem. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* [en línea]. 2014, vol. 111, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 48-57. Disponible en ScienceDirect.

⁷⁸ WANG, David Z.W. y LO, Hong K. Global optimum of the linearized network design problem with equilibrium flows. *Transportation Research Part B* [en línea]. 2010, vol. 44, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 482-492. Disponible en ScienceDirect.

Por otra parte, los estudios realizados por Suh y Kim (1992)⁷⁹, Gao, Sun y Zhang (2007)⁸⁰ y Mathew y Sharma (2009)⁸¹, consideraron los costos de inversión bajo una restricción presupuestaria (modelo 3), la cual establece que la inversión total debe ser menor o igual a un presupuesto disponible.

Los trabajos mencionados anteriormente, son modelos CNDP no lineales, además, debido a su naturaleza binivel son bastante difíciles de resolver⁸². Para ello, se han desarrollado diferentes heurísticas; sin embargo, recientemente y con el fin de obtener buenas soluciones de manera eficiente para aplicaciones de gran tamaño, algunas metaheurísticas tales como: evolución diferencial (DE, por su sigla en inglés)⁸³, algoritmo genético (GA, por su sigla en inglés)⁸⁴, recocido simulado (SA, por su sigla en inglés)⁸⁵, colonia artificial de abejas (ABC, por su sigla en inglés)⁸⁶, búsqueda armónica (HS, por su sigla en inglés)⁸⁷, búsqueda cuckoo con vuelos lévy⁸⁸ y evolución diferencial modificada (MODE, por su sigla en inglés)⁸⁹ han sido propuestas.

En cuanto a los modelos de DNDP encontrados la literatura, se clasificaron en tres tipos. Corresponden al tipo 1, aquellos en los cuales la red de transporte se modifica mediante la construcción o adición de nuevos enlaces (variable de decisión de tipo binario, donde 1 significa que el nuevo enlace debe ser construido

⁷⁹ SUH, Sunduck y KIM, Tschangho John. Solving nonlinear bilevel programming models of the equilibrium network design problem: A comparative review. *Annals of Operations Research* [en línea]. 1992, vol. 34, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 203-218. Disponible en SpringerLink. ISSN 1572-9338.

⁸⁰ GAO, Ziyu; SUN, Huijun y ZHANG, Haozhi. A globally convergent algorithm for transportation continuous network design problem. *Optimization and Engineering* [en línea]. 2007, vol. 8, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 241-257. Disponible en SpringerLink. ISSN 1573-2924.

⁸¹ MATHEW, Tom V. y SHARMA, Sushant. Capacity Expansion Problem for Large Urban Transportation Networks. *Journal of Transportation Engineering* [en línea]. 2009, vol. 135, no. 7 [citado en 2015-02-15], p. 406-415. ISSN 0733-947. Disponible en ASCE.

⁸² CHEN y XU. Op. cit., p. 4162.

⁸³ KOH. Op. cit., p. 2243.

⁸⁴ MATHEW y SHARMA. Op. cit., p. 406.

⁸⁵ XU, WEI y HU. Op. cit., p. 1322.

⁸⁶ BASKAN y DELL'ORCO. Op. cit., p. 1.

⁸⁷ BASKAN, Harmony search algorithm for continuous network design problem with link capacity expansions, Op. cit., p. 273.

⁸⁸ BASKAN, Determining Optimal Link Capacity Expansions in Road Networks Using Cuckoo Search Algorithm with Lévy Flights, Op. cit., p. 1.

⁸⁹ BASKAN y CEYLAN. Op. cit., p. 48.

y 0 de lo contrario). En este caso, se define un conjunto de enlaces candidatos o nuevos enlaces potenciales, y se determina cuáles deben ser añadidos a la red. Los estudios realizados por LeBlanc (1975)⁹⁰ y Gao, Wu y Sun (2005)⁹¹, que consideran los costos de inversión bajo una restricción presupuestaria exponen lo anterior.

En tipo 2 se encuentran los trabajos que consideran de manera simultánea la modificación de los enlaces existentes y la adición de nuevos enlaces. En este caso, se habla de “proyectos” candidatos (definidos previamente) a ser seleccionados. La variable de decisión también es de tipo binario y toma el valor de 0 o 1 dependiendo si se rechaza o acepta el proyecto. Los trabajos desarrollados por Poorzahedy y Abulghasemi (2005)⁹², Poorzahedy y Rouhani (2007)⁹³ y Babazadeh, Poorzahedy y Nikoosokhan (2011)⁹⁴ pertenecen a este tipo; y tienen en cuenta los costos de inversión bajo restricción presupuestaria.

Finalmente, corresponden al tipo 3, aquellos que a diferencia de los anteriores, determinan el nivel discreto de mejora de capacidad, es decir, el número de carriles a añadir a determinados enlaces. El estudio realizado por Wang, Meng y Yang (2013)⁹⁵, primero define los enlaces potenciales a ser expandidos, y posteriormente el número de carriles a añadir a estos enlaces mediante una

⁹⁰ LEBLANC, L.J. An algorithm for the discrete network design problem. *Transportation Science* [en línea]. 1975, vol. 9, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 183-199. Disponible en JSTOR Journals. ISSN 00411655.

⁹¹ GAO, WU y SUN, Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem, *Op. cit.*, p. 479.

⁹² POORZAHEDY, Hossain y ABULGHASEMI, Farhad. Application of Ant System to network design problem. *Transportation* [en línea]. 2005, vol. 32, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 251-273. Disponible en SpringerLink. ISSN 1572-9435.

⁹³ POORZAHEDY, Hossain y ROUHANI, Omid M. Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. *European Journal of Operational Research* [en línea]. 2007, vol. 182, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 578–596. Disponible en ScienceDirect.

⁹⁴ BABAZADEH, Abbas; POORZAHEDY, Hossain y NIKOOSOKHAN, Saeid. Application of particle swarm optimization to transportation network design problem. *Journal of King Saud University - Science* [en línea]. 2011, vol. 23, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 293-300. Disponible en ScienceDirect.

⁹⁵ WANG, Shuaian; MENG, Qiang y YANG, Hai. Global optimization methods for the discrete network design problem. *Transportation Research Part B* [en línea]. 2013, vol. 50, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 42-60. Disponible en ScienceDirect.

variable de decisión binaria. En tanto que, el efectuado por Chen y Chen (2013)⁹⁶, determina también las expansiones de capacidad de los enlaces existentes, medida por el número de carriles a añadir; pero la variable de decisión es una serie de enteros (0,1,2,3,...), en lugar de ser binaria.

En cuanto a metaheurísticas que han sido utilizadas para resolver problemas DNDP, se encuentra el sistema de hormigas⁹⁷, y la optimización de enjambre de partículas (PSO, por su sigla en inglés)⁹⁸.

3.2.1 Diseño de redes de transporte de carga. Ciertos problemas de diseño de redes se enfocan en el transporte de carga; sin embargo, son pocos los estudios que se encuentran en la literatura, debido a la multiplicidad de actores involucrados en el movimiento de carga (lo cual hace más complejo el modelo) y lo difícil que resulta la obtención de los datos de entrada necesarios.

En cuanto a estudios que utilizan el enfoque de programación binivel para formular modelos de diseño de redes de transporte de carga, se destacan los realizados por Russ *et al.* (2005)⁹⁹, Yamada *et al.* (2009)¹⁰⁰, y Apivatanagul y Regan (2010)¹⁰¹; una característica común de estos trabajos es que son DNDP, es decir, el modelo de nivel superior utiliza variables de decisión discretas para representar los proyectos o acciones de mejora de la red de transporte.

⁹⁶ CHEN, Qun y CHEN, Haibo. Solution algorithm for a new bi-level discrete network design problem. *Promet – Traffic&Transportation* [en línea]. 2013, vol. 25, no. 6 [citado en 2015-02-15], p. 513-p524. Disponible en: <<http://www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/view/1424/1135>>.

⁹⁷ POORZAHEDY y ABULGHASEMI. Op. cit., p. 251.

⁹⁸ BABAZADEH, POORZAHEDY y NIKOOSOKHAN. Op. cit., p. 293.

⁹⁹ RUSS, Bona Frazila, *et al.* Optimising the design of multimodal freight transport network in Indonesia. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* [en línea]. 2005, vol. 6 [citado en 2015-02-15], p. 2894-2907. Disponible en J-STAGE.

¹⁰⁰ YAMADA, Tadashi, *et al.* Designing Multimodal Freight Transport Networks: A Heuristic Approach and Applications. *Transportation Science* [en línea]. 2009, vol. 43, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 129-143. Disponible en INFORMS. ISSN 00411655.

¹⁰¹ APIVATANAGUL, Prutipong y REGAN, Amelia C. Long haul freight network design using shipper-carrier freight flow prediction: A California network improvement case study. *Transportation Research Part E* [en línea]. 2010, vol. 46, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 507-519. Disponible en ScienceDirect.

Russ *et al.* (2005)¹⁰² abordan el diseño de la red de transporte de carga utilizando una técnica de asignación multiusuario en el nivel inferior, esto es, consideran que los usuarios de la red están conformados por pasajeros y carga. El nivel superior determina la mejor combinación de proyectos de infraestructura (ampliación de los enlaces existentes o construcción de nuevos enlaces) para el diseño de la red de carga multimodal (carretera, ferrocarril y marítimo) y busca maximizar la relación beneficio/costo de la combinación de acciones. Por último, el modelo propuesto se aplica a una red de transporte real de Indonesia.

El trabajo desarrollado por Yamada *et al.* (2009)¹⁰³, es muy similar al de Russ *et al.* (2005)¹⁰⁴, con la diferencia que el modelo se prueba y aplica a una red de transporte real de Filipinas. Para esta aplicación, se consideraron 16 proyectos, y la mejor solución resultó ser una combinación de 4 acciones a implementar.

Apivatanagul y Regan (2010)¹⁰⁵, desarrollaron un modelo binivel de diseño de red de transporte multimodal (carretera, ferrocarril) para el movimiento de carga de larga distancia, en donde, el modelo de nivel superior determina el mejor conjunto de proyectos candidatos con el fin de minimizar los costos sociales totales. El modelo de nivel inferior es un modelo de predicción de flujo de mercancías que considera de forma explícita dos agentes: el *shipper* y el *carrier*. El *shipper* determina la cantidad de mercancía que se debe mover por cada modo; en tanto el *carrier* convierte la demanda de carga en unidades de carros de pasajeros (PCU) y enruta esto a las redes de transporte con el fin de minimizar el tiempo de viaje.

En lo que atañe a métodos de solución, la única metaheurística utilizada para resolver un modelo de diseño de red de transporte de carga es la búsqueda local

¹⁰² RUSS, *et al.* Op. cit., p. 2894.

¹⁰³ YAMADA, *et al.* Op. cit., p. 129.

¹⁰⁴ RUSS, *et al.* Op. cit., p. 2894.

¹⁰⁵ APIVATANAGUL y REGAN. Op. cit., p. 507.

genética (GLS, por su sigla en inglés)¹⁰⁶, la cual es un híbrido que combina algoritmos genéticos con búsqueda local.

3.2.2 Diseño de redes de transporte considerando aspectos ambientales.

Recientemente han surgido estudios que incluyen el aspecto ambiental en los modelos binivel, debido al impacto negativo sobre la salud humana y el medio ambiente generado por el sector transporte. De manera tal que por ejemplo, ya sea en el nivel superior o inferior, se involucra la contaminación atmosférica (emisiones) o la contaminación auditiva (ruido) generada.

El trabajo desarrollado por Mathew y Sharma (2006)¹⁰⁷, catalogado como CNDP, incorporó las emisiones en el nivel inferior, esto es, la función objetivo de nivel inferior resultó ser una función de costo generalizada al definirse como el costo de viaje total más el costo de emisión.

Por otra parte, existen estudios cuyo modelo de nivel inferior es el tradicional problema DUE; y en la función objetivo de nivel superior tienen en cuenta el aspecto ambiental. El trabajo realizado por Ferguson, Duthie y Waller (2010)¹⁰⁸ es un ejemplo de ello; este es un CNDP en el que el objetivo de nivel superior es minimizar las emisiones totales de la red de los contaminantes: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos también conocidos como compuestos orgánicos volátiles (VOC) y óxidos de nitrógeno (NO_x), elegidos por su impacto significativo sobre la salud humana y el hecho de que son gases de efecto invernadero (GEI).

¹⁰⁶ RUSS, *et al.* Op. cit., p. 2894.

¹⁰⁷ MATHEW, Tom V. y SHARMA, Sushant. Continuous network design with emission pricing as a bi-level optimization problem. *Applications of Advanced Technology in Transportation* [en línea]. 2006 [citado en 2015-02-15], p. 804-809. Disponible en Scopus. ISBN 0784407991.

¹⁰⁸ FERGUSON, Erin M.; DUTHIE, Jennifer y WALLER, S. Travis. *Network methods for project selection based on optimizing environmental impact*. Proyecto. Austin, Texas: University of Texas. 2010. 149 p.

A diferencia del anterior, los trabajos de Kim y Kim (2006)¹⁰⁹, Qiu y Chen (2007)¹¹⁰, Jia, Kato y Hayashi (2009)¹¹¹, y Szeto, Wang y Wong (2014)¹¹², combinan diferentes objetivos mediante una función de suma ponderada en sus modelos. Los tres últimos tienen en común el problema DUE en el nivel inferior; mientras que el de Kim y Kim (2006)¹¹³ es un modelo de asignación multimodal que incluye carretera y ferrocarril.

El modelo DNDP desarrollado por Kim y Kim (2006)¹¹⁴ establece minimizar una función de costo social total que involucra entre otros, los costos medioambientales y los costos de tiempo de viaje. Qiu y Chen (2007)¹¹⁵ en el CNDP propuesto, minimizan: costos de tiempo total, costos de inversión y costos externos de contaminación ambiental, consumo de energía y uso de la tierra. Jia, Kato y Hayashi (2009)¹¹⁶ proponen en su modelo DNDP minimizar una función de costo acumulada, que incluye entre otros, el costo de tiempo de viaje total, el costo de emisión de los contaminantes HC, CO y NO_x y el costo de emisión de los gases de efecto invernadero CO₂, N₂O y CH₄. Por otra parte, el modelo DNDP de Szeto, Wang y Wong (2014)¹¹⁷, minimiza el costo total de las emisiones de CO, VOC y NO_x, el costo total del ruido y el costo de tiempo de viaje.

¹⁰⁹ KIM, Byung Jong y KIM, Wonkyu. An equilibrium network design model with a social cost function for multimodal networks. *The Annals of Regional Science* [en línea]. 2006, vol. 40, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 473-491. Disponible en SpringerLink. ISSN 1432-0592.

¹¹⁰ QIU, Yuzhuo y CHEN, Senfa. Bi-level Programming for Continuous Network Design of Comprehensive Transportation System Based on External Optimization. *En: International Conference on Grey Systems and Intelligent Services* (18-20, noviembre, 2007: Nanjing, China). IEEE. 2007. p. 1186-1190. ISBN 978-1-4244-1294-5.

¹¹¹ JIA, Peng; KATO, Hirokazu y HAYASHI, Yoshitsugu. Road network optimization model with consideration of dynamic changes in long term evaluation for developing cities. *En: Annual Meeting of the Transportation Research Board* (88: 15, enero, 2009: Washington).

¹¹² SZETO, W. Y.; WANG, Yi y WONG. Op. cit., p. 140.

¹¹³ KIM y KIM. Op. cit., p. 473.

¹¹⁴ KIM y KIM. Op. cit., p. 473.

¹¹⁵ QIU, Yuzhuo y CHEN. Op. cit., p. 1186.

¹¹⁶ JIA, KATO y HAYASHI. Op. cit., p. 1.

¹¹⁷ SZETO, W. Y.; WANG, Yi y WONG. Op. cit., p. 140.

Por último, se halla el trabajo de Sharma y Mathew (2011)¹¹⁸, donde el nivel inferior también corresponde al problema DUE; y utiliza enfoque multiobjetivo en el nivel superior. Este modelo CNDP tiene en cuenta dos objetivos: el costo de viaje total y el costo total de las emisiones de NO_x, CO y HC.

Las metaheurísticas utilizadas para resolver algunos de los problemas anteriores son: GA, SA, ABC, optimización extrema (EO, por su sigla en inglés)¹¹⁹ y optimización de reacción química (CRO, por su sigla en inglés)¹²⁰.

3.3 EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

La evolución diferencial (ED) es una metaheurística desarrollada por Storn y Price (1995)¹²¹, para optimizar problemas no lineales y no diferenciables en espacios continuos. ED es considerada un método de optimización estocástico basado en población¹²²; perteneciente al área de la computación evolutiva, que relaciona conceptos de la teoría de evolución biológica con técnicas computacionales para la solución de problemas.

Algunas de las características del algoritmo ED son su robustez, la facilidad de implementación, y los pocos parámetros de control requeridos¹²³, que son: el número total de individuos en la población (NP), el factor de mutación (F), la tasa de cruce (CR), y el número máximo de generaciones (G_{max}) —si este es

¹¹⁸ SHARMA y MATHEW. Op. cit., p. 520.

¹¹⁹ QIU y CHÉN. Op. cit., p. --.

¹²⁰ SZETO, WANG y WONG. Op. cit., p. --.

¹²¹ STORN, Rainer y PRICE, Kenneth. Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. International Computer Science Institute [en línea]. 1995. 12 p. [citado en 2015-02-15]. Disponible en: <<http://www.icsi.berkeley.edu/ftp/pub/techreports/1995/tr-95-012.pdf>>

¹²² CHAKRABORTY, Uday K. Advances in Differential Evolution. [s.l.]: Springer, 2008. 339 p. (Serie Studies in Computational Intelligence; no. 143). ISBN 978-3-540-68827-3.

¹²³ STORN y PRICE, Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, Op. cit., p. 1.

establecido como criterio de parada—. Según lo recomendado por Price, Storn y Lampinen (2005)¹²⁴, $F \in [0,1; 1]$ y $CR \in [0; 1]$.

3.3.1 Introducción al algoritmo ED. El algoritmo funciona con una población P en cada generación g , denotada por P_g y conformada por $y_{i,g}$ vectores objetivo (padres), donde $i = 1, \dots, NP$, siendo NP el número total de individuos en la población, que no cambia durante el proceso de optimización; lo anterior se puede representar así:

$$P_g = \begin{bmatrix} y_{1,g} \\ \vdots \\ y_{NP,g} \end{bmatrix} \quad \forall g = 1, \dots, G_{max}$$

Cada vector $y_{i,g}$ contiene D -dimensiones que corresponden a las variables de decisión del problema; estas dimensiones se denotan por j , donde $j = 1, \dots, D$. Finalmente, P_g puede ser expresada como:

$$P_g = \begin{bmatrix} y_{1,g}^1 & \cdots & y_{1,g}^D \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{NP,g}^1 & \cdots & y_{NP,g}^D \end{bmatrix} \quad \forall g = 1, \dots, G_{max}$$

El algoritmo ED se resume como sigue: la primera etapa consiste en generar de manera aleatoria la población inicial (normalmente se asume una distribución de probabilidad uniforme para todas las decisiones aleatorias¹²⁵). Después de inicializar la población, se llevan a cabo las operaciones de mutación, cruce y

¹²⁴ PRICE, Kenneth; STORN, Rainer M. y LAMPINEN, Jouni A. Differential Evolution. A Practical Approach to Global Optimization. [s.l.]: Springer, 2005. 539 p. (Serie Natural Computing Series). ISBN 978-3-540-31306-9.

¹²⁵ STORN, Rainer y PRICE, Kenneth. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. Journal of Global Optimization [en línea]. 1997, vol. 11, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 341-359. Disponible en SpringerLink. ISSN 1573-2916.

selección en cada generación g , hasta cumplirse el criterio de parada y encontrar la solución del problema, así como el correspondiente valor $fitness^{(*)}$.

3.3.2 Etapas del algoritmo ED. A continuación se describe en detalle cada una de las etapas del algoritmo en su forma o variante clásica; teniendo en cuenta que existen algunas variantes, las cuales serán presentadas en 3.4.3, y se diferencian por la manera cómo se llevan a cabo las operaciones de mutación y cruce.

3.3.2.1 Inicialización. En primer lugar, se deben especificar los límites superior e inferior para cada variable de decisión, upp^j y low^j , respectivamente. Una vez se hayan definido los límites, se asigna mediante un generador de números pseudoaleatorios distribuidos uniformemente entre (0,1), un valor entre upp^j y low^j , a cada variable o dimensión de cada vector. Por ejemplo, para la j -ésima variable del i -ésimo vector, el valor inicial es:

$$y_{i,0}^j = rand_j(0,1) \cdot (upp^j - low^j) + low^j$$

3.3.2.2 Mutación. Esta etapa consiste en crear un vector mutante $m_{i,g}$ para cada vector objetivo $y_{i,g}$, al combinar diferentes individuos de la población. Cuando la variante es la clásica, el vector $m_{i,g}$ se crea de la siguiente forma:

$$m_{i,g} = y_{v1,g} + F \cdot (y_{v2,g} - y_{v3,g}) \quad ; \quad v1 \neq v2 \neq v3 \in i = 1, \dots, NP$$

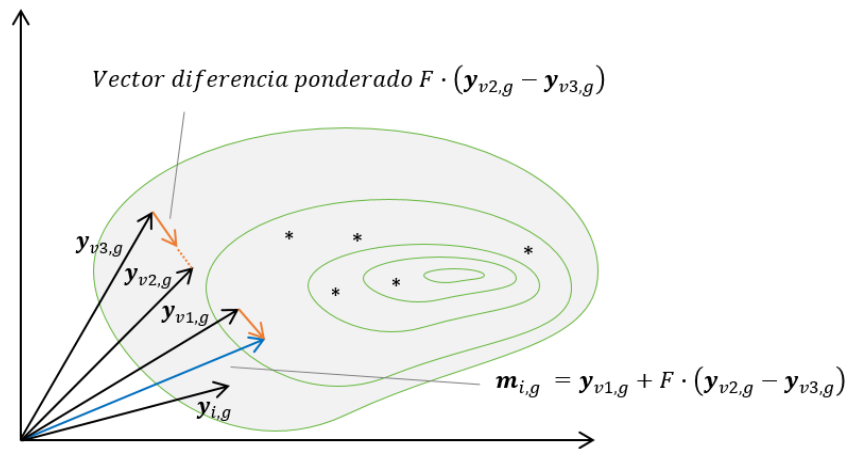
Siendo, $y_{v1,g}$ un vector llamado base, el cual es seleccionado de "P" aleatoriamente. Así mismo, los vectores $y_{v2,g}$ y $y_{v3,g}$, llamados vectores diferencia, también son seleccionados de manera aleatoria de la población; y su resta, define

(*) El valor $fitness$ es aquel que toma la función objetivo del problema de optimización, producto de ser evaluada con los valores asignados a las variables. Se denomina $fitness$, ya que indica la aptitud de los individuos.

una dirección de búsqueda en el espacio de solución. Por último, el factor de mutación $F \in [0,1; 1]$, escala la diferencia de vectores para controlar la evolución de la población. Es importante aclarar que, $v1$, $v2$ y $v3$ son diferentes entre sí, y distintos del índice del vector objetivo actual i ; por lo tanto, NP debe ser mayor o igual a 4.

En la figura 2 se muestra un ejemplo que ilustra la manera cómo se genera el vector mutante $\mathbf{m}_{i,g}$.

Figura 2. Ejemplo de la operación mutación



Fuente. STORN, Rainer y PRICE, Kenneth.

3.3.2.3 Cruce. Con el fin de incrementar la diversidad de la población, se lleva a cabo la operación de cruce para crear un vector de prueba $\mathbf{w}_{i,g}$. El cruce consiste en combinar el vector objetivo $\mathbf{y}_{i,g}$ con el vector mutante $\mathbf{m}_{i,g}$, copiando directamente las dimensiones o componentes del uno o del otro según corresponda. En el caso de la variante clásica, la creación de $\mathbf{w}_{i,g}$ se da así:

$$\mathbf{w}_{i,g} = w_{i,g}^j = \begin{cases} m_{i,g}^j & \text{si } (rand_j(0,1) \leq CR \text{ o } j = j_{rand}) \\ y_{i,g}^j & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La tasa de cruce $CR \in [0; 1]$, controla la cantidad de componentes j que son copiados del vector mutante o del vector objetivo al vector de prueba. Como se puede ver en la expresión anterior, la salida de un generador de números pseudoleatorios uniformemente distribuidos entre 0 y 1, se compara con CR , para determinar si cada componente del vector de prueba proviene del vector mutante o del vector objetivo. Si el número generado al azar es menor o igual a CR , el componente del vector de prueba es heredado del vector mutante, de lo contrario, se toma del vector objetivo. La comparación de j con j_{rand} —número entero pseudoaleatorio distribuido uniformemente entre $[1; D]$ —, asegura que al menos un componente del vector de prueba es heredado del vector mutante, o lo que es lo mismo, evita que el vector de prueba sea idéntico al vector objetivo.

Control de límites de variables

El cruce podría generar vectores de prueba cuyas dimensiones o variables de decisión se encuentran fuera de los límites establecidos previamente (upp^j y low^j). Para ello, es necesario verificar que $low^j < w_{i,g}^j < upp^j$; de no cumplirse, la variable analizada toma el valor del límite excedido, así¹²⁶:

$$\text{Si } w_{i,g}^j > upp^j \text{ entonces } w_{i,g}^j = upp^j \text{ o si } w_{i,g}^j < low^j \text{ entonces } w_{i,g}^j = low^j$$

3.3.2.4 Selección. A fin de decidir qué vector es más apto para pasar a la siguiente generación, se realiza la selección, que consiste en comparar el vector objetivo $y_{i,g}$ con el vector de prueba $w_{i,g}$, en términos del valor *fitness*. Si el vector de prueba $w_{i,g}$ presenta un mejor valor *fitness* que el vector objetivo $y_{i,g}$, el vector de prueba reemplaza al vector objetivo en la siguiente generación ($g + 1$), de lo contrario, el vector objetivo conserva su lugar en la población, durante al menos una generación más. Lo anterior, es descrito de la siguiente manera:

¹²⁶ ANGELO, Jaqueline S.; KREMPSE, Eduardo; y BARBOSA, Helio. Differential evolution for bilevel programming. En: Congress on Evolutionary Computation (20-23, junio, 2013: Cancún, México). Evolutionary Computation, IEEE. 2013. p. 470-477. ISBN 978-1-4799-0452-5.

$$y_{i,g+1} = \begin{cases} w_{i,g} & \text{si } f(w_{i,g}) \text{ es mejor que } f(y_{i,g}) \\ y_{i,g} & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

3.3.2.5 Terminación. Las operaciones de mutación, cruce y selección son repetidas de generación en generación, hasta que se cumpla con un criterio de parada específico, por ejemplo, cuando se alcanza un número máximo de generaciones (G_{max}). Algunos criterios de terminación son los siguientes¹²⁷:

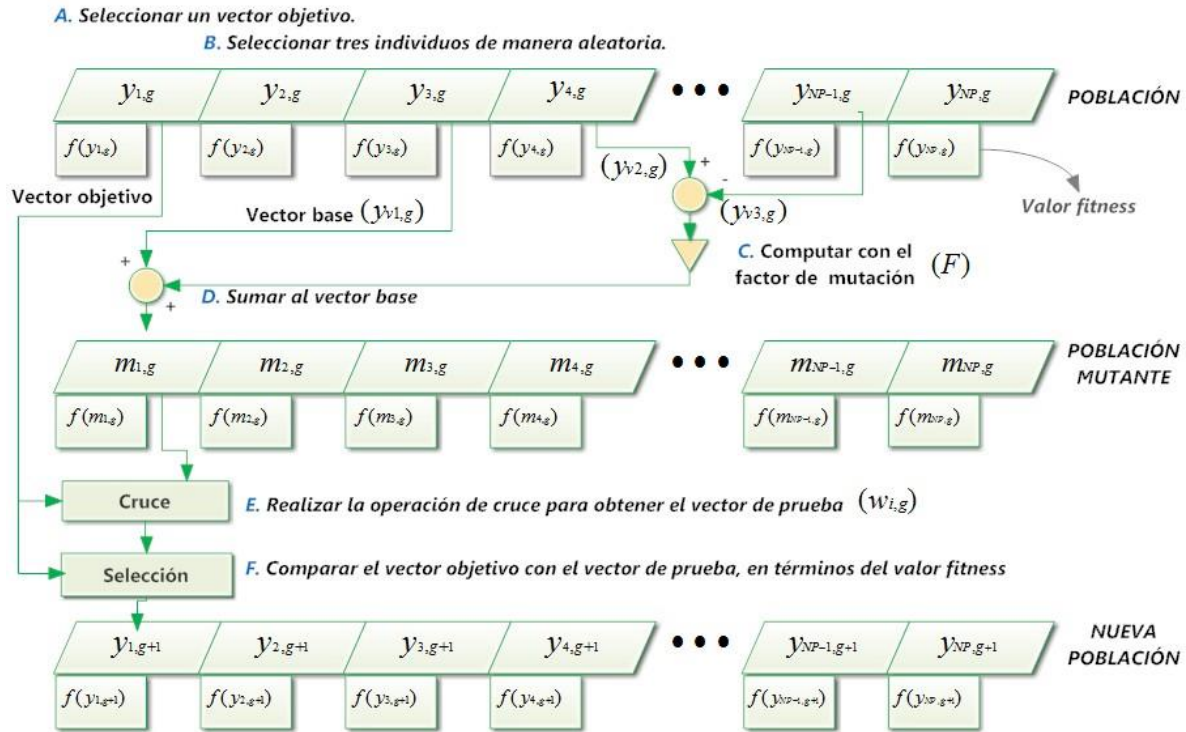
- Número límite de generaciones: Se refiere a que la optimización termina después de un número dado de generaciones G_{max} .
- Tiempo limitado: Se dispone de un determinado tiempo para realizar la optimización. Por ejemplo, en el caso de que solo se tenga una cantidad de tiempo disponible de una computadora, o deba cumplirse una fecha límite.
- Monitoreo humano: Mediante observación y análisis del proceso, las personas son quienes establecen cuándo se detiene la optimización. Por ejemplo, al notar que no existen mejoras en el valor de la función objetivo.

El funcionamiento del algoritmo ED para la variante clásica se resume en la figura 3. Es importante tener en cuenta que, en cada generación, todos los individuos de la población serán seleccionados sólo una vez como vector objetivo (padre), sin depender del valor *fitness* que exhiban¹²⁸.

¹²⁷ PRICE, STORN y LAMPINEN. Op. cit., p. 128.

¹²⁸ STORN y PRICE, Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, Op. cit., p. 4.

Figura 3. Esquema del algoritmo ED (variante clásica)



Fuente. PRICE, Kenneth; STORN, Rainer M. y LAMPINEN, Jouni A.

3.3.3 Variantes de la ED. En las etapas presentadas anteriormente, el vector $m_{i,g}$ es obtenido de combinar tres vectores ($y_{v1,g}$, $y_{v2,g}$ y $y_{v3,g}$), en donde el vector base “ $y_{v1,g}$ ” es elegido aleatoriamente; sin embargo, existen algunas variantes del algoritmo ED, diferenciadas por la manera en que se llevan a cabo las operaciones de mutación y cruce. Por ejemplo, es posible variar el criterio para seleccionar el vector base, o emplear más de una diferencia de vectores en la creación del vector mutante. Con el fin de identificar las variantes, la notación “ED/ $\alpha/\beta/\gamma$ ” es utilizada¹²⁹; donde:

- /ED/: Hace referencia al nombre del algoritmo.

¹²⁹ CHAKRABORTY. Op. cit., p. 181.

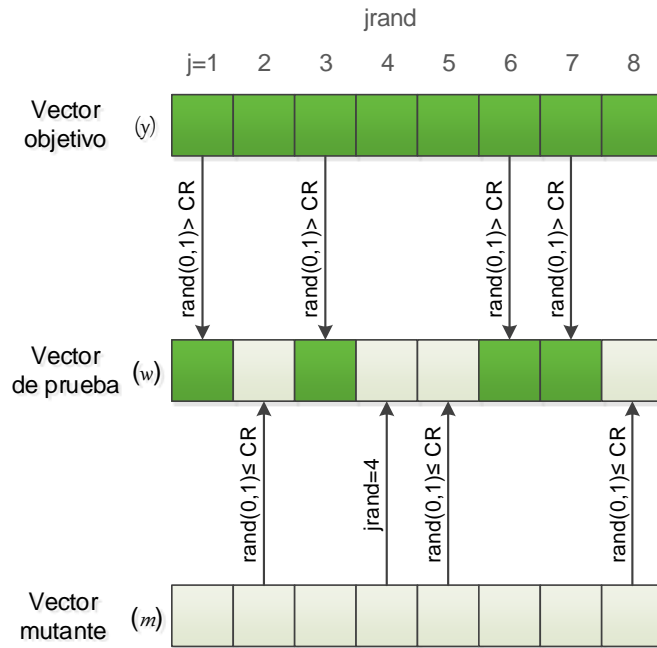
- α : Indica el criterio utilizado para elegir el vector base; que puede ser: seleccionar de manera aleatoria de la población (rand) o elegir el vector con el mejor valor fitness de la población (best).
- β : Se refiere al número de diferencias entre vectores, utilizadas para perturbar el vector base en la operación de mutación; generalmente 1 o 2. Por ejemplo, en la creación del vector mutante $\mathbf{m}_{i,g} = \mathbf{y}_{v1,g} + F \cdot (\mathbf{y}_{v2,g} - \mathbf{y}_{v3,g})$, se utiliza una sola diferencia de vectores $(\mathbf{y}_{v2,g} - \mathbf{y}_{v3,g})$. En caso de ser dos, $\mathbf{m}_{i,g} = \mathbf{y}_{v1,g} + F \cdot [(\mathbf{y}_{v2,g} - \mathbf{y}_{v3,g}) + (\mathbf{y}_{v4,g} - \mathbf{y}_{v5,g})]$. Los vectores que participan en las diferencias son elegidos aleatoriamente, distintos entre sí, y distintos al vector objetivo actual.
- γ : Denota el tipo de cruce adoptado para crear el vector de prueba.

El cruce puede ser de dos tipos: binomial “bin” o exponencial “exp”¹³⁰. La figura 4 muestra un ejemplo de la operación de cruce binomial para vectores 8-dimensionales con $j_{rand} = 4$, es decir, ilustra la manera cómo se genera un vector de prueba, producto de cruzar uniformemente un vector objetivo con un vector mutante.

A diferencia del cruce binomial, el cruce exponencial inicia con el componente elegido al azar (por ejemplo, $j_{rand} = 4$) y mientras se cumpla la condición $rand_j(0,1) \leq CR$, los componentes del vector de prueba son copiados del vector mutante. En la primera ocasión que $rand_j(0,1) > CR$, los componentes restantes del vector de prueba, son copiados del vector objetivo; como se ilustra en la figura 5.

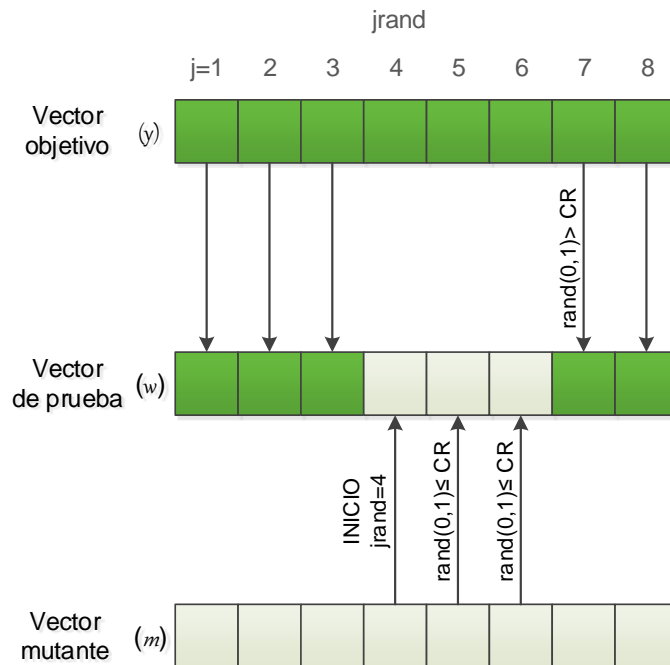
¹³⁰ PRICE, STORN y LAMPINEN. Op. cit., p. 94.

Figura 4. Esquema de una operación de cruce binomial



Fuente. PRICE, Kenneth; STORN, Rainer M. y LAMPINEN, Jouni A.

Figura 5. Esquema de una operación de cruce exponencial



Fuente. PRICE, Kenneth; STORN, Rainer M. y LAMPINEN, Jouni A.

La descripción de las etapas del algoritmo en 3.4.2 se realizó con la variante clásica y más popular de ED, cuya notación es “*ED/rand/1/bin*”, es decir, se selecciona de manera aleatoria el vector base para crear el vector mutante, se utiliza una sola diferencia de vectores, y se emplea cruce binomial.

Las principales variantes de ED son:

- *ED/rand/ β /bin*
- *ED/rand/ β /exp*
- *ED/best/ β /bin*
- *ED/best/ β /exp*
- *ED/target-to-rand/ β /bin*
- *ED/target-to-rand/ β /exp*
- *ED/target-to-best/ β /bin*
- *ED/target-to-best/ β /exp*

Cabe mencionar que las últimas cuatro variantes, a diferencia de las primeras, utilizan el vector objetivo actual y el factor de mutación F en dos ocasiones para crear el vector mutante. En la tabla 6 se presentan cada una de las variantes mencionadas anteriormente.

Tabla 6. Variantes de la ED

<p>• ED/rand/β/bin:</p> $w_{i,g}^j = \begin{cases} m_{i,g}^j = y_{v1,g}^j + F \cdot \sum_{b=1}^{\beta} (y_{v2,g}^{j,b} - y_{v3,g}^{j,b}) & \text{si } \text{rand}_j(0,1) \leq CR \text{ o } j = j_{rand} \\ y_{i,g}^j & \text{en caso contrario} \end{cases}$
<p>• ED/rand/β/exp:</p> $w_{i,g}^j = \begin{cases} m_{i,g}^j = y_{v1,g}^j + F \cdot \sum_{b=1}^{\beta} (y_{v2,g}^{j,b} - y_{v3,g}^{j,b}) & \text{iniciando en } j = j_{rand} \text{ y mientras } \text{rand}_j(0,1) \leq CR \\ y_{i,g}^j & \text{componentes restantes} \end{cases}$
<p>• ED/best/β/bin:</p> $w_{i,g}^j = \begin{cases} m_{i,g}^j = y_{Best,g}^j + F \cdot \sum_{b=1}^{\beta} (y_{v2,g}^{j,b} - y_{v3,g}^{j,b}) & \text{si } \text{rand}_j(0,1) \leq CR \text{ o } j = j_{rand} \\ y_{i,g}^j & \text{en caso contrario} \end{cases}$
<p>• ED/best/β/exp:</p> $w_{i,g}^j = \begin{cases} m_{i,g}^j = y_{Best,g}^j + F \cdot \sum_{b=1}^{\beta} (y_{v2,g}^{j,b} - y_{v3,g}^{j,b}) & \text{iniciando en } j = j_{rand} \text{ y mientras } \text{rand}_j(0,1) \leq CR \\ y_{i,g}^j & \text{componentes restantes} \end{cases}$
<p>• ED/target-to-rand/β/bin:</p> $w_{i,g}^j = \begin{cases} y_{i,g}^j + F \cdot (y_{v1,g}^j - y_{vi,g}^j) + F \cdot \sum_{b=1}^{\beta} (y_{v2,g}^{j,b} - y_{v3,g}^{j,b}) & \text{si } \text{rand}_j(0,1) \leq CR \text{ o } j = j_{rand} \\ y_{i,g}^j & \text{en caso contrario} \end{cases}$
<p>• ED/target-to-rand/β/exp:</p> $w_{i,g}^j = \begin{cases} y_{i,g}^j + F \cdot (y_{v1,g}^j - y_{i,g}^j) + F \cdot \sum_{b=1}^{\beta} (y_{v2,g}^{j,b} - y_{v3,g}^{j,b}) & \text{iniciando en } j = j_{rand} \text{ y mientras } \text{rand}_j(0,1) \leq CR \\ y_{i,g}^j & \text{componentes restantes} \end{cases}$
<p>• ED/target-to-best/β/bin:</p> $w_{i,g}^j = \begin{cases} y_{i,g}^j + F \cdot (y_{Best,g}^j - y_{vi,g}^j) + F \cdot \sum_{b=1}^{\beta} (y_{v2,g}^{j,b} - y_{v3,g}^{j,b}) & \text{si } \text{rand}_j(0,1) \leq CR \text{ o } j = j_{rand} \\ y_{i,g}^j & \text{en caso contrario} \end{cases}$
<p>• ED/target-to-best/β/exp:</p> $w_{i,g}^j = \begin{cases} y_{i,g}^j + F \cdot (y_{Best,g}^j - y_{i,g}^j) + F \cdot \sum_{b=1}^{\beta} (y_{v2,g}^{j,b} - y_{v3,g}^{j,b}) & \text{iniciando en } j = j_{rand} \text{ y mientras } \text{rand}_j(0,1) \leq CR \\ y_{i,g}^j & \text{componentes restantes} \end{cases}$

3.4 MANEJO DE RESTRICCIONES

La solución de problemas de optimización matemática con restricciones, utilizando ED o metaheurísticas como GA, SA, entre otras, requiere el uso de algún método de manejo de restricciones. Los métodos de función de penalización han sido el enfoque más popular; existiendo en la literatura diferentes propuestas que pueden ser aplicadas; la planteada por Deb (2000)¹³¹ es una de ellas.

El método de función de penalización de Deb para el manejo de restricciones de desigualdad, establece que el valor *fitness* de un individuo está dado por:

$$fitness(\mathbf{y}) = \begin{cases} f(\mathbf{y}) & \text{si } g_j(\mathbf{y}) \geq 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots, m \\ f_{max} + \sum_{j=1}^m \langle g_j(\mathbf{y}) \rangle & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Donde $f(\mathbf{y})$ es el valor que toma la función objetivo para determinada solución, f_{max} es el peor valor f de las soluciones factibles en la población (entiéndase por solución factible, aquella que satisface todas las restricciones, esto es, ninguna es violada), y $g_j(\mathbf{y})$ hace referencia a la evaluación de la solución en las restricciones de desigualdad involucradas en el problema. Luego, el valor *fitness* para las soluciones factibles es igual al valor de su función objetivo, y para las soluciones infactibles (al menos una restricción violada) es igual a f_{max} más la suma de los valores absolutos de la evaluación de las restricciones (violación de restricción). Si no existen soluciones factibles en la población, f_{max} es igual a cero.

Para manejar las restricciones de igualdad, Deb propone transformarlas en restricciones de desigualdad, utilizando la siguiente ecuación:

$$g_j(\mathbf{y})' = \varepsilon - |h_k(\mathbf{y})| \geq 0$$

¹³¹ DEB, An efficient constraint handling method for genetic algorithms, Op. cit., p. 311.

Siendo ε la tolerancia permitida (un valor muy pequeño), por ejemplo, $\varepsilon = 0.0001$.

Por otra parte, el método incluye un operador de selección o torneo, en el que dos soluciones son comparadas con el fin de elegir la mejor, cumpliéndose lo siguiente:

- Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución infactible (INF).
- Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor valor fitness.
- Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor violación de restricción.

4. MODELO BINIVEL DE CORREDOR LOGÍSTICO TIPO “GREEN”

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En este trabajo se propone un modelo binivel, por medio del cual se simula el funcionamiento de una red de transporte unimodal para evaluar la expansión de capacidad de enlaces en un corredor logístico; incluyendo la principal externalidad ambiental “green” generada por el sector transporte, esto es, las emisiones atmosféricas contaminantes. El término unimodal hace referencia a la consideración de un solo modo de transporte (carretero), ya que, en el contexto colombiano, la mayor parte de la carga se moviliza por este modo.

El propósito del modelo es aliviar la congestión de la red de transporte unimodal, y con ello mejorar el rendimiento de la misma en cuanto a tiempo de viaje total; a la vez que se disminuyen las emisiones contaminantes producidas por los vehículos que circulan a través de ella.

El modelo es binivel a razón de los dos niveles presentes en su formulación; el nivel superior que representa los intereses del gobierno, y el nivel inferior que describe el comportamiento de los usuarios, en este caso, derivados del transporte de carga y pasajeros.

El problema de nivel superior (ULP, por su sigla en inglés) tiene como objetivo minimizar una función de tiempo total generalizado de la red de transporte por carretera, que incluye el tiempo de viaje total y los tiempos logísticos de cargue-descargue. Adicionalmente se involucra una restricción para considerar las emisiones atmosféricas contaminantes generadas en la red. El problema de nivel inferior (LLP, por su sigla en inglés) es un problema de equilibrio de usuario multiclase determinista, en el que existen varias clases de vehículos catalogadas de acuerdo a su configuración (camiones, buses, busetas) y movilización (carga o

pasajeros). El LLP determina el flujo de equilibrio de tráfico en el enlace para cada clase de usuario.

4.1.1 Funciones utilizadas en el modelo. La función de tiempo de viaje y la función de emisiones contaminantes involucradas en el modelo se describen a continuación.

Tiempo de viaje en el enlace. Diversas formulaciones han sido propuestas para estimar el tiempo de viaje sobre un enlace de una red de transporte¹³²; sin embargo, la forma funcional más utilizada es la sugerida en 1964 por la Oficina de Vías Públicas de Estados Unidos (BPR, por su sigla en inglés), la cual describe que el tiempo de viaje en un enlace de la red depende del tiempo de viaje a flujo libre (sin congestión) para atravesarlo, el flujo y la capacidad del enlace. La función BPR es expresada así¹³³:

$$t_a = t_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{CA_a + z_a} \right)^\beta \right]$$

Donde:

t_a^0 *Tiempo a flujo libre para atravesar el enlace a*

x_a *Flujo vehicular total en el enlace a*

CA_a *Capacidad existente del enlace a*

z_a *Expansión de capacidad del enlace a*

α, β *Parámetros de la función de tiempo de viaje en el enlace a*

¹³² MÁRQUEZ DÍAZ, Luis Gabriel y CANTILLO MAZA, Víctor Manuel. Evaluación de los parámetros de las funciones de costo en la red estratégica de transporte de carga para Colombia. Revista Científica Ingeniería y Desarrollo [en línea]. 2011, vol. 29, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 286-307. Disponible en: <<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/3624/2336>>. ISSN 0122-3461

¹³³ ESTADOS UNIDOS. DEPARTMENT OF COMMERCE. BUREAU OF PUBLIC ROADS. Traffic assignment manual for application with a large, high speed computer [en línea]. Washington, U.S. Junio de 1964. Disponible en: <<http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015006424512;view=1up;seq=16>>

Los parámetros α y β se asumen normalmente como 0,15 y 4, respectivamente.

Emisiones contaminantes. La combustión interna de vehículos automotores emite una amplia gama de contaminantes atmosféricos¹³⁴. Si bien las emisiones contaminantes producidas por el transporte dependen de características del vehículo como el tipo de combustible utilizado (gasolina, diesel, etc.), la edad del automotor, también influyen características de operación como el comportamiento de conducción, entre otros¹³⁵; sin embargo, existen formas simplificadas para realizar la estimación de emisiones vehiculares en un enlace, como por ejemplo, aquella función que utiliza información de los flujos de vehículos y factores de emisión (cantidad de contaminante en gramos que emite cada clase de vehículo al recorrer un kilómetro), así¹³⁶:

$$E_{bam} = F_{bm}x_aP_{ma}L_a$$

Donde:

E_{bam} Emisión total del contaminante b , en el enlace a , para el vehículo clase m

F_{bm} Factor de emisión del contaminante b para el vehículo clase m

x_a Flujo vehicular total en el enlace a

P_{ma} Fracción del flujo total del vehículo clase m en el enlace a

L_a Longitud del enlace a

¹³⁴ COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. CONPES 3759. LINEAMIENTOS DE POLÍTICA PARA LA MODERNIZACIÓN DEL TRANSPORTE AUTOMOTOR DE CARGA Y DECLARATORIA DE IMPORTANCIA ESTRATÉGICA DEL PROGRAMA DE REPOSICIÓN Y RENOVACIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR DE CARGA [en línea]. 2013. [citado en en 2015-05-07]. Disponible en: <http://www4.unfccc.int/sites/nama/_layouts/UN/FCCC/NAMA/Download.aspx?ListName=NAMA&Id=82&FileName=CONPES%203759%20Modernizaci%C3%B3n%20Transporte%20Automotor%20de%20Carga.pdf>

¹³⁵ UNIVERSITY COLLEGE LONDON – UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Marco Teórico de contaminación atmosférica en Colombia [en línea]. 2013. [citado en 2015-02-15]. Disponible en: <<https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Caracterizaci%C3%B3n-de-la-contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9rica-en-Colombia1.pdf>>

¹³⁶ CHILE. MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN. ACTUALIZACIÓN METODOLÓGICA MODEM – MODEC PARA EL GRAN SANTIAGO. Santiago: SECTRA, 2010. 331 p.

4.2 FORMULACIÓN DEL MODELO

La notación utilizada para la formulación del modelo es:

f_1 *Función objetivo de nivel superior*

f_2 *Función objetivo de nivel inferior*

t_a *Tiempo de viaje en el enlace a*

Subíndices

a *Enlaces en la red, $a \in A$*

k *Rutas en la red, $k \in K$*

w *Pares origen O – destino D , $w \in W$*

m *Clases de vehículos, $m \in M$*

b *Contaminantes, $b \in B$*

Conjuntos

K_w *Rutas que conectan el par w , $\forall w \in W$*

N_m *Vehículos de transporte de carga, $\forall m \in G$*

A_1 *Posibles enlaces a expandir en la red*

Variables de decisión

z_a *Expansión de capacidad del enlace a*

f_{mk}^w *Flujo del vehículo clase m en la ruta k del par w*

x_{ma} *Flujo del vehículo clase m en el enlace a*

x_a *Flujo vehicular total en el enlace a*

Parámetros

t_a^0 *Tiempo a flujo libre para atravesar el enlace a*

CA_a *Capacidad existente del enlace a*

α, β *Parámetros de la función de tiempo de viaje en el enlace a*

φ	Tiempo promedio de la operación de carga – descarga
q_m^w	Número de vehículos clase m que circulan entre el origen O y el destino D (par w)
L_a	Longitud del enlace a
F_{bm}	Factor de emisión del contaminante b para el vehículo clase m
LE_b	Valor límite de emisiones del contaminante b
$lowS_a$	Mínima expansión de capacidad del enlace a
$uppS_a$	Máxima expansión de capacidad del enlace a
δ_{ak}^w	$\begin{cases} 1 & \text{si el enlace } a \text{ forma parte de la ruta } k \text{ que conecta el par } w \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$
PCE_m	Vehículos de pasajeros equivalente para el vehículo clase m

4.2.1 Problema de nivel superior. El objetivo de nivel superior (4) consiste en minimizar el tiempo total generalizado de la red de transporte, expresado como:

[ULP]

$$\mathbf{Min}_z \quad f_1 = \sum_{a \in A} x_a t_a(z_a, x_a) + \varphi \sum_{w \in W} \sum_{m \in N_m} q_m^w \quad (4)$$

s.a

$$\sum_{m \in M} \sum_{a \in A} L_a F_{bm} x_{ma} \leq LE_b \quad ; \quad \forall b \in B \quad (5)$$

$$lowS_a \leq z_a \leq uppS_a \quad ; \quad \forall a \in A_1 \quad (6)$$

La expresión (5) establece que la emisión generada por todos los vehículos que emiten cierto contaminante en todos los enlaces de la red debe ser menor o igual a un límite de emisiones del contaminante, previamente establecido. Por último, la restricción (6) señala que la expansión de capacidad de cada enlace debe estar entre un mínimo ($lowS_a$) y un máximo ($uppS_a$).

4.2.2 Problema de nivel inferior. El problema de nivel inferior es el problema de equilibrio de usuario multiclase determinista:

[LLP]

$$\mathbf{Min}_x \quad f_2 = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw \quad (7)$$

s.a

$$\sum_{k \in K_w} f_{mk}^w = q_m^w \quad ; \quad \forall m \in M, w \in W \quad (8)$$

$$x_{ma} = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} f_{mk}^w \delta_{ak}^w \quad ; \quad \forall m \in M, a \in A \quad (9)$$

$$x_a = \sum_{m \in M} PCE_m x_{ma} \quad ; \quad \forall a \in A \quad (10)$$

$$f_{mk}^w \geq 0 \quad ; \quad \forall m \in M, k \in K_w, w \in W \quad (11)$$

La ecuación (7) es una construcción matemática para resolver problemas de equilibrio; y como tal, no tiene ninguna interpretación intuitiva¹³⁷. La función t_a después de calcular la integral es:

$$t_a^0 \left[x_a + \frac{\alpha}{(\beta + 1)} \frac{x_a^{\beta+1}}{(CA_a + z_a)^\beta} \right]$$

La ecuación (8) garantiza que el flujo de vehículos clase m sobre todas las rutas que conectan el par w sea igual al número de vehículos clase m que viajan entre el par w , es decir, asegura que el número total de vehículos que viajan de O a D sean asignados a la red. La restricción (9) relaciona el flujo en el enlace con el flujo en las rutas; establece que el flujo de cada vehículo clase m sobre un enlace debe ser igual a la suma de los flujos de los vehículos clase m en las rutas que

¹³⁷ SHEFFI, Yosef. Urban Transportation Networks. Equilibrium Analysis With Mathematical Programming Methods. Nueva Jersey: Prentice-Hall, 1985. 399 p. ISBN 0-13-939729-9.

atraviesan el enlace. La ecuación (10) calcula el flujo total en el enlace como la suma del flujo en *Passenger Car Equivalent* (PCE, por su sigla en inglés), de todos los vehículos clase m que atraviesan el enlace; esto con el fin de convertir el flujo mixto (por ejemplo, camiones, buses, busetas) en una sola unidad vehicular (carros o vehículos de pasajeros), ya que dependiendo de su tamaño, unos utilizan más capacidad que otros. Finalmente, la restricción (11) representa la no negatividad del flujo del vehículo clase m sobre la ruta.

Los principales supuestos del modelo son:

- El tiempo de viaje de los usuarios sobre un enlace depende solo del flujo sobre ese enlace y no del flujo sobre el resto de los enlaces en la red.
- Los transportistas o conductores de los vehículos se movilizan en un ambiente no cooperativo, donde cada quien trata de minimizar sus propios costos de operación.

5. MÉTODO DE SOLUCIÓN PROPUESTO (GMED)

La ED ha demostrado ser una metaheurística robusta en la solución de problemas binivel de diseño de redes de transporte. Por lo anterior, y debido a sus características como facilidad de implementación y requerimiento de pocos parámetros de control, se decidió utilizarla en la solución del modelo de corredor logístico “green” formulado en este trabajo.

El método propuesto, llamado GMED, se basa en el algoritmo Evolución Diferencial Binivel (BIDE) desarrollado por Angelo, Krempser y Barbosa (2013)¹³⁸, que resuelve tanto el problema de nivel superior como el de nivel inferior utilizando ED. Sin embargo, al implementar BIDE en MATLAB para verificar su funcionamiento en problemas binivel tipo académico (ver sección 5.2.1), resultó ser costoso computacionalmente, a causa de efectuar la ED en el nivel inferior, ya que, en determinada generación, para cada vector objetivo de la población de nivel superior debe realizarse la ED del nivel inferior, y adicionalmente, para cada uno de estos vectores objetivo se genera un vector de prueba, con el que también se debe llevar a cabo la ED del nivel inferior; lo cual significa que, por ejemplo, si $NP = 30$ y $G_{max} = 30$ en el nivel superior e inferior, en total se efectúan 900 y 1.620.000 iteraciones en el nivel superior e inferior, respectivamente; siendo 1.620.000 un valor bastante alto en comparación con las del nivel superior.

Teniendo en cuenta la *gran cantidad de iteraciones que deben realizarse en el nivel inferior al utilizar ED*, en este trabajo se plantea implementar ED en MATLAB para resolver el problema de nivel superior, y a diferencia de BIDE, resolver el nivel inferior a través de la herramienta de modelado GAMS (*General Algebraic Modeling System*), utilizando todas las capacidades de optimización de este

¹³⁸ ANGELO, KREMPSER y BARBOSA. Op. cit., p. 470.

software. Para ello fue necesario realizar la interfaz GAMS/MATLAB, haciendo uso del intercambio de archivos GDX (*GAMS Data Exchange*).

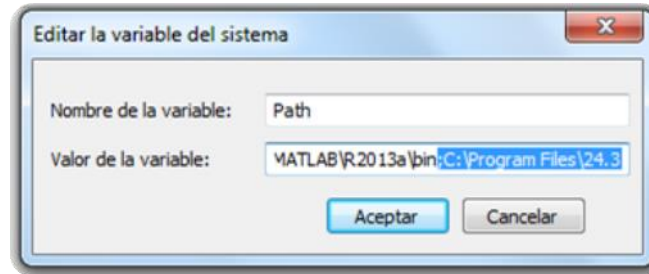
5.1 INTERFAZ GAMS/MATLAB

Los aspectos tenidos en cuenta para lograr la interfaz GAMS/MATLAB se detallan a continuación.

5.1.1 Configuración del equipo o PC. Ejecutar GAMS desde MATLAB requiere en primer lugar, instalar las dos herramientas computacionales en el mismo equipo. Por otra parte, se debe agregar la ruta de ubicación de GAMS a la variable de entorno “*Path*” de Windows (suponiendo que este sea el sistema operativo), es decir, si GAMS se encuentra instalado en *C:\Program Files\24.3*, agregar la ruta a la variable *Path* requeriría del siguiente procedimiento:

1. Ir al inicio de Windows.
2. Clic derecho en equipo.
3. Clic izquierdo en propiedades del equipo.
4. Clic izquierdo en configuración avanzada.
5. Clic izquierdo en variables de entorno.
6. En el recuadro de variables del sistema, seleccionar la variable “*Path*” y dar clic izquierdo en editar.
7. Al final de lo que está escrito en “valor de la variable”, sin dejar espacios, agregar un “;”, seguido de la ruta de ubicación de GAMS (ver figura 6).
8. Aceptar todo y salir.

Figura 6. Edición de la variable del sistema



Adicionalmente, la misma ruta donde se encuentra instalado GAMS, y la de la carpeta donde se guardó el programa elaborado en GAMS (generalmente el directorio en el cual GAMS por defecto guarda los archivos), deben ser añadidos al “*Set Path*” de MATLAB; los pasos para realizar lo anterior son:

1. Abrir MATLAB.
2. Clic en “*Set Path*”.
3. Clic en “*Add Folder*”.
4. Buscar y seleccionar la carpeta donde está instalado GAMS (Ejemplo: *C:\Program Files\24.3*).
5. Nuevamente clic en “*Add folder*”.
6. Buscar y seleccionar el directorio de GAMS (Ejemplo: *C:\Users\HOME\Documents\gamsdir\projdir*).
7. Guardar y cerrar.

Cabe mencionar que para lograr ejecutar un programa elaborado en un script de MATLAB con interfaz GAMS, la ruta de ubicación del programa en MATLAB debe ser añadida a la carpeta “*Set Path*”, y el programa elaborado en GAMS debe estar en el “*Current Folder*” de MATLAB.

5.1.2 Archivos GDX. Los archivos GDX (*GAMS Data Exchange*) son los que contienen la información a intercambiar entre las herramientas computacionales

MATLAB y GAMS. Suponiendo que MATLAB debe leer la información de un GDX, correspondiente a la salida de GAMS (solución de un problema de optimización — valores de las variables de decisión—), ésta se mostrará como una matriz de cardinalidad C y dimensión d+1, es decir, una matriz de tamaño [C,d+1]; en donde, cada fila de la matriz corresponde a una variable de decisión, las columnas anteriores a d+1 indican los índices que identifican la variable y la última columna muestra el valor de la misma. Por ejemplo, si x_{amp} es la variable optimizada en GAMS, siendo “a” el enlace [1,2], “m” el tipo de vehículo [1,2] y “p” el tipo de producto [1,2]; MATLAB lee una matriz con tres índices, donde la primera columna hace referencia a “a”, la segunda columna a “m” y la tercera columna a “p”; la última columna indica el valor asignado a la variable, tal como se muestra a continuación.

$x_{amp} =$

1	1	1	4
1	1	2	1
1	2	1	2
1	2	2	1
2	1	1	3
2	1	2	4
2	2	1	5
2	2	2	2

En este caso, por ejemplo, $x_{212} = 4$. De manera que, para utilizar en MATLAB la información del GDX, esta debe ser organizada según se requiera.

El pseudocódigo del método de solución binivel propuesto GMED se muestra en la figura 7.

Figura 7. Pseudocódigo del algoritmo GMED

Entradas: *NPS* (Número total de individuos en la población del nivel superior), *FS* (Factor de mutación del nivel superior), *CRS* (Tasa de cruce del nivel superior), *GmaxS* (Número máximo de generaciones del nivel superior).

Inicializar // Generar la población inicial aleatoria de nivel superior (NPS)

Para $i \leftarrow 1$ hasta *NPS*

$xviejo = gams('NivelInfGM.gms')$ // Solucionar el nivel inferior con $z_{i,g}$

Ordenar

Evaluar $f1(z_{i,g}, xviejo)$

Encontrar el mejor valor *fitness*

Fin Para

Gsup $\leftarrow 0$

Mientras Gsup < GmaxS

Para $i \leftarrow 1$ hasta *NPS*

Seleccionar aleatoriamente ($v1, v2, v3$) // $v1 \neq v2 \neq v3 \neq i$

jrand \leftarrow Entero aleatorio entre (1,DS)

Para $j \leftarrow 1$ hasta DS // Generar el vector trial

r=rand

Si ($r \leq CR$ ó $j = jrand$) entonces

$w_{i,g}^j = z_{v1,g}^j + FS \cdot (z_{v2,g}^j - z_{v3,g}^j)$ // Suponiendo cruce binomial

Caso contrario

$w_{i,g}^j = z_{i,g}^j$

Fin Si

Fin Para

$x = gams('NivelInfGM.gms')$ // Solucionar el nivel inferior con $w_{i,g}$

Ordenar

Si $f1(w_{i,g}, x) \leq f1(z_{i,g}, xviejo)$ // Seleccionar el individuo de la siguiente generación

$z_{i,g+1} = w_{i,g}$

Caso contrario

$z_{i,g+1} = z_{i,g}$

Fin Si

Fin Para

Gsup \leftarrow Gsup+1

Fin Mientras

5.2 ANÁLISIS NUMÉRICO

El desempeño del método GMED se evaluó a través de la solución de problemas binivel tipo académico. Adicionalmente se verificó su funcionamiento mediante la solución del CNPD, problema de transporte directamente relacionado con el modelo propuesto en este trabajo.

Teniendo en cuenta que el método propuesto GMED involucra una metaheurística (ED), los resultados se analizan con base en los obtenidos de treinta corridas realizadas. Las corridas se efectuaron en un equipo con procesador Intel® Core™ i5-4570 CPU @ 3.20 GHz 3.20 GHz, memoria RAM 8.00 GB, y sistema operativo *Windows 7 Home Premium* de 64 bits.

5.2.1 Solución de problemas binivel tipo académico. Para evaluar el desempeño del método propuesto GMED, los problemas binivel —mostrados en (20), (21)— se resolvieron mediante los algoritmos BIDE y GMED. Las métricas utilizadas para la evaluación del desempeño y comparación de los dos algoritmos, fueron la desviación estándar y el tiempo de cálculo.

Ejemplo 1

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{Min}_z f_1(z, x) = z^2 + (x - 10)^2 \\
 & \text{s. a} \quad -z + x \leq 0 \\
 & \quad z \in [0,15] \qquad \qquad \qquad (20) \\
 & \mathbf{min}_x f_2(z, x) = (z + 2x - 30)^2 \\
 & \text{s. a} \quad z + x - 20 \leq 0 \\
 & \quad x \in [0,20]
 \end{aligned}$$

Ejemplo 2

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{Min}_z f_1(z, x) = 16z^2 + 9x^2 \\
 & \text{s. a} \quad -4z + x \leq 0 \\
 & \mathbf{min}_x f_2(z, x) = (z + x - 20)^4 \qquad \qquad \qquad (21) \\
 & \text{s. a} \quad 4z + x - 50 \leq 0 \\
 & \quad z, x \geq 0
 \end{aligned}$$

Los parámetros $NPS = 30$, $FS = 0,7$, $CRS = 0,9$ y $GmaxS=30$ (tomados de la literatura), fueron empleados para resolver los problemas tipo académico a través de BIDE y GMED; los códigos de estos algoritmos para los ejemplos 1 y 2, se muestran en los anexos B, C y D, E.

Resultados y discusión

Los resultados y tiempos de las 30 corridas para los ejemplos 1 y 2, se muestran en el anexo F. La mejor solución (aquella que arrojó el valor mínimo de la función objetivo de nivel superior) obtenida por BIDE y GMED para los ejemplos en cuestión, se presenta en la tabla 7. Las estadísticas obtenidas de las 30 corridas realizadas para cada método se resumen en las tablas 8 y 9; y los tiempos de cálculo promedio se muestran en la tabla 10.

Tabla 7. Mejor solución BIDE y GMED

	BIDE	GMED
Ejemplo 1	$f_1 = 99,9997$ $z = 10$ $f_2 = 9,7665e-09$ $x = 10$	$f_1 = 100$ $z = 10$ $f_2 = 4,8551e-12$ $x = 10$
Ejemplo 2	$f_1 = 2250$ $z = 11,2443$ $f_1 = 194,1677$ $x = 5,0229$	$f_1 = 2250$ $z = 11,2441$ $f_2 = 194,0732$ $x = 5,0234$

Tabla 8. Estadísticas BIDE

	Nivel	Mínimo	Media	Máximo	Desviación estándar
Ejemplo 1	Superior (UL)	99,9997	100,0004	100,0043	0,0009
	Inferior (LL)	3,2620e-10	5,3719e-08	3,0124e-07	1,0289e-07
Ejemplo 2	Superior (UL)	2250	2250	2250	0
	Inferior (LL)	194,1677	197,2530	199,0456	1,3114

Tabla 9. Estadísticas GMED

	Nivel	Mínimo	Media	Máximo	Desviación estándar
Ejemplo 1	Superior (UL)	100	100,0012	100,0083	0,00204
	Inferior (LL)	4,8551e-12	1,2595e-07	1,5592e-06	3,9120e-07
Ejemplo 2	Superior (UL)	2250	2250	2250	0
	Inferior (LL)	194,0732	197,66382	198,9287	0,9305

Tabla 10. Tiempos de cálculo promedio (minutos) BIDE y GMED

	BIDE	GMED
Ejemplo 1	27,68	2,79
Ejemplo 2	28,73	2,92

Los resultados obtenidos por GMED son similares a los arrojados por BIDE para los dos problemas binivel académicos resueltos. Además, para las 30 ejecuciones realizadas de cada ejemplo, se observa, son semejantes unos con otros; esto es, la métrica desviación estándar de los valores de la función objetivo de nivel superior e inferior es igual o cercana a cero, lo que refleja el buen funcionamiento del método propuesto.

En cuanto a la métrica tiempo de cálculo, se observó que GMED es más eficiente que BIDE, ya que, la solución para los ejemplos de prueba se obtiene en un tiempo mucho menor: 2,79 minutos versus 27,68 minutos para el ejemplo 1, y 2,92 minutos versus 28,73 minutos para el ejemplo 2, luego se consigue una reducción del 89,92% y 89,84%, respectivamente.

5.2.2 Solución del problema CNDP. Con el fin de comprobar el buen desempeño del método propuesto GMED en problemas de diseño de redes de transporte, que son la base del modelo de corredor logístico presentado en este trabajo, se

resolvió el problema CNDP para dos redes de prueba, y sus resultados se compararon con los obtenidos por otros métodos de solución existentes (ver tabla 11). La formulación del CNDP se presenta en el anexo G.

Tabla 11. Métodos de solución existentes aplicados al CNDP

	Método de solución	Sigla
Red 1	<i>Equilibrium Decomposed Optimization</i>	EDO
	<i>Sensitivity Analysis Based algorithm</i>	SAB
	<i>System optimal network flows</i>	SO
	<i>Gradient Projection method</i>	GP
	<i>Conjugate Gradient projection method</i>	CG
	<i>Qusai-NEWton projection method</i>	QNEW
	<i>PARATAN version of gradient projection method</i>	PT
Red 2	<i>Simulated Annealing</i>	SA
	<i>Genetic Algorithm</i>	GA
	<i>Artificial Bee Colony</i>	ABC
	<i>Harmony Search</i>	HS
	<i>Differential Evolution</i>	DE
	<i>MODified differential evolution</i>	MODE

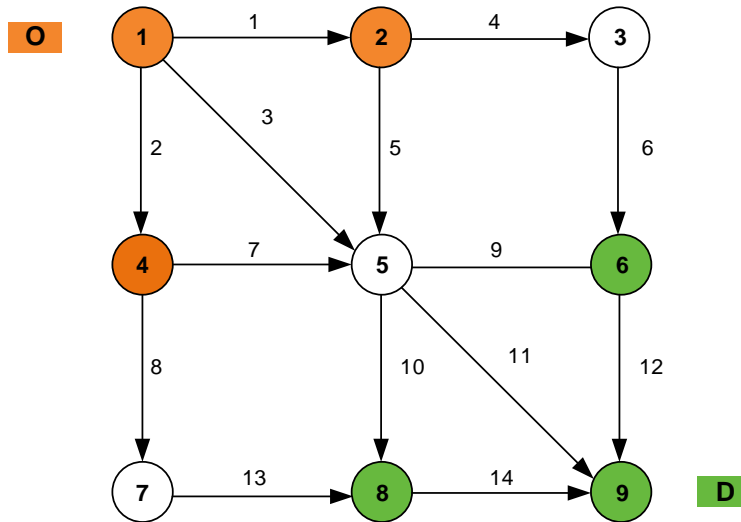
Redes de prueba

Las redes de prueba son las siguientes:

- **Red 1:** Conformada por 14 enlaces, 9 nodos y 9 pares origen-destino (OD). Son pares OD los nodos (1-6, 1-8, 1-9, 2-6, 2-8, 2-9, 4-6, 4-8, 4-9).
- **Red 2:** Conformada por 18 enlaces, 6 nodos y 2 pares origen-destino (OD). Son pares OD los nodos (1-6, 6-1).

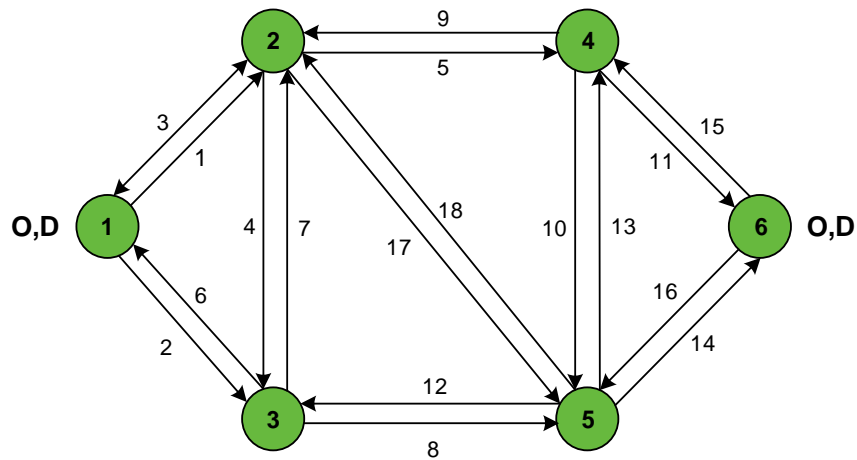
Los esquemas de las redes 1 y 2 se muestran en las figuras 8 y 9, respectivamente. Por otra parte, los datos de entrada del modelo para cada una de ellas se encuentran en el anexo H.

Figura 8. Red de prueba 1



Fuente. CHIOU, Suh-Wen.

Figura 9. Red de prueba 2



Fuente. XU, Tianze; WEI,Heng y HU, Guanghua.

Los parámetros $NPS = 20$, $FS = 0,8$, $CRS = 0,8$ y $GmaxS=150$ (tomados de la literatura), fueron empleados para resolver el problema CNDP a través de GMED. Los códigos de GMED para las redes de prueba 1 y 2 se encuentran en los anexos I y J, respectivamente.

Resultados y discusión

Con el fin de realizar la respectiva comparación y análisis, la solución de nivel superior (z_i) y el valor *fitness* de nivel superior (f_1), obtenidos a través de GMED y otros métodos de solución, así como el mejor y peor valor de f_1 , y la desviación estándar (S) del método propuesto GMED, para las redes 1 y 2, se presentan en las tablas 12 y 13, respectivamente. La solución mostrada para efectos de comparación, tras haber realizado las corridas del algoritmo (los resultados de las 30 corridas para las dos redes de prueba, se encuentran en el anexo K) fue la que arrojó el mejor valor *fitness* de nivel superior, debido a que GMED es un método estocástico.

Tabla 12. Resultados de diferentes métodos de solución – Red 1

	EDO	SAB	SO	GP	CG	QNEW	PT	GMED
Límite superior de z_a	500	500	500	500	500	500	500	500
z_6	0,0002	0	0,0002	0	0	0	0	0
z_9	0,0002	0	0,0002	0	0	0	0	0
z_{10}	0,0002	0	0,0002	0	0	0	0	0
z_{11}	0,0002	0	0,0002	0	0	0	0	0
z_{13}	137,445	128,087	0,0002	128,103	137,445	137,445	127,793	0
f_1	4109,56	4110,02	3819,75	4110,02	4109,55	4109,55	4110,05	3838,50
							Mejor valor de f_1	3838,50
							Peor valor de f_1	3838,50
							S	0*

*Valor obtenido de 30 corridas

Tabla 13. Resultados de diferentes métodos de solución – Red 2

	SA	GA	ABC	HS	DE	MODE	GMED	
Límite superior de z_a	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	
z_1	0	0	0	0	0	0	0	
z_2	0,47	0	0	0	0	0	0,0142	
z_3	0,65	0	0	0	0	0	0,0055	
z_4	0	0	0	0	0	0	0	
z_5	0	0	0	0	0	0	0,0175	
z_6	6,53	4,47	5,76	4,30	4,93	5,24	5,4415	
z_7	0,80	0	0	0	0	0	0,0017	
z_8	0,25	0	0	0	0	0	0,0020	
z_9	0	0	0	0	0	0	0	
z_{10}	0	0	0	0	0	0	0	
z_{11}	0	0	0	0	0	0	0	
z_{12}	0	0	0	0	0	0	0	
z_{13}	0	0	0	0	0	0	0	
z_{14}	0,84	0	0	0	0	0	0,0035	
z_{15}	0,14	0	0,04	0,02	0	0	0,0000	
z_{16}	7,34	7,54	7,88	7,32	7,69	7,61	7,62	
z_{17}	0	0	0,24	0	0	0	0	
z_{18}	0	0	0	0	0	0	0,0214	
f_1	205,89	191,26	190,40	189,59	190,43	190,33	190,9888	
#UE	15.000	50.000	2.000	50.000	860	396	3.000	
							Mejor valor de f_1	190,9888
							Peor valor de f_1	192,4985
							S	0,4023*

*Valor obtenido de 30 corridas

En las figuras 10 y 11 se presentan las gráficas del valor fitness (ZminSupGMED) versus las generaciones para las redes 1 y 2, respectivamente; en ellas se puede observar que el algoritmo GMED converge hacia una solución, a medida que aumenta el número de generaciones.

Figura 10. Gráfica de ZminSupGMED vs generaciones – Red 1

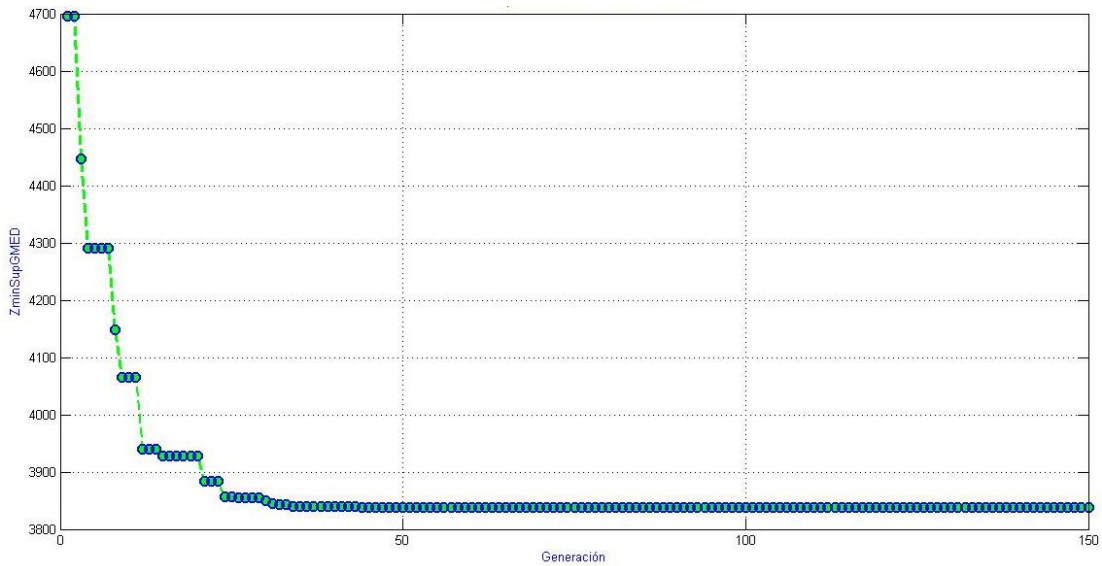
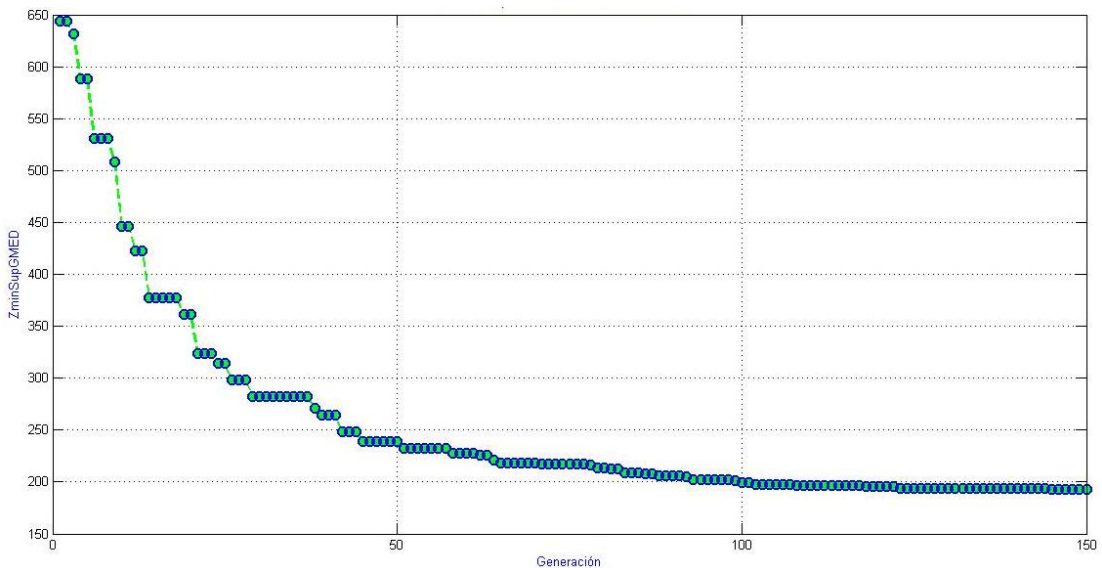


Figura 11. Gráfica de ZminSupGMED vs generaciones – Red 2



La solución obtenida por GMED para las dos redes de prueba en cuanto al valor *fitness* y las variables de nivel superior, es similar a la obtenida por los otros métodos de solución. Además, la desviación estándar de los valores *fitness* de nivel superior para la red 1 es cero, y para la red 2 es baja (cercana a cero), reflejando con ello el buen funcionamiento del enfoque propuesto.

La red de prueba 2 a diferencia de la red 1, se comparó en términos del número de asignaciones de equilibrio de usuario (*#UE*) o problemas de nivel inferior resueltos, considerada como una medida de esfuerzo computacional para resolver el problema, ya que en los trabajos anteriores no se presentan tiempos de cálculo. Solo se realiza lo anterior en la red 2, debido a que los métodos de solución encontrados en la literatura para esta red, son todos metaheurísticas al igual que GMED, lo que hace viable su comparación. Los resultados muestran que GMED es más eficiente y eficaz que los métodos SA y GA, ya que se obtiene un mejor valor *fitness* de nivel superior con menos esfuerzo computacional (*#UE*).

En conclusión, se comprueba que GMED tiene un buen funcionamiento y desempeño en cuanto a precisión, al arrojar resultados similares a los obtenidos por otros métodos de solución y al obtener una desviación estándar de los valores *fitness* de nivel superior nula en la red 1 y cercana a cero en la red 2.

6. APLICACIÓN

La red conformada para la aplicación es la integrada por el corredor logístico de importancia estratégica en Colombia Bogotá-Yopal, establecido en la resolución No. 164 de 2015¹³⁹ del Ministerio de Transporte. Según el artículo 1 del decreto 1478 de 2014 se definen los corredores logísticos de importancia estratégica como “aquellos medios físicos que facilitan el intercambio y el desarrollo del comercio en general, por los cuales se moviliza la carga tanto de comercio exterior como del comercio interno, permitiendo la vinculación entre los nodos de producción y consumo junto con sus áreas de influencia, sea en tramos urbanos, suburbanos y rurales, así como los medios físicos que los conecten con las infraestructuras de servicios regionales, nacionales e internacionales”¹⁴⁰.

6.1 DESCRIPCIÓN DE LA RED

La red del corredor Bogotá-Yopal está conformada por 9 enlaces, 7 nodos y 3 pares w. En la figura 12 se muestra el esquema de la red.

Los pares w, las rutas de cada par, y los enlaces que pertenecen a cada una de ellas, se presentan en la tabla 14.

¹³⁹ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 164 (5, febrero, 2015). Por medio de la cual se establecen los corredores logísticos de importancia estratégica para el país y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2015. 6 p.

¹⁴⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Decreto 1478 (5, agosto, 2014). Por medio del cual se fijan lineamientos para el establecimiento de corredores logísticos de importancia estratégica para el país y para la articulación de los actores que convergen sobre éstos, y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2014. 4 p.

Figura 12. Red del corredor Bogotá-Yopal

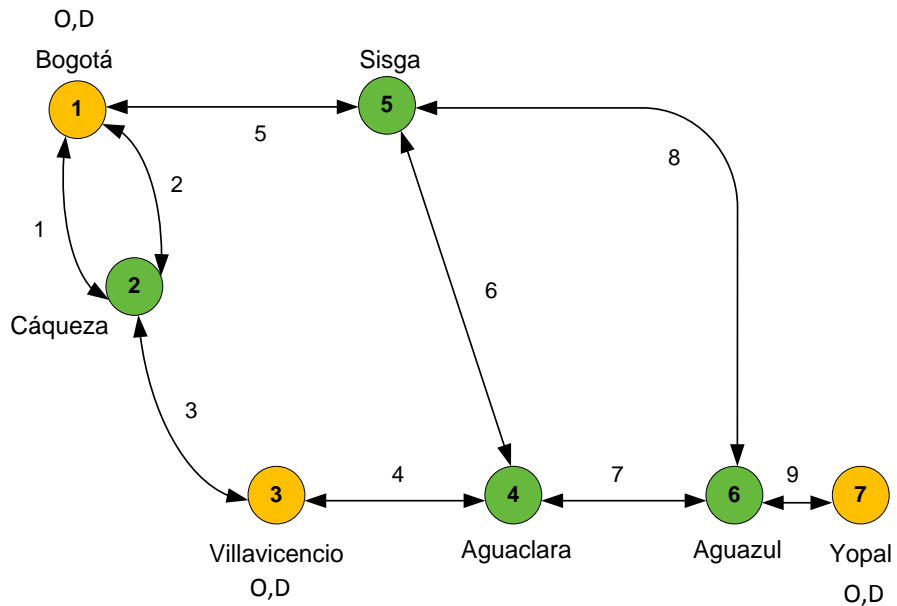


Tabla 14. Pares w, rutas y enlaces del corredor Bogotá-Yopal

Par w	Origen-Destino	Rutas	Enlaces	
1	Bogotá-Villavicencio Villavicencio-Bogotá	1	Bogotá-Chipaque-Cáqueza-Villavicencio	1,3
		2	Bogotá-La Calera-Cáqueza-Villavicencio	2,3
2	Villavicencio-Yopal Yopal-Villavicencio	1	Villavicencio-Aguaclara-Aguazul-Yopal	4,7,9
		2	Villavicencio-Aguaclara-Sisga-Aguazul-Yopal	4,6,8,9
3	Bogotá-Yopal Yopal-Bogotá	1	Bogotá-Chipaque-Cáqueza-Villavicencio-Aguaclara-Aguazul-Yopal	1,3,4,7,9
		2	Bogotá-La Calera-Cáqueza-Villavicencio-Aguaclara-Aguazul-Yopal	2,3,4,7,9
		3	Bogotá-Sisga-Aguazul-Yopal	5,8,9
		4	Bogotá-Sisga-Aguaclara-Aguazul-Yopal	5,6,7,9
		5	Bogotá-Chipaque-Cáqueza-Villavicencio-Aguaclara-Sisga-Aguazul-Yopal	1,3,4,6,8,9
		6	Bogotá-La Calera-Cáqueza-Villavicencio-Aguaclara-Sisga-Aguazul-Yopal	2,3,4,6,8,9

Las clases de vehículos consideradas para la aplicación son diez: siete (7) vehículos de transporte de carga y tres (3) de transporte de pasajeros; en la tabla 15 se describen estas.

Tabla 15. Clases de vehículos m

Clase de vehículo m	Descripción	Según su estructura
1	Vehículos tipo 2	Rígidos
2	Vehículos tipo 3	
3	Vehículos tipo 4	
4	Vehículos tipo 2S1	Articulados
5	Vehículos tipo 2S2	
6	Vehículos tipo 3S2	
7	Vehículos tipo 3S3	
8	Buses que transportan pasajeros	-
9	Busetas que transportan pasajeros	
10	Vehículos particulares que transportan pasajeros	

6.2 DATOS DE ENTRADA DEL MODELO

Los datos de entrada del modelo se presentan a continuación.

- **Tiempo a flujo libre para atravesar el enlace a (t_a^0).** La información de t_a^0 se obtuvo de Google Maps, y corresponde al tiempo para atravesar cada enlace cuando no existe congestión (ver tabla 16).

Tabla 16. Tiempo a flujo libre (t_a^0)

	Enlace	t_a^0 (horas)
1	Bogotá–Chipaqué–Cáqueza	1,65
2	Bogotá–La Calera–Cáqueza	3,5
3	Cáqueza–Villavicencio	1,28
4	Villavicencio–Aguaclara	1,88
5	Bogotá–Sisga	0,98
6	Sisga–Aguaclara	2,98
7	Aguaclara–Aguazul	1,35
8	Sisga–Sogamoso–Aguazul	5,1
9	Aguazul–Yopal	0,5

- **Capacidad existente del enlace a (CA_a).** Debido a que cada enlace se encuentra dividido en tramos con diferente valor de capacidad, se estableció el valor de capacidad del enlace como el mínimo valor de capacidad de los tramos que forman parte de este.

El cálculo de la capacidad de cada tramo se realizó a través del “método colombiano para determinar la capacidad en carreteras de dos carriles”¹⁴¹, que parte de un valor de capacidad en condiciones ideales $Ci = 3200 \text{ vehículos/hora}$ en ambos sentidos, y se multiplica por varios factores de corrección para transformar esa capacidad ideal en la capacidad de la carretera en estudio, así:

$$C = Ci * F_{pe} * F_d * F_{cb}$$

Donde:

C Capacidad de la carretera de dos carriles

Ci Capacidad de la carretera de dos carriles en condiciones ideales

F_{pe} Factor de corrección por pendiente (ver anexo L)

F_d Factor por distribución en los dos sentidos (ver anexo L)

F_{cb} Factor por efecto combinado de ancho de carril y berma (ver anexo L)

Las condiciones ideales son las siguientes:

- Repartición del tránsito por igual en ambos sentidos
- Terreno plano
- Carriles de no menos de 3,65 metros de ancho
- Bermas de no menos de 1,80 metros de ancho
- Superficie de rodadura en condiciones óptimas
- Alineamiento recto

¹⁴¹ COLOMBIA. INVIAS, UNIVERSIDAD DEL CAUCA. Manual de capacidad y niveles de servicio para carreteras de dos carriles. Segunda versión. Popayán. 1996.

- Ausencia de vehículos pesados
- Visibilidad adecuada para adelantar
- Señalización horizontal y vertical óptima

Los valores de capacidad de los tramos y los establecidos para cada enlace se encuentran en el anexo M. En la tabla 17 se resumen las capacidades de los enlaces.

Tabla 17. Capacidades de los enlaces CA_a

Enlace		CA_a
1	Bogotá–Chipaque–Cáqueza	2080
2	Bogotá–La Calera–Cáqueza	2473
3	Cáqueza–Villavicencio	2024
4	Villavicencio–Aguaclara	2826
5	Bogotá–Sisga	2978
6	Sisga–Aguaclara	2089
7	Aguaclara–Aguazul	2946
8	Sisga–Sogamoso–Aguazul	2887
9	Aguazul–Yopal	3042

- **Parámetros de la función de tiempo de viaje en el enlace a (α, β) .** Los valores de α y β se fijaron en 0,15 y 4, respectivamente.
- **Tiempo promedio de la operación de carga-descarga (φ) .** Según el informe de tiempos logísticos del año 2013 del Ministerio de Transporte¹⁴², el valor de este parámetro para los vehículos rígidos y articulados es de 0,086 y 0,111 horas, respectivamente.
- **Número de vehículos clase m que circulan entre el origen O y el destino D (par w) (q_m^w) .** La información de los vehículos clase $m = 1,2,3,4,5,6,7$, se obtuvo

¹⁴² COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Tiempos logísticos [en línea]. 2013. [citado en 2015-07-10]. Disponible en: < <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?id=4040>>

de la matriz OD del año 2013; en tanto que los datos correspondientes a $m = 8,9,10$ fueron asumidos. Los valores de q_m^w se presentan en la tabla 18.

Tabla 18. Valores q_m^w

$m \backslash w$	1	2	3
1	143	607	57
2	22	87	5
3	10	20	6
4	4	4	1
5	7	26	3
6	55	71	26
7	37	61	11
8	69	45	40
9	65	45	42
10	277	238	137

- **Longitud del enlace a (L_a).** Los valores de L_a fueron obtenidos de Google Maps y se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Longitud L_a

Enlace		L_a (km)
1	Bogotá–Chipaque–Cáqueza	62
2	Bogotá–La Calera–Cáqueza	121
3	Cáqueza–Villavicencio	65,4
4	Villavicencio–Aguaclara	135
5	Bogotá–Sisga	64,7
6	Sisga–Aguaclara	141
7	Aguaclara–Aguazul	101
8	Sisga–Sogamoso–Aguazul	266
9	Aguazul–Yopal	27,2

- **Factor de emisión del contaminante b para el vehículo clase m (F_{bm}).** Los contaminantes considerados para efectos de esta aplicación son CO, NOx y HC. Los factores de emisión ajustados para Colombia de los anteriores contaminantes,

según el documento titulado “Estimación de las emisiones contaminantes por fuentes móviles a nivel nacional y formulación de lineamientos técnicos para el ajuste de las normas de emisión”¹⁴³, dependen de la categoría vehicular y el tipo de combustible (ver tabla 20). La tabla 21 establece la correspondencia entre la categoría vehicular (Unión Europea) y el tipo de vehículo (Colombia). Finalmente, en la tabla 22 se presentan los valores F_{bm} (máximos de la tabla 20), teniendo en cuenta que el tipo de combustible de las busetas y los vehículos de pasajeros es la gasolina, y el de los demás tipos de vehículos es el diesel.

Tabla 20. Factores de emisión ajustados para Colombia

Categoría vehicular	Factor de emisión			
	Rango de datos	CO (g/km)	NOx (g/km)	HC (g/km)
<i>Passengers cars</i>				
Cilindraje > 2,0 L Gasolina	Mínimo	0,1562	0,033	0,039
	Máximo	0,7857	0,109	0,360
Cilindraje > 2,0 L Diesel	Mínimo	0,6204	0,590	0,027
	Máximo	0,9428	1,786	0,078
<i>Light duty vehicles</i>				
Cilindraje < 3,5 L Gasolina	Mínimo	0,198	0,049	0,0434
	Máximo	0,807	0,116	0,3956
Cilindraje < 3,5 L Diesel	Mínimo	0,713	0,027	0,2652
	Máximo	0,882	0,135	0,650
<i>Heavy duty vehicles</i>				
Gasolina	Mínimo	0,558	5,726	0,161
	Máximo	1,179	6,379	0,504
PVB < 7,5 ton Diesel	Mínimo	0,514	5,450	0,270
	Máximo	2,530	6,209	0,522
PVB 7,5 – 16 ton Diesel	Mínimo	0,530	0,029	0,100
	Máximo	0,994	0,444	0,531
PVB 16 – 32 ton Diesel	Mínimo	0,354	0,590	0,180
	Máximo	0,850	1,786	0,375

Fuente: CASTRO PEÑA, Paula Carolina y ESCOBAR WINSTON, Lina Margarita.

¹⁴³ CASTRO PEÑA, Paula Carolina y ESCOBAR WINSTON, Lina Margarita. Estimación de las emisiones contaminantes por fuentes móviles a nivel nacional y formulación de lineamientos técnicos para el ajuste de las normas de emisión. Trabajo de grado para optar por el Título de Ingenieras Ambientales y Sanitarias. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2006. 121 p.

Tabla 21. Correspondencia categorías – tipos de vehículos

Categoría	Tipo de vehículo
<i>Passengers cars</i>	Vehículos particulares
	Vehículos servicio público (taxis)
	Campero
	Camioneta
<i>Light duty vehicles</i>	Microbús
	Buseta
<i>Heavy duty vehicles</i>	Bus
	Camión
	Volqueta
	Tractocamión

Fuente: CASTRO PEÑA, Paula Carolina y ESCOBAR WINSTON, Lina Margarita.

Tabla 22. Factores de emisión F_{bm}

$b \backslash m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,807	0,7857
2	1,786	1,786	1,786	1,786	1,786	1,786	1,786	1,786	0,116	0,109
3	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,3956	0,360

- **Valor límite de emisiones del contaminante b (LE_b).** El valor asumido para los tres tipos de contaminantes fue de 3.000.000 g-km/h.
- **Mínima ($lowS_a$) y máxima ($uppS_a$) expansión de capacidad del enlace a.** El valor de $lowS_a$ se estableció en cero, y el valor de $uppS_a$ se obtuvo de la diferencia entre el valor de capacidad ideal y el valor de capacidad existente del enlace (ver tabla 23).
- **Matriz enlace-ruta (δ_{ak}^w).** La matriz relaciona los enlaces con las rutas, δ_{ak}^w toma el valor de 1 si el enlace a forma parte de la ruta k que conecta el par w , y 0 en caso contrario (ver tabla 24).

Tabla 23. Mínima ($lowS_a$) y máxima ($uppS_a$) expansión de capacidad

Enlace		$lowS_a$	$uppS_a$
1	Bogotá–Chipaque–Cáqueza	0	1120
2	Bogotá–La Calera–Cáqueza	0	727
3	Cáqueza–Villavicencio	0	1176
4	Villavicencio–Aguaclara	0	374
5	Bogotá–Sisga	0	222
6	Sisga–Aguaclara	0	1111
7	Aguaclara–Aguazul	0	254
8	Sisga–Sogamoso–Aguazul	0	313
9	Aguazul–Yopal	0	158

Tabla 24. Matriz enlace-ruta

	Par w									
	1		2		3					
	Ruta		Ruta		Ruta					
Enlace	1	2	1	2	1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
3	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
4	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
6	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
7	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0
8	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
9	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

- Vehículos de pasajeros equivalente para el vehículo clase m (PCE_m)

Los valores de PCE_m fueron tomados del estudio titulado “Development of passenger car unit (pcu) values for Malaysia”¹⁴⁴ (ver tabla 25).

¹⁴⁴ ANAND, S.; SEKHAR, S.V.C. y KARIM, Mohamed Rehan. DEVELOPMENT OF PASSENGER CAR UNIT (PCU) VALUES FOR MALAYSIA [en línea]. 1999, vol. 3, no. 3 [citado en 2015-07-07], 8 p. Disponible en: <<http://easts.info/on-line/journal/vol3no3/33006.pdf>>.

Tabla 25. Valores PCE_m

Clase de vehículo m		PCE_m
1	Vehículos tipo 2	2,5
2	Vehículos tipo 3	2,5
3	Vehículos tipo 4	2,5
4	Vehículos tipo 2S1	3
5	Vehículos tipo 2S2	3
6	Vehículos tipo 3S2	3
7	Vehículos tipo 3S3	3
8	Buses que transportan pasajeros	3
9	Busetas que transportan pasajeros	2
10	Vehículos particulares que transportan pasajeros	1

Resultados

Al igual que los problemas binivel tipo académico y el problema CNDP, se realizaron 30 corridas para resolver el modelo de corredor logístico “green” aplicado al corredor Bogotá-Yopal. De forma similar al CNDP, los parámetros de control utilizados en el algoritmo GMED, fueron: $NPS = 20$, $FS = 0,8$, $CRS = 0,8$ y $GmaxS = 150$. El código de programación correspondiente a la aplicación se encuentra en el anexo N.

A partir de los resultados del modelo propuesto, se concluye que las capacidades de los enlaces de la red para la configuración actual del corredor logístico Bogotá-Yopal, no son las adecuadas para el volumen de demanda de tránsito que circula por los enlaces; por lo que deben ser expandidos. Al comparar el tiempo total en la red para la configuración actual (con las capacidades existentes, es decir, sin realizar ampliación) versus el resultado de una corrida del modelo —ya que el obtenido para las diferentes corridas del algoritmo GMED (ver anexo O) es el mismo—, se logra reducir este en 3,58% (2,1252e4 versus 2,0492e4 horas).

Cabe mencionar que en la aplicación se manejaron varios supuestos, por no existir la información referente a disposición, y no fue posible contrastar los

resultados de la aplicación del modelo con otros valores, debido a la no disponibilidad de la información.

7. CONCLUSIONES

- Cuando se utiliza el enfoque anidado secuencial para la solución de un problema binivel en el que el nivel superior se resuelve mediante una metaheurística basada en población, es importante utilizar un método de solución eficiente en el nivel inferior, debido a la cantidad de problemas de nivel inferior que deben ser resueltos (por cada solución del nivel superior se debe resolver el de nivel inferior).
- Utilizar el *solver* de alguna herramienta computacional para resolver el nivel inferior, es una buena opción para hacer más eficiente un método de solución de un problema binivel con enfoque anidado. Según el análisis numérico realizado de los problemas binivel tipo académico, GMED logró reducir el tiempo de cálculo con respecto a BIDE en un 89,92% para el ejemplo 1 y en un 89,84% para el ejemplo 2.
- El algoritmo GMED aplicado al CNDP arrojó resultados similares a los obtenidos por otros métodos de solución, y adicionalmente, mostró un mejor desempeño que las metaheurísticas algoritmo genético y recocido simulado en la red de prueba 2, al obtener un mejor valor fitness con menos esfuerzo computacional.
- Del análisis numérico, en general, se concluye que GMED logró desempeñarse bien, al arrojar resultados cercanos a los valores de referencia, y siendo un método de optimización estocástico, la desviación estándar para los problemas resueltos fue igual o cercana a cero, evidenciando con ello su buen rendimiento.
- Con base en los resultados de la aplicación del modelo propuesto, se concluye que las capacidades de los enlaces de la red para la configuración actual del

corredor logístico Bogotá-Yopal, no son las adecuadas para el volumen de demanda de tránsito que circula por los enlaces; por lo que deben ser expandidos. Al comparar el tiempo total en la red para la configuración actual (con las capacidades existentes, es decir, sin realizar ampliación) versus el resultado de una corrida del modelo, se logró reducir este en 3,58%.

- A partir de la literatura, se destaca la importancia de modelar situaciones de la vida real mediante programación binivel, y emplear metaheurísticas para resolver este tipo de problemas dada su complejidad.

8. RECOMENDACIONES

- Adaptar el modelo binivel tipo “green” propuesto, considerando las emisiones atmosféricas en la función objetivo de nivel superior, y no como una restricción de este problema.
- Para futuras investigaciones, es recomendable realizar un análisis de sensibilidad de la variante y/o los parámetros utilizados en el algoritmo GMED, con el fin de encontrar aquellos que proporcionen una mejor solución del problema.
- Emplear otro método para el control de las variables de decisión del vector de prueba, y confrontar los resultados con los arrojados utilizando GMED.
- Explorar otros métodos de manejo de restricciones que reduzcan la carga computacional del algoritmo propuesto y permitan obtener resultados en un menor tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

ABDULAAL, Mustafa y LEBLANC, Larry J. Continuous equilibrium network design models. *Transportation Research Part B* [en línea]. 1979, vol. 13, no.1 [citado en 2015-02-15], p. 19-32. Disponible en ScienceDirect.

ANDI. Boletín Gerencia de Logística, Transporte e Infraestructura [en línea]. 2014. [citado en 2014-05-07]. Disponible en: <<http://www.andi.com.co/glti/BOLETINES%202014/Bolet%C3%ADn%2002-158.%20Niveles%20de%20Servicio%20en%20los%20Corredores%20Viales.pdf>>

ANGELO, Jaqueline S.; KREMPSE, Eduardo; y BARBOSA, Helio. Differential evolution for bilevel programming. En: *Congress on Evolutionary Computation (20-23, junio, 2013: Cancún, México)*. Evolutionary Computation, IEEE. 2013. p. 470-477. ISBN 978-1-4799-0452-5.

APIVATANAGUL, Pruttipong y REGAN, Amelia C. Long haul freight network design using shipper-carrier freight flow prediction: A California network improvement case study. *Transportation Research Part E* [en línea]. 2010, vol. 46, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 507-519. Disponible en ScienceDirect.

BABAZADEH, Abbas; POORZAHEDY, Hossain y NIKOOSOKHAN, Saeid. Application of particle swarm optimization to transportation network design problem. *Journal of King Saud University - Science* [en línea]. 2011, vol. 23, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 293-300. Disponible en ScienceDirect.

BANCO MUNDIAL. DEPARTAMENTO DE FINANZAS, SECTOR PRIVADO E INFRAESTRUCTURA. Infraestructura logística y de calidad para la competitividad de Colombia [en línea]. Ene. 2006. [citado en 2014-10-10]. Disponible en:

<<http://documentos.bancomundial.org/curated/es/2006/01/6998094/infraestructura-logistica-y-de-calidad-para-la-competitividad-de-colombia>>

BARD, Jonathan F. Practical Bilevel Optimization. Algorithms and Applications. [s.l.]: Springer, 1998. 473 p. (Serie Nonconvex Optimization and Its Applications; no. 30). ISBN 978-1-4419-4807-6.

BASKAN, Ozgur. Determining Optimal Link Capacity Expansions in Road Networks Using Cuckoo Search Algorithm with Lévy Flights. Journal of Applied Mathematics [en línea]. 2013 [citado en 2015-02-15], 11 p. Disponible en: <<http://www.hindawi.com/journals/jam/2013/718015/>>

------. Harmony search algorithm for continuous network design problem with link capacity expansions. KSCE Journal of Civil Engineering [en línea]. 2014, vol. 18, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 273-283. Disponible en SpringerLink. ISSN 1976-3808.

BASKAN, O. y DELL'ORCO, M. Artificial bee colony algorithm for continuous network design problem with link capacity expansions. En: International Congress on Advances in Civil Engineering (10: 17-19, octubre, 2012: Ankara, Turkey).

BASKAN, Ozgur y CEYLAN, Huseyin. Modified differential evolution algorithm for the continuous network design problem. Procedia - Social and Behavioral Sciences [en línea]. 2014, vol. 111, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 48-57. Disponible en ScienceDirect.

BBC News. IPCC climate report: humans 'dominant cause' of warming [en línea]. Septiembre de 2013. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <<http://www.bbc.com/news/science-environment-24292615>>

BID. Análisis, estrategia e instrumentos para el mejoramiento de la logística de cargas y el comercio en Mesoamérica. Modelo evaluación de corredores y cadenas logísticas [en línea]. [citado en 2014-05-19]. Disponible en: <http://67.228.126.86/1_INFORMES/1_3_MODELO/1_3_modelo.aspx>

BOWERSOX, Donald J.; CLOSS, David J. y COOPER, M. Bixby. Administración y logística en la cadena de suministros. 2 ed. México: McGraw-Hill, 2007. 409 p. ISBN-13: 978-970-10-6132-9.

CASTELLANOS RAMÍREZ, Andrés. Manual de gestión logística y del transporte y distribución de mercancías. Barranquilla: Ediciones Uninorte, 2009. 260 p. ISBN 978-958-741-001-3.

CASTRO PEÑA, Paula Carolina y ESCOBAR WINSTON, Lina Margarita. Estimación de las emisiones contaminantes por fuentes móviles a nivel nacional y formulación de lineamientos técnicos para el ajuste de las normas de emisión. Trabajo de grado para optar por el Título de Ingenieras Ambientales y Sanitarias. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2006. 121 p.

CENTRO DE TRANSPORTE SOSTENIBLE. El papel del transporte en el Cambio Climático [en línea]. México. 2014. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <<http://finanzascarbono.org/comunidad/pg/file/gabrielaNi%C3%B1o/read/5424/el-papel-del-transporte-en-el-cambio-climatico-cts-mexico>>

CHAKRABORTY, Uday K. Advances in Differential Evolution. [s.l.]: Springer, 2008. 339 p. (Serie Studies in Computational Intelligence; no. 143). ISBN 978-3-540-68827-3.

CHANDRA, S. y SIKDAR, P. K. Factors affecting PCU in mixed traffic situations on urban roads. Citado por SHALINI, Kanakabandi y KUMAR, Brind. Estimation of the Passenger Car Equivalent: A Review. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering [en línea]. 2014, vol. 4, no. 6 [citado en 2015-02-15]. Disponible en: <http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue6/IJETAE_0614_14.pdf>. ISSN 2250-2459.

CHEN, Qun y CHEN, Haibo. Solution algorithm for a new bi-level discrete network design problem. Promet – Traffic&Transportation [en línea]. 2013, vol. 25, no. 6 [citado en 2015-02-15], p. 513-p524. Disponible en: <<http://www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/view/1424/1135>>.

CHEN, Anthony y XU, Xiangdong. Goal programming approach to solving network design problem with multiple objectives and demand uncertainty. Expert Systems with Applications [en línea]. 2012, vol. 39, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 4160-4170. Disponible en ScienceDirect.

CHICANO GARCÍA, José Francisco. Metaheurísticas e Ingeniería del Software. Tesis Doctoral. Málaga: Universidad de Málaga. Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación, 2007. 267 p.

CHILE. MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN. ACTUALIZACIÓN METODOLÓGICA MODEM – MODEC PARA EL GRAN SANTIAGO. Santiago: SECTRA, 2010. 331 p.

CHINCHULUUN, Altannar, PARDALOS, Panos M. y HUANG, Hong-Xuan. Multilevel (Hierarchical) Optimization. Complexity Issues, Optimality Conditions, Algorithms. Advances in Mechanics and Mathematics [en línea]. 2009, vol. 17

[citado en 2014-04-10], p. 197-221. Disponible en SpringerLink. ISBN 978-0-387-75714-8.

CHIOU, Suh-Wen. Bilevel programming for the continuous transport network design problem. *Transportation Research Part B* [en línea]. 2005, vol. 39, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 361-383. Disponible en ScienceDirect.

CHOPRA, Sunil y MEINDL, Peter. *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación*. 3 ed. México: Pearson Educación, 2008. 552 p. ISBN: 978-970-26-1192-9.

CLAUSEN, Uwe; GEIGER, Christiane y BEHMER, Carl. Green corridors by means of ICT applications. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* [en línea]. 2012, vol. 48 [citado en 2014-04-10], p. 1877-1886. Disponible en ScienceDirect.

COLCIENCIAS. Convocatoria para la selección de un proyecto de investigación para la optimización de la cadena logística de transporte de carga en Colombia [en línea]. Bogotá. 21 de diciembre de 2012. [citado en 2014-05-07]. Disponible en: <<http://www.colciencias.gov.co/convocatoria/convocatoria-para-la-selecci-n-de-un-proyecto-de-investigaci-n-para-la-optimizaci-n-de->>

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 769 (6, agosto, 2002). Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial*. Bogotá D.C., 2002. no. 44932. 96 p.

COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. CONPES 3759. LINEAMIENTOS DE POLÍTICA PARA LA MODERNIZACIÓN DEL TRANSPORTE AUTOMOTOR DE CARGA Y DECLARATORIA DE IMPORTANCIA ESTRATÉGICA DEL PROGRAMA DE REPOSICIÓN Y RENOVACIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR DE CARGA [en línea]. 2013. [citado en en 2015-05-07].

Disponible en:
<http://www4.unfccc.int/sites/nama/_layouts/UN/FCCC/NAMA/Download.aspx?ListName=NAMA&Id=82&FileName=CONPES%203759%20Modernizaci%C3%B3n%20Transporte%20Automotor%20de%20Carga.pdf>

COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. CONPES 3547. Política Nacional Logística [en línea]. 2008. [citado en 2014-05-07]. Disponible en: <<http://wsp.presidencia.gov.co/sneci/politica/Documents/Conpes-3547-27oct2008.pdf>>

COLOMBIA. INVIAS, UNIVERSIDAD DEL CAUCA. Manual de capacidad y niveles de servicio para carreteras de dos carriles. Segunda versión. Popayán. 1996.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Decreto 736 (10, abril, 2014). Por el cual se reglamenta la planeación de los proyectos de infraestructura de transporte con la finalidad de asegurar la intermodalidad, multimodalidad, su articulación e integración, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 9 de la Ley 1682 de 2013. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2014. 4 p.

----- . Decreto 1478 (5, agosto, 2014). Por medio del cual se fijan lineamientos para el establecimiento de corredores logísticos de importancia estratégica para el país y para la articulación de los actores que convergen sobre éstos, y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2014. 4 p.

----- . Diagnóstico del sector transporte 2011 [en línea]. 2011. [citado en 2014-05-07]. Disponible en: <<https://www.mintransporte.gov.co/documentos.php?id=15>>

----- . Resolución 164 (5, febrero, 2015). Por medio de la cual se establecen los corredores logísticos de importancia estratégica para el país y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2015. 6 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 4100 (28, diciembre, 2004). Por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2004. 9 p.

------. Tiempos logísticos [en línea]. 2013. [citado en 2015-07-10]. Disponible en: <<https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?id=4040>>

------. Transporte en Cifras - Estadísticas 2013 [en línea]. 2013. [citado en 2015-05-07]. Disponible en: <<https://www.mintransporte.gov.co/documentos.php?id=15>>

DEB, Kalyanmoy. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering [en línea]. 2000, vol. 186, no. 2-4 [citado en 2015-02-15], p. 311–338. Disponible en ScienceDirect.

------. Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 497 p. ISBN 0-471-87339-X.

DEMPE, Stephan. BILEVEL PROGRAMMING - A SURVEY [en línea]. [citado en 2015-05-10]. Disponible en: <http://www.mathe.tu-freiberg.de/~dempe/Artikel/bilevel_survey.pdf>

ESPAÑA. MINISTERIO DE FOMENTO. SUPERGREEN (Supporting EU's logistics Action Plan on Green Corridors) [en línea]. 2014. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <<https://www.puertogijon.es/index.asp?MP=74&MS=413&MN=3&TR=C&IDR=618>>

ESTADOS UNIDOS. DEPARTMENT OF COMMERCE. BUREAU OF PUBLIC ROADS. Traffic assignment manual for application with a large, high speed

computer [en línea]. Washington, U.S. Junio de 1964. Disponible en: <<http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015006424512;view=1up;seq=16>>

FERGUSON, Erin M.; DUTHIE, Jennifer y WALLER, S. Travis. Network methods for project selection based on optimizing environmental impact. Proyecto. Austin, Texas: University of Texas. 2010. 149 p.

FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL. Invertir en el transporte urbano sostenible. La experiencia del FMAM [en línea]. *sine facta*. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <https://www.thegef.org/gef/sites/thegef.org/files/publication/urban-transport-ES_0.pdf>

FORO ECONÓMICO MUNDIAL. The Global Competitiveness Report 2010–2011. Geneva: Professor Klaus Schwab, 2010. ISBN-10: 92-95044-87-8.

----- . The Global Competitiveness Report 2014–2015. Geneva: Professor Klaus Schwab, 2014. ISBN-10: 92-95044-98-3.

GAO, Ziyou, WU, Jianjun y SUN, Huijun. A bi-level programming model and solution algorithm for the location of logistics distribution centers. *Applied Mathematical Modelling* [en línea]. 2008, vol. 32, no. 4 [citado en 2014-04-12], p. 610-616. Disponible en ScienceDirect.

GAO, Ziyou; SUN, Huijun y ZHANG, Haozhi. A globally convergent algorithm for transportation continuous network design problem. *Optimization and Engineering* [en línea]. 2007, vol. 8, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 241-257. Disponible en SpringerLink. ISSN 1573-2924.

GAO, Ziyou; WU, Jianjun y SUN, Huijun. Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. *Transportation Research Part B* [en línea]. 2005, vol. 39, no. 6 [citado en 2015-02-15], p. 479-495. Disponible en ScienceDirect.

GENDREAU, Michel y POTVIN, Jean-Yves. Metaheuristics in Combinatorial Optimization. *Annals of Operations Research* [en línea]. 2005, vol. 140, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 189-213. Disponible en SpringerLink. ISSN 1572-9338.

GÓMEZ APARICIO, Juan Miguel. *Gestión logística y comercial*. España: McGraw-Hill, 2013. 214 p. ISBN 978-84-481-8566-4.

HIZIR, Ahmet Esat. Using emission functions in mathematical programming models for sustainable urban transportation: an application in bilevel optimization. Tesis de Master of Science. Istanbul: Sabancı University. Graduate School of Engineering and Natural Sciences. 2006. 69 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Cambio Climático [en línea]. Actualizado en enero de 2014. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>>

JIA, Peng; KATO, Hirokazu y HAYASHI, Yoshitsugu. Road network optimization model with consideration of dynamic changes in long term evaluation for developing cities. En: Annual Meeting of the Transportation Research Board (88: 15, enero, 2009: Washington).

JOURDAN, L.; BASSEUR, M. y TALBI, E.-G. Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research* [en línea]. 2009, vol. 199, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 620-629. Disponible en ScienceDirect.

KIM, Byung Jong y KIM, Wonkyu. An equilibrium network design model with a social cost function for multimodal networks. *The Annals of Regional Science* [en línea]. 2006, vol. 40, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 473-491. Disponible en SpringerLink. ISSN 1432-0592.

KOH, Andrew. Solving transportation bi-level programs with Differential Evolution. En: *Congress on Evolutionary Computation (25-28, septiembre, 2007: Singapore)*. IEEE. 2007. p. 2243-2250. ISBN 978-1-4244-1340-9.

LEBLANC, L.J. An algorithm for the discrete network design problem. *Transportation Science* [en línea]. 1975, vol. 9, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 183-199. Disponible en JSTOR Journals. ISSN 00411655.

LI, Xiangyong; TIAN, Peng y MIN, Xiaoping. A hierarchical particle swarm optimization for solving bilevel programming problems. *Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2006* [en línea]. 2006, vol. 4029 [citado en 2015-02-15], p. 1169-1178. Disponible en SpringerLink. ISBN 978-3-540-35750-6.

LU, Jie, SHI, Chenggen y ZHANG, Guangquan. On bilevel multi-follower decision making. General framework and solutions. *Information Sciences* [en línea]. 2006, vol. 176, no. 11 [citado en 2014-04-12], p. 1607-1627. Disponible en ScienceDirect.

MARCOTTE, Patrice y MARQUIS, Gérald. Efficient implementation of heuristics for the continuous network design problem. *Annals of Operations Research* [en línea]. 1992, vol. 34, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 163-176. Disponible en SpringerLink. ISSN 1572-9338.

MÁRQUEZ DÍAZ, Luis Gabriel y CANTILLO MAZA, Víctor Manuel. Evaluación de los parámetros de las funciones de costo en la red estratégica de transporte de

carga para Colombia. Revista Científica Ingeniería y Desarrollo [en línea]. 2011, vol. 29, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 286-307. Disponible en: <<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/3624/2336>>.

ISSN 0122-3461

MATHEW, Tom V. y SHARMA, Sushant. Capacity Expansion Problem for Large Urban Transportation Networks. Journal of Transportation Engineering [en línea]. 2009, vol. 135, no. 7 [citado en 2015-02-15], p. 406-415. ISSN 0733-947. Disponible en ASCE.

----- . Continuous network design with emission pricing as a bi-level optimization problem. Applications of Advanced Technology in Transportation [en línea]. 2006 [citado en 2015-02-15], p. 804-809. Disponible en Scopus. ISBN 0784407991.

MEDIO AMBIENTE, ENERGÍA Y TRANSPORTE. [en línea]. 2003. [citado en 2014-05-24]. Disponible en: <http://www.eu-portal.net/material/downloadarea/kt5_wm_es.pdf>

MENG, Q.; YANG, H. y BELL, M.G.H. An equivalent continuously differentiable model and a locally convergent algorithm for the continuous network design problem. Transportation Research Part B [en línea]. 2001, vol. 35, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 83-105. Disponible en ScienceDirect.

MORILLO, Daniel; MORENO, Luis y DÍAZ, Javier. Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 1. Ingeniería y Ciencia [en línea]. 2014, vol. 10, no. 19 [citado 05 febrero 2015], p. 247-271. Disponible en: <<http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v10n19/v10n19a13.pdf>>. ISSN 1794-9165.

NOCERA, Silvio y CAVALLARO, Federico. Policy Effectiveness for containing CO2 Emissions in Transportation. *Procedia Social and Behavioral Sciences* [en línea]. 2011, vol. 20 [citado en 2014-04-13], p. 703-713. Disponible en ScienceDirect.

POORZAHEDY, Hossain y ABULGHASEMI, Farhad. Application of Ant System to network design problem. *Transportation* [en línea]. 2005, vol. 32, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 251-273. Disponible en SpringerLink. ISSN 1572-9435.

POORZAHEDY, Hossain y ROUHANI, Omid M. Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. *European Journal of Operational Research* [en línea]. 2007, vol. 182, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 578–596. Disponible en ScienceDirect.

PRICE, Kenneth; STORN, Rainer M. y LAMPINEN, Jouni A. *Differential Evolution. A Practical Approach to Global Optimization*. [s.l.]: Springer, 2005. 539 p. (Serie Natural Computing Series). ISBN 978-3-540-31306-9.

PRIEMUS, Hugo y ZONNEVELD, Wil. What are corridors and what are the issues? Introduction to special issue: the governance of corridors. *Journal of Transport Geography* [en línea]. 2003, vol. 11, no. 3 [citado en 2014-10-10], p. 167-177. Disponible en ScienceDirect.

PSARAFTIS, Harilaos N. y PANAGAKOS, George. Green Corridors in European surface freight logistics and the SuperGreen Project. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* [en línea]. 2012, vol. 48. [citado en 2014-04-10], p. 1723-1732. Disponible en ScienceDirect.

QIU, Yuzhuo y CHEN, Senfa. Bi-level Programming for Continuous Network Design of Comprehensive Transportation System Based on External Optimization. En: *International Conference on Grey Systems and Intelligent Services* (18-20,

noviembre, 2007: Nanjing, China). IEEE. 2007. p. 1186-1190. ISBN 978-1-4244-1294-5.

RODRIGUE, Jean-Paul; COMTOIS, Claude y SLACK, Brian. The geography of transport systems. Citado por REGMI, Madan B. y HANAOKA, Shinya. Assessment of intermodal transport corridors: Cases from North-East and Central Asia. *Research in Transportation Business & Management* [en línea]. 2012, vol. 5 [citado en 2014-10-10], p. 27-37. Disponible en ScienceDirect.

RUSS, Bona Frazila, *et al.* OPTIMISING THE DESIGN OF MULTIMODAL FREIGHT TRANSPORT NETWORK IN INDONESIA. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* [en línea]. 2005, vol. 6 [citado en 2015-02-15], p. 2894-2907. Disponible en J-STAGE.

SHARMA, Sushant y MATHEW, Tom V. Multiobjective network design for emission and travel-time trade-off for a sustainable large urban transportation network. *Environment and Planning B: Planning and Design* [en línea]. 2011, vol. 38, no. 3 [citado en 2015-02-15], p. 520-538. Disponible en Scopus. ISSN 02658135.

SHEFFI, Yosef. *Urban Transportation Networks. Equilibrium Analysis With Mathematical Programming Methods*. Nueva Jersey: Prentice-Hall, 1985. 399 p. ISBN 0-13-939729-9.

STORN, Rainer y PRICE, Kenneth. Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. *International Computer Science Institute* [en línea]. 1995. [citado en 2015-02-15]. Disponible en: <<http://www.icsi.berkeley.edu/ftp/pub/techreports/1995/tr-95-012.pdf>>

----- . Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization* [en línea].

1997, vol. 11, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 341-359. Disponible en SpringerLink. ISSN 1573-2916.

SUH, Sunduck y KIM, Tschangho John. Solving nonlinear bilevel programming models of the equilibrium network design problem: A comparative review. *Annals of Operations Research* [en línea]. 1992, vol. 34, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 203-218. Disponible en SpringerLink. ISSN 1572-9338.

SUWANSIRIKUL, Chaisak; FRIESZ, Terry L. y TOBIN, Roger L. Equilibrium Decomposed Optimization: A Heuristic for the Continuous Equilibrium Network Design Problem. *Transportation Science* [en línea]. 1987, vol. 21, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 254-263. Disponible en JSTOR Journals. ISSN 0041-1655.

SZETO, W. Y.; WANG, Yi y WONG, S. C. The Chemical Reaction Optimization Approach to Solving the Environmentally Sustainable Network Design Problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* [en línea]. 2014, vol. 29, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 140-158. Disponible en Scopus. ISSN 10939687.

TALBI, El-Ghazali. *Metaheuristics for Bi-level Optimization*. [s.l.]: Springer, 2013. 288 p. (Serie *Studies in Computational Intelligence*; no. 482). ISBN 978-3-642-37838-6.

------. *Metaheuristics. From Design to Implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 593 p. ISBN 978-0-470-27858-1.

TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE y TEXAS A&M UNIVERSITY SYSTEM, COLLEGE STATION, TEXAS. *Sustentabilidad de los corredores de transporte de carga en América del Norte* [en línea]. 2010. [citado en 2014-04-13]. Disponible en: <<http://www3.cec.org/islandora/es/item/4093-greening-north-american-transportation-corridors-es.pdf>>

UNIVERSITY COLLEGE LONDON – UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Marco Teórico de contaminación atmosférica en Colombia [en línea]. 2013. [citado en 2015-02-15]. Disponible en: <<https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Caracterizaci%C3%B3n-de-la-contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9rica-en-Colombia1.pdf>>

VICENTE, Luís N. y CALAMAI, Paul H. Bilevel and Multilevel Programming: A Bibliography Review. *Journal of Global Optimization* [en línea]. 1994, vol. 5, no. 3 [citado en 2014-10-14], p. 291-306. Disponible en SpringerLink. ISSN 1573-2916.

VIDAL ESMORÍS, Aitana. Algoritmos heurísticos en optimización. Tesis Máster en Técnicas Estadísticas. Santiago de Compostela, España: Universidad de Santiago de Compostela. Facultad de Matemáticas, 2013. 94 p.

WANG, David Z.W. y LO, Hong K. Global optimum of the linearized network design problem with equilibrium flows. *Transportation Research Part B* [en línea]. 2010, vol. 44, no. 4 [citado en 2015-02-15], p. 482–492. Disponible en ScienceDirect.

WANG, Shuaian; MENG, Qiang y YANG, Hai. Global optimization methods for the discrete network design problem. *Transportation Research Part B* [en línea]. 2013, vol. 50, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 42-60. Disponible en ScienceDirect.

WANG, Guangmin, *et al.* Models and a relaxation algorithm for continuous network design problem with tradable credits scheme and equity constraints. *Computers & Operations Research* [en línea]. 2014, vol. 42, no. 1 [citado en 2015-02-15], p. 252-261. Disponible en ScienceDirect.

XU, Tianze; WEI, Heng y HU, Guanghua. Study on continuous network design problem using simulated annealing and genetic algorithm. *Expert Systems with*

Applications [en línea]. 2009, vol. 36, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 1322–1328. Disponible en ScienceDirect.

YAMADA, Tadashi, *et al.* Designing Multimodal Freight Transport Networks: A Heuristic Approach and Applications. Transportation Science [en línea]. 2009, vol. 43, no. 2 [citado en 2015-02-15], p. 129-143. Disponible en INFORMS. ISSN 00411655.

ZHU, Xiaobo; YU, Qian y WANG, Xianjia. A hybrid differential evolution algorithm for solving nonlinear bilevel programming with linear constraints. En: International Conference on Cognitive Informatics (5: 17-19, julio, 2006: Beijing). IEEE. 2006. p. 126-131. ISBN 1-4244-0475-4.

ANEXOS

Anexo A. Descripción del proyecto de investigación raíz

“ESTUDIO DEL SISTEMA LOGÍSTICO DE CARGA EN LOS PRINCIPALES CORREDORES DE COLOMBIA E-TRANSCOL”

JUSTIFICACIÓN

Para responder a los retos de internalización y competitividad, es urgente para el país desarrollar estrategias que permitan alcanzar un servicio de transporte de carga sostenible, eficiente y a bajos costos.

Las alternativas propuestas impactarán positivamente a todas las empresas y sectores de la economía colombiana, ya que por medio de un transporte más eficiente es posible disminuir los fletes de transporte y reducir directamente los costos logísticos de los productos que se consumen y/o producen en el país.

Este proyecto permite a la comunidad científica ampliar el conocimiento teórico sobre la temática de transporte de carga desde la formulación de políticas nacionales a partir de la experiencia práctica que se obtiene en su realización.

OBJETIVO GENERAL

Proponer bases técnicamente soportadas para la formulación de políticas públicas y estrategias público-privadas tendientes a facilitar el desarrollo del sistema logístico de carga en los principales corredores de Colombia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los principales centros de oferta y demanda de carga, los corredores logísticos relacionados, de acuerdo a su cobertura, volumen, impacto, cadenas productivas, los actores involucrados, su poder y capacidad de negociación, así como los flujos de la operación logística actual
- Determinar las variables endógenas y exógenas que intervienen y condicionan el desempeño de la logística de carga en los principales nodos de oferta y demanda, así como en los corredores logísticos identificados.
- Caracterizar la operación logística de carga del país, considerando las dimensiones estructurales de las redes de abasto, almacenamiento y distribución, la infraestructura de operación (vías, plataformas, nodos), de comunicaciones y de información que soportan estos procesos, así como sus modos y medios.
- Diseñar un modelo prototipo de corredor logístico que permita formular estrategias y arreglos institucionales, a partir del cual se puedan identificar los cambios necesarios que permitan mejorar el desempeño logístico del sector transportador de carga, con base en escenarios futuros deseados y no deseados en los principales corredores del país.
- Verificar la consistencia y robustez estructural del modelo de corredor logístico propuesto, en uno de los corredores representativos de los identificados en el país y una cadena productiva del mismo, mediante técnicas de modelado por simulación que permitan el análisis multicriterio de las decisiones.
- Definir los criterios sobre las líneas base de información para la toma de decisiones en materia de logística, identificando indicadores, sistemas de información soporte, infraestructura tecnológica y organizacional.

- Desarrollar una propuesta metodológica de intervención del sistema logístico de carga en Colombia, en el corredor y la cadena logística seleccionada, determinando los elementos requeridos que permitan enfrentar de manera exitosa los escenarios futuros en este sector, soportando las decisiones de inversión correspondientes.
- Proponer un modelo de monitoreo que permita la recolección y el seguimiento efectivo del comportamiento del sistema logístico de carga en Colombia.

METODOLOGÍA

Fase I. Estudio bibliográfico y de mejores prácticas en el transporte de carga.

Fase II. Caracterización del sistema de transporte de carga en los principales corredores del país.

Fase III. Propuesta de corredor tipo.

Fase IV. Selección del corredor de estudio y la cadena productiva representativa.

Fase V. Prueba piloto.

Fase VI. Formulación de estrategias.

Fase VII. Diseño del modelo de monitoreo.

Fase VIII. Elaboración de la propuesta metodológica de intervención.

Fase IX. Divulgación de resultados y entrega de informes.

RESULTADOS ESPERADOS

DEBE SER:

- Estado del arte logística-transporte de carga nacional e internacional.
- Identificación de parámetros que determinan la eficiencia logística para el transporte de carga internacional.
- Establecimiento del corredor tipo para el transporte de carga a nivel nacional e internacional asociado a una cadena productiva.

DIAGNÓSTICO:

- Determinación de los elementos que afectan el desempeño logístico actual del sector transportador de carga en los principales corredores el país.
- Determinación de los retos actuales y futuros en materia de transporte y logística que enfrenta el sector.
- Propuesta de soluciones para cada uno de los retos identificados.
- Identificación de los elementos determinantes y los principales retos que debe enfrentar cada uno de los actores para lograr vencer los elementos que afectan el desempeño logístico y que permitan alcanzar los escenarios deseados.

PROSPECTIVA:

- Posibles sinergias que se puedan dar en el país para vencer los retos y lograr los escenarios deseados.
- Definir los escenarios futuros deseados para el sector transportador
- Definir los actores públicos y privados, nacionales y extranjeros, que deben participar para alcanzar los escenarios futuros deseados para el sector transportador de carga en los principales corredores del país.
- Propuesta metodológica de intervención para lograr los escenarios deseados en los principales corredores de transporte de carga del país.

IMPACTOS ESPERADOS

Permitirá realizar políticas y propuestas más precisas con respecto a las necesidades del sector a causa del real conocimiento de la situación actual del sector transportador de carga de Colombia.

Acercar al país a los niveles de competitividad de clase mundial, lo cual es beneficioso no sólo para las empresas, sino para todo el país.

Reducción de la contaminación (Gases, fluidos, ruido y contaminación visual) mediante la propuesta de lineamientos normativas técnico-legales que velen por ésta reducción

Políticas relacionadas con la infraestructura que conlleven al diseño de vías más seguras, ajustadas a los estándares de calidad a nivel internacional, permitirá mejorar la seguridad (accidentes), que afectan no sólo a las empresas, sino, también a la comunidad en general.

Anexo B. Código de programación método BIDE – Ejemplo 1

ALGORITMO BIDE (MATLAB)

```
%EJEMPLO 1 - BIDE
%%
%NPS=Número total de individuos en la población del nivel superior
%FS=Factor de mutación del nivel superior
%CRS=Tasa de cruce del nivel superior
%GmaxS=Número máximo de generaciones del nivel superior
%%

function [ZminSupBIDE,popBestSup,XminInfBIDE,xBIDE]=
AlgoritmoBIDE_E1(NPS,FS,CRS,GmaxS)

lowS=[0];
uppS=[15];
f1 = inline ('z(1).^2 + (x(1)-10).^2','z','x');
g1=inline('-z(1)+x(1)','z','x');

f2=inline('(z(1)+ 2*x(1)-30).^2','z','x');

DS=length(lowS); %Número total de variables de decisión
(dimensiones) del nivel superior
popSup=zeros(NPS,DS); %Población del nivel superior
newPopSup=zeros(NPS,DS); %Nueva población del nivel superior
popBestSup=zeros(1,DS); %Mejor individuo de la población de nivel
superior
evalSup=zeros(1,NPS); %Valor fitness de nivel superior
trialSup=zeros(1,DS); %Vector de prueba de nivel superior
xviejo=zeros(NPS,DS); %Soluciones de nivel inferior
xBIDE=zeros(1,DS); %Mejor solución de nivel inferior
ZminSup_BIDE=zeros(1,[]); %Mínimo valor fitness de nivel superior de
cada generación

evalFactSup=zeros([],DS); %Valor fitness de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecFactSup=zeros([],DS); %Población de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecInfactSup=zeros([],DS); %Población de vectores objetivo
(individuos) infactibles de nivel superior

R1=zeros(1,NPS); %Evaluación de la restricción de nivel
superior

%-----Inicialización-----%
```

```

% Generación aleatoria de la población inicial de nivel superior

for i=1:NPS
    for j=1:DS
        popSup(i,j)=lowS(j)+rand*(uppS(j)-lowS(j));
    end
end

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i=1:NPS
    varSup=popSup(i,:);
    [XminInf x] = AlgoritmoEDInf_E1(30,0.7,0.9,30,varSup);
    xviejo(i,:)=x;

    R1=feval(g1,varSup,xviejo(i,:));

    if (R1<=0) % Factible
        popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
    else
        popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

if length(popVecFactSup)==0;
    vmaxFactSup=0;
else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup(1)=feval(f1,popVecFactSup(ibestFactSup,:),xviejo(ibestFactSup,
,:));

    if (popVecFactSup(ibestFactSup,:)==popSup(ibestFactSup,:));
        vmaxFactSup=evalFactSup(1);
    else
        vmaxFactSup=0;
    end

    for i=2:m
        evalFactSup(i)=feval(f1,popVecFactSup(i,:),xviejo(i,:));

        if ((evalFactSup(i)>vmaxFactSup) &
(popVecFactSup(i,:)==popSup(i,:)));
            vmaxFactSup=evalFactSup(i);
            ibestFactSup=i;
        end
    end
end

% Operador de selección (torneo)

```

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución infactible (INF).
 %2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor valor fitness.
 %3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor violación de restricción.

```
ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);
```

```
Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
```

```
if(Rlbest<=0); % Si F
    evalSup(ibestSup)=feval(f1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
else
    evalSup(ibestSup)=vmaxFactSup + (abs(Rlbest));
end
```

```
ZminSupBIDE=evalSup(ibestSup);
```

```
for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);
```

```
    Rl=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
```

```
    if (Rl<=0 & Rlbest>=0); % Si F-INF
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        ZminSupBIDE=evalSup(i);
        ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
```

```
    elseif (Rl<=0 & Rlbest<=0); % Si F-F
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        if evalSup(i)<ZminSupBIDE;
            ZminSupBIDE=evalSup(i);
            ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end
```

```
    elseif (Rl>=0 & Rlbest>=0); % Si INF-INF
        evalSup(i)=vmaxFactSup + (abs(Rl));
        if ((abs(Rl))<(abs(Rlbest)));
            ZminSupBIDE=evalSup(i);
            ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
popBestSup=popSup(ibestSup,:);
```

```
xBIDE=xviejo(ibestSup,:);
```

```
XminInfBIDE=feval(f2,popSup(ibestSup,:),xBIDE);
```

```

%-----Bucle mutación/cruce/selección-----%

Gsup=1

while (Gsup<GmaxS)

for i=1:NPS

% Selección aleatoria de tres vectores de la población

while 1
v1=floor(rand*NPS)+1;
if v1~=i;
break;
end
end

while 2
v2=floor(rand*NPS)+1;
if v2~=i & v2~=v1;
break;
end
end

while 3
v3=floor(rand*NPS)+1;
if v3~=i & v3~=v2 & v3~=v1;
break;
end
end

% Creación del vector de prueba

jrand=floor(rand*DS)+1;

for j=1:DS

r=rand;
if r <= CRS | j==jrand;
trialSup(j)=popSup(i,j)+FS.*(popSup(v1,j)-
popSup(i,j))+FS.*(popSup(v2,j)-popSup(v3,j)); % ED/target-to-rand/1/bin
else
trialSup(j)=popSup(i,j);
end
end

for j=1:DS
if trialSup(j)>=uppS(j);
trialSup(j)=uppS(j);
elseif trialSup(j)<=lowS(j);
trialSup(j)=lowS(j);
else

```

```

        trialSup(j)=trialSup(j);
    end
end

varSup=trialSup;
[XminInf x]=AlgoritmoEDInf_E1(30,0.7,0.9,30,varSup);           %Nuevo x

% Selección del mejor vector (objetivo o trial)

R1=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
R1trial=feval(g1,trialSup,x);

if (R1trial<=0 & R1>=0); % Si F-INF
    evalTrialSup=feval(f1,trialSup,x);
    newPopSup(i,:)=trialSup;
    evalSup(i)=evalTrialSup;

elseif (R1trial<=0 & R1<=0); % Si F-F
    evalTrialSup=feval(f1,trialSup,x);
    if evalTrialSup<=evalSup(i);
        newPopSup(i,:)=trialSup;
        evalSup(i)=evalTrialSup;
    else
        newPopSup(i,:)=popSup(i,:);
    end

elseif (R1trial>=0 & R1<=0); % Si INF-F
    newPopSup(i,:)=popSup(i,:);

elseif (R1trial>=0 & R1>=0); % Si INF-INF
    evalTrialSup=vmaxFactSup + (abs(R1trial));
    if ((abs(R1trial))<(abs(R1)));
        newPopSup(i,:)=trialSup;
        evalSup(i)=evalTrialSup;
    else
        newPopSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

end

ZminSup_BIDE(1,Gsup)=ZminSupBIDE;

%-----Nueva generación-----%

evalFactSup=zeros([],DS);
popVecFactSup=zeros([],DS);
popVecInfactSup=zeros([],DS);

popSup(:,:)=newPopSup(:,:);
Gsup=Gsup+1

```

```

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i=1:NPS
    varSup=popSup(i,:);
    [XminInf x] = AlgoritmoEDInf_E1(30,0.7,0.9,30,varSup);
    xviejo(i,:)=x;

    R1=feval(g1,varSup,xviejo(i,:));

    if (R1<=0) % Factible
        popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
    else
        popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

if length(popVecFactSup)==0;
    vmaxFactSup=0;
else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup(1)=feval(f1,popVecFactSup(ibestFactSup,:),xviejo(ibestFactSup,
:));

    if (popVecFactSup(ibestFactSup,:)==popSup(ibestFactSup,:));
        vmaxFactSup=evalFactSup(1);
    else
        vmaxFactSup=0;
    end

    for i=2:m
        evalFactSup(i)=feval(f1,popVecFactSup(i,:),xviejo(i,:));

        if ((evalFactSup(i)>vmaxFactSup) &
(popVecFactSup(i,:)==popSup(i,:)));
            vmaxFactSup=evalFactSup(i);
            ibestFactSup=i;
        end
    end
end

% Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

```

```

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

if(Rlbest<=0); % Si F
    evalSup(ibestSup)=feval(f1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
else
    evalSup(ibestSup)=vmaxFactSup + (abs(Rlbest));
end

ZminSupBIDE=evalSup(ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);

    Rl=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

    if (Rl<=0 & Rlbest>=0); % Si F-INF
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        ZminSupBIDE=evalSup(i);
        ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

    elseif (Rl<=0 & Rlbest<=0); % Si F-F
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        if evalSup(i)<ZminSupBIDE;
            ZminSupBIDE=evalSup(i);
            ibestSup=i;
            Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end

    elseif (Rl>=0 & Rlbest>=0); % Si INF-INF
        evalSup(i)=vmaxFactSup + (abs(Rl));
        if ((abs(Rl))<(abs(Rlbest)));
            ZminSupBIDE=evalSup(i);
            ibestSup=i;
            Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end
    end
end

popBestSup=popSup(ibestSup,:);
xBIDE=xviejo(ibestSup,:);
XminInfBIDE=feval(f2,popSup(ibestSup,:),xBIDE);

ZminSup_BIDE(1,Gsup)=ZminSupBIDE;

end

%Gráfica de ZminSupBIDE versus Generación
Gsup=[1:GmaxS];

```

```

plot(Gsup,ZminSup_BIDE,'--
g','linewidth',2,'marker','o','markersize',8,'markerfacecolor','g','marke
redgcolor','b')
grid on
title('ZminSupBIDE versus Generación','fontsize',12,'color','b')
xlabel('Generación','fontsize',10,'color','b')
ylabel('ZminSupBIDE','fontsize',10,'color','b')

```

PROBLEMA DE NIVEL INFERIOR (MATLAB)

```

%-----Algoritmo ED Nivel inferior-----%
%%
%NPI=Número total de individuos en la población del nivel inferior
%FI=Factor de mutación del nivel inferior
%CRI=Tasa de cruce del nivel inferior
%GmaxI=Número máximo de generaciones del nivel inferior
%%

function [XminInf,popBestInf] =
AlgoritmoEDInf_E1(NPI,FI,CRI,GmaxI,varSup)

lowI=[0];
uppI=[20];
f2=inline(' (z(1)+2*x(1)-30).^2','z','x');
g2=inline('z(1)+x(1)-20','z','x');

DI=length(lowI);           %Número total de variables de decisión
                             (dimensiones) del nivel inferior
popInf=zeros(NPI,DI);      %Población del nivel inferior
newPopInf=zeros(NPI,DI);   %Nueva población del nivel inferior
popBestInf=zeros(1,DI);    %Mejor individuo de la población de nivel
inferior
evalInf=zeros(1,NPI);      %Valor fitness de nivel inferior
trialInf=zeros(1,DI);      %Vector de prueba de nivel inferior

evalFactInf=zeros([],DI);  %Valor fitness de vectores objetivo
                             (individuos) factibles de nivel inferior
popVecFactInf=zeros([],DI); %Población de vectores objetivo
                             (individuos) factibles de nivel inferior
popVecInfactInf=zeros([],DI); %Población de vectores objetivo
                             (individuos) infactibles de nivel inferior

R2=zeros(1,NPI);           %Evaluación de la restricción de nivel
inferior

%-----Inicialización-----%

```

```

% Generación aleatoria de la población inicial de nivel inferior

for i=1:NPI
    for j=1:DI
        popInf(i,j)=lowI(j)+rand*(uppI(j)-lowI(j));
    end
end

% Cálculo del valor máximo factible de nivel inferior (vmaxFactInf)

for i=1:NPI

    R2=feval(g2,varSup,popInf(i,:));

    if (R2<=0); % Factible
        popVecFactInf(i,:)=popInf(i,:);
    else
        popVecInfactInf(i,:)=popInf(i,:);
    end
end

[m,n] = size(popVecFactInf);

if length(popVecFactInf)==0;
    vmaxFactInf=0;
else
    ibestFactInf=1;
    evalFactInf(1)=feval(f2,varSup,popVecFactInf(ibestFactInf,:));

    if (popVecFactInf(ibestFactInf,:)==popInf(ibestFactInf,:));
        vmaxFactInf=evalFactInf(1);
    else
        vmaxFactInf=0;
    end

    for i=2:m;
        evalFactInf(i)=feval(f2,varSup,popVecFactInf(i,:));

        if ((evalFactInf(i)>vmaxFactInf) &
(popVecFactInf(i,:)==popInf(i,:)));
            vmaxFactInf=evalFactInf(i);
            ibestFactInf=i;
        end
    end
end

% Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.

```

%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor violación de restricción.

```
ibestInf=1; % Inicie con el primer miembro de la población
```

```
R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
```

```
if (R2best<=0); % Si F
    evalInf(1)=feval(f2,varSup,popInf(ibestInf,:));
else
    evalInf(1)=vmaxFactInf + (abs(R2best));
end
```

```
XminInf=evalInf(ibestInf);
```

```
for i=2:NPI; % Compruebe los miembros restantes
```

```
    R2=feval(g2,varSup,popInf(i,:));
```

```
    if (R2<=0 & R2best>=0); % Si F-INF
        evalInf(i)= feval(f2,varSup,popInf(i,:));
        XminInf=evalInf(i);
        ibestInf=i;
        R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
```

```
    elseif (R2<=0 & R2best<=0); % Si F-F
        evalInf(i)=feval(f2,varSup,popInf(i,:));
        if evalInf(i)<XminInf;
            XminInf=evalInf(i);
            ibestInf=i;
        R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
    end
```

```
    elseif (R2>=0 & R2best>=0); % Si INF-INF
        evalInf(i)=vmaxFactInf + (abs(R2));
        if (abs(R2))<(abs(R2best));
            XminInf=evalInf(i);
            ibestInf=i;
        R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
    end
```

```
end
end
```

```
popBestInf=popInf(ibestInf,:);
```

```
%-----Bucle mutación/cruce/selección-----%
```

```
Ginf=0;
```

```
while (Ginf<GmaxI);
```

```

for i=1:NPI;

% Selección aleatoria de tres vectores de la población

while 1
    v1=floor(rand*NPI)+1;
    if v1~=i;
        break;
    end
end

while 2
    v2=floor(rand*NPI)+1;
    if v2~=i & v2~=v1;
        break;
    end
end

while 3
    v3=floor(rand*NPI)+1;
    if v3~=i & v3~=v2 & v3~=v1;
        break;
    end
end

% Creación del vector de prueba

jrand=floor(rand*DI)+1;

for j=1:DI

r=rand;
    if r <= CRI | j==jrand;
        trialInf(j)=popInf(i,j)+FI.*(popInf(v1,j)-
popInf(i,j))+FI.*(popInf(v2,j)-popInf(v3,j)); % ED/target-to-rand/1/bin
    else
        trialInf(j)=popInf(i,j);
    end
end

for j=1:DI
    if trialInf(j)>=uppI(j);
        trialInf(j)=uppI(j);
    elseif trialInf(j)<=lowI(j);
        trialInf(j)=lowI(j);
    else
        trialInf(j)=trialInf(j);
    end
end

% Selección del mejor vector (objetivo o trial)

```

```

R2=feval (g2,varSup,popInf (i,:));
R2trial=feval (g2,varSup,trialInf);

if (R2trial<=0 & R2>=0); % Si F-INF
    evalTrialInf=feval (f2,varSup,trialInf);
    newPopInf (i,:)=trialInf;
    evalInf (i)=evalTrialInf;

elseif (R2trial<=0 & R2<=0); % Si F-F
    evalTrialInf= feval (f2,varSup,trialInf);
    if evalTrialInf<=evalInf (i);
        newPopInf (i,:)=trialInf;
        evalInf (i)=evalTrialInf;
    else
        newPopInf (i,:)=popInf (i,:);
    end

elseif (R2trial>=0 & R2<=0); % Si INF-F
    newPopInf (i,:)=popInf (i,:);

elseif (R2trial>=0 & R2>=0); % Si INF-INF
    evalTrialInf=vmaxFactInf + (abs (R2trial));
    if ((abs (R2trial))<(abs (R2)));
        newPopInf (i,:)=trialInf;
        evalInf (i)=evalTrialInf;
    else
        newPopInf (i,:)=popInf (i,:);
    end
end
end

end

%-----Nueva generación-----%

evalFactInf=zeros ([],DI);
popVecFactInf=zeros ([],DI);
popVecInfactInf=zeros ([],DI);

popInf (:, :)=newPopInf (:, :);
Ginf=Ginf+1;

% Cálculo del valor máximo factible de nivel inferior (vmaxFactInf)

for i=1:NPI

    R2=feval (g2,varSup,popInf (i,:));

    if (R2<=0); % Factible
        popVecFactInf (i,:)=popInf (i,:);
    else
        popVecInfactInf (i,:)=popInf (i,:);

```

```

        end
    end

    [m,n] = size(popVecFactInf);

    if length(popVecFactInf)==0;
        vmaxFactInf=0;
    else
        ibestFactInf=1;
        evalFactInf(1)=feval(f2,varSup,popVecFactInf(ibestFactInf,:));

        if (popVecFactInf(ibestFactInf,:)==popInf(ibestFactInf,:));
            vmaxFactInf=evalFactInf(1);
        else
            vmaxFactInf=0;
        end

        for i=2:m;
            evalFactInf(i)=feval(f2,varSup,popVecFactInf(i,:));

            if ((evalFactInf(i)>vmaxFactInf) &
                (popVecFactInf(i,:)==popInf(i,:)));
                vmaxFactInf=evalFactInf(i);
                ibestFactInf=i;
            end
        end
    end

    % Operador de selección (torneo)

    %1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
    infactible (INF).
    %2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
    valor fitness.
    %3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor
    violación de restricción.

    ibestInf=1; % Inicie con el primer miembro de la población

    R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));

    if (R2best<=0); % Si F
        evalInf(1)=feval(f2,varSup,popInf(ibestInf,:));
    else
        evalInf(1)=vmaxFactInf + (abs(R2best));
    end

    XminInf=evalInf(ibestInf);

    for i=2:NPI; % Compruebe los miembros restantes

        R2=feval(g2,varSup,popInf(i,:));

```

```

if (R2<=0 & R2best>=0); % Si F-INF
    evalInf(i)= feval(f2,varSup,popInf(i,:));
    XminInf=evalInf(i);
    ibestInf=i;
    R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));

elseif (R2<=0 & R2best<=0); % Si F-F
    evalInf(i)=feval(f2,varSup,popInf(i,:));
    if evalInf(i)<XminInf;
        XminInf=evalInf(i);
        ibestInf=i;
    R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
    end

elseif (R2>=0 & R2best>=0); % Si INF-INF
    evalInf(i)=vmaxFactInf + (abs(R2));
    if (abs(R2))<(abs(R2best));
        XminInf=evalInf(i);
        ibestInf=i;
    R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
    end
end
end
end

popBestInf=popInf(ibestInf,:);

end

```

En la ventana de comandos:

```

clc
clear all
tic
NPS=30;
FS=0.7;
CRS=0.9;
GmaxS=30;
[ZminSupBIDE z XminInfBIDE xBIDE]= AlgoritmoBIDE_E1(NPS,FS,CRS,GmaxS)
toc

```

Anexo C. Código de programación método GMED – Ejemplo 1

ALGORITMO GMED (MATLAB)

```
%EJEMPLO 1 - GMED
%%
%NPS=Número total de individuos en la población del nivel superior
%FS=Factor de mutación del nivel superior
%CRS=Tasa de cruce del nivel superior
%GmaxS=Número máximo de generaciones del nivel superior
%%

function [ZminSupGMED,popBestSup,XminInfGMED,xGMED]=
AlgoritmoGMED_E1(NPS,FS,CRS,GmaxS)

lowS=[0];
uppS=[15];
f1=inline(' z(1).^2 + (x(1)-10).^2','z','x');
g1=inline(' - z(1) + x(1)','z','x');

f2=inline('( z(1)+2.*z(1)-30).^2','z','x');

DS=length(lowS);           %Número total de variables de decisión
                             (dimensiones) del nivel superior
popSup=zeros(NPS,DS);      %Población del nivel superior
newPopSup=zeros(NPS,DS);  %Nueva población del nivel superior
popBestSup=zeros(1,DS);   %Mejor individuo de la población de nivel
superior
evalSup=zeros(1,NPS);      %Valor fitness de nivel superior
trialSup=zeros(1,DS);     %Vector de prueba de nivel superior
xviejo=zeros(NPS,DS);     %Soluciones de nivel inferior
xGMED=zeros(1,DS);        %Mejor solución de nivel inferior
ZminSup_GMED=zeros(1,[]); %Mínimo valor fitness de nivel superior de
cada generación

evalFactSup=zeros([],DS);  %Valor fitness de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecFactSup=zeros([],DS); %Población de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecInfactSup=zeros([],DS); %Población de vectores objetivo
(individuos) infactibles de nivel superior

R1=zeros(1,NPS);          %Evaluación de la restricción de nivel
superior

%-----Inicialización-----%
```

```

% Generación aleatoria de la población inicial de nivel superior

for i=1:NPS
    for j=1:DS
        popSup(i,j)=lowS(j)+rand*(upps(j)-lowS(j));
    end
end

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i=1:NPS

    %Escribir GDX

    varSup.name='z';
    varSup.val=popSup(i,:);
    varSup.form='full';
    varSup.type='parameter';

    wgdxd('varSup_E1.gdx',varSup);

    %Leer GDX

    x=gams('E1_InfGMED.gms');
    x=x.val;

    if isempty(x)
        xviejo(i,:)=0;
    else
        xviejo(i,:)=x;
    end

    R1=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

    if (R1<=0) % Factible
        popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
    else
        popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

if length(popVecFactSup)==0
    vmaxFactSup=0;
else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup(1)=feval(f1,popVecFactSup(ibestFactSup,:),xviejo(ibestFactSup,
:));
    if (popVecFactSup(ibestFactSup,:)==popSup(ibestFactSup,:))
        vmaxFactSup=evalFactSup(1);
    end
end

```

```

else
    vmaxFactSup=0;
end

for i=2:m
    evalFactSup(i)=feval(f1,popVecFactSup(i,:),xviejo(i,:));
    if
((evalFactSup(i)>vmaxFactSup) & (popVecFactSup(i,)==popSup(i,:)))
        vmaxFactSup=evalFactSup(i);
        ibestFactSup=i;
    end
end

end

% Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

if(Rlbest<=0) % Si F
    evalSup(1)=feval(f1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
else
    evalSup(1)=vmaxFactSup + (abs(Rlbest));
end

ZminSupGMED=evalSup(ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);

    Rl=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

    if (Rl<=0 & Rlbest>=0) % Si F-INF
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        ZminSupGMED=evalSup(i);
        ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

    elseif (Rl<=0 & Rlbest<=0) % Si F-F
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        if evalSup(i)<ZminSupGMED
            ZminSupGMED=evalSup(i);

```

```

        ibestSup=i;
        R1best=feval (g1,popSup (ibestSup, :), xviejo (ibestSup, :));
    end

    elseif (R1>=0 & R1best>=0)    % Si INF-INF
        evalSup(i)=vmaxFactSup + (abs(R1));
        if ((abs(R1))<(abs(R1best)))
            ZminSupGMED=evalSup(i);
            ibestSup=i;
            R1best=feval (g1,popSup (ibestSup, :), xviejo (ibestSup, :));
        end
    end
end

popBestSup=popSup (ibestSup, :);
xGMED=xviejo (ibestSup, :);
XminInfGMED=feval (f2,popSup (ibestSup, :), xGMED);

%-----Bucle mutación/cruce/selección-----%

Gsup=1

while (Gsup<GmaxS)

for i=1:NPS

% Selección aleatoria de tres vectores de la población

while 1
    v1=floor(rand*NPS)+1;
    if v1~=i;
        break;
    end
end

while 2
    v2=floor(rand*NPS)+1;
    if v2~=i & v2~=v1;
        break;
    end
end

while 3
    v3=floor(rand*NPS)+1;
    if v3~=i & v3~=v2 & v3~=v1;
        break;
    end
end

end

% Creación del vector de prueba

```

```

jrand=floor(rand*DS)+1;

for j=1:DS

r=rand;
    if r <= CRS | j==jrand
        trialSup(j)=popSup(i,j)+FS.*(popSup(v1,j)-
popSup(i,j))+FS.*(popSup(v2,j)-popSup(v3,j)); % ED/target-to-rand/1/bin
    else
        trialSup(j)=popSup(i,j);
    end
end

for j=1:DS
    if trialSup(j)>=uppS(j)
        trialSup(j)=uppS(j);
    elseif trialSup(j)<=lowS(j)
        trialSup(j)=lowS(j);
    else
        trialSup(j)=trialSup(j);
    end
end

%Escribir GDX

varSupT.name='z';
varSupT.val=trialSup;
varSupT.form='full';
varSupT.type='parameter';

wgdx('varSup_E1.gdx',varSupT);

%Leer GDX

x=gams('E1_InfGMED.gms');
x=x.val;

if isempty(x)
    x=0;
else
    x=x;
end

% Selección del mejor vector (objetivo o trial)

R1=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
R1trial=feval(g1,trialSup,x);

if (R1trial<=0 & R1>=0) % Si F-INF
    evalTrialSup=feval(f1,trialSup,x);
    newPopSup(i,:)=trialSup;
    evalSup(i)=evalTrialSup;

```

```

elseif (Rltrial<=0 & R1<=0) % Si F-F
    evalTrialSup=feval (f1,trialSup,x);
    if evalTrialSup<=evalSup (i)
        newPopSup (i,:)=trialSup;
        evalSup (i)=evalTrialSup;
    else
        newPopSup (i,:)=popSup (i,:);
    end

elseif (Rltrial>=0 & R1<=0) % Si INF-F
    newPopSup (i,:)=popSup (i,:);

elseif (Rltrial>=0 & R1>=0) % Si INF-INF
    evalTrialSup=vmaxFactSup + (abs (Rltrial));
    if ((abs (Rltrial))<(abs (R1)))
        newPopSup (i,:)=trialSup;
        evalSup (i)=evalTrialSup;
    else
        newPopSup (i,:)=popSup (i,:);
    end
end
end

ZminSup_GMED (1,Gsup)=ZminSupGMED;

%-----Nueva generación-----%

evalFactSup=zeros ([],DS);
popVecFactSup=zeros ([],DS);
popVecInfactSup=zeros ([],DS);

popSup (:,:)=newPopSup (:,:);
Gsup=Gsup+1

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i=1:NPS

    %Escribir GDx

    varSupN.name='z';
    varSupN.val=popSup (i,:);
    varSupN.form='full';
    varSupN.type='parameter';

    wgdX ('varSup_E1.gdx',varSupN);

    %Leer GDx

    x=gams ('E1_InfGMED.gms');

```

```

x=x.val;

if isempty(x)
    xviejo(i,:)=0;
else
    xviejo(i,:)=x;
end

R1=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

if (R1<=0) % Factible
    popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
else
    popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

if length(popVecFactSup)==0
    vmaxFactSup=0;
else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup(1)=feval(f1,popVecFactSup(ibestFactSup,:),xviejo(ibestFactSup, :));
if (popVecFactSup(ibestFactSup,:)==popSup(ibestFactSup,:))
    vmaxFactSup=evalFactSup(1);
else
    vmaxFactSup=0;
end

for i=2:m
    evalFactSup(i)=feval(f1,popVecFactSup(i,:),xviejo(i,:));
    if
((evalFactSup(i)>vmaxFactSup) & (popVecFactSup(i,:)==popSup(i,:)))
        vmaxFactSup=evalFactSup(i);
        ibestFactSup=i;
    end
end

end

% Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

```

```

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

if(Rlbest<=0) % Si F
    evalSup(1)=feval(f1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
else
    evalSup(1)=vmaxFactSup + (abs(Rlbest));
end

ZminSupGMED=evalSup(ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);

    Rl=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

    if (Rl<=0 & Rlbest>=0) % Si F-INF
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        ZminSupGMED=evalSup(i);
        ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

    elseif (Rl<=0 & Rlbest<=0) % Si F-F
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        if evalSup(i)<ZminSupGMED
            ZminSupGMED=evalSup(i);
            ibestSup=i;
            Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end

    elseif (Rl>=0 & Rlbest>=0) % Si INF-INF
        evalSup(i)=vmaxFactSup + (abs(Rl));
        if ((abs(Rl))<(abs(Rlbest)))
            ZminSupGMED=evalSup(i);
            ibestSup=i;
            Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end
    end
end

popBestSup=popSup(ibestSup,:);
xGMED=xviejo(ibestSup,:);
XminInfGMED=feval(f2,popSup(ibestSup,:),xGMED);

ZminSup_GMED(1,Gsup)=ZminSupGMED;

end

%Gráfica de ZminSupGMED versus Generación

```

```

Gsup=[1:GmaxS];
plot(Gsup,ZminSup_GMED,'--
g','linewidth',2,'marker','o','markersize',8,'markerfacecolor','g','marke
redgecolor','b')
grid on
title('ZminSupGMED versus Generación','fontsize',12,'color','b')
xlabel('Generación','fontsize',10,'color','b')
ylabel('ZminSupGMED','fontsize',10,'color','b')

```

PROBLEMA DE NIVEL INFERIOR (GAMS)

```
$ontext
```

```
Ejemplo 1 - GMED
```

```
$offtext
```

```
$set matout "'matsol.gdx', x ";
```

```
$if exist matdata.gms $include matdata.gms
```

```
scalar
```

```
z 'variable de nivel superior';
```

```
$gdxin varSup_E1.gdx
```

```
$load z
```

```
$gdxin
```

```
variables
```

```
x variable de nivel inferior,
```

```
evalInf evaluación de la función objetivo de nivel inferior;
```

```
equations
```

```
f2 función objetivo de nivel inferior
```

```
R2 restricción de nivel inferior;
```

```
f2.. evalInf=e= power((z + 2*x - 30),2);
```

```
R2.. z + x - 20=l=0;
```

```
x.lo=0;
```

```
x.up=20;
```

```
model E1_InfGMED/all/;
```

```
solve E1_InfGMED using nlp minimizing evalInf
```

```
execute_unload %matout%;
```

En la ventana de comandos de MATLAB:

```
clc  
clear all  
tic  
NPS=30;  
FS=0.7;  
CRS=0.9;  
GmaxS=30;  
[ZminSupGMED z XminInfGMED xGMED]= AlgoritmoGMED_E1(NPS,FS,CRS,GmaxS)  
toc
```

Anexo D. Código de programación método BIDE – Ejemplo 2

ALGORITMO BIDE (MATLAB)

```
%EJEMPLO 2 - BIDE
%%
%NPS=Número total de individuos en la población del nivel superior
%FS=Factor de mutación del nivel superior
%CRS=Tasa de cruce del nivel superior
%GmaxS=Número máximo de generaciones del nivel superior
%%

function [ZminSupBIDE,popBestSup,XminInfBIDE,xBIDE]=
AlgoritmoBIDE_E2(NPS,FS,CRS,GmaxS)

lowS=[0];
uppS=[50];
f1=inline('16*z(1).^2+9*x(1).^2','z','x');
g1=inline('(-4*z(1)+x(1))','z','x');

f2=inline('(z(1)+x(1)-20).^4','z','x');

DS=length(lowS);           %Número total de variables de decisión
                             (dimensiones) del nivel superior
popSup=zeros(NPS,DS);      %Población del nivel superior
newPopSup=zeros(NPS,DS);   %Nueva población del nivel superior
popBestSup=zeros(1,DS);    %Mejor individuo de la población de nivel
superior
evalSup=zeros(1,NPS);      %Valor fitness de nivel superior
trialSup=zeros(1,DS);      %Vector de prueba de nivel superior
xviejo=zeros(NPS,DS);      %Soluciones de nivel inferior
xBIDE=zeros(1,DS);         %Mejor solución de nivel inferior
ZminSup_BIDE=zeros(1,[]);   %Mínimo valor fitness de nivel superior de
cada generación

evalFactSup=zeros([],DS);   %Valor fitness de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecFactSup=zeros([],DS); %Población de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecInfactSup=zeros([],DS); %Población de vectores objetivo
(individuos) infactibles de nivel superior

R1=zeros(1,NPS);           %Evaluación de la restricción de nivel
superior

%-----Inicialización-----%
```

```

% Generación aleatoria de la población inicial de nivel superior

for i=1:NPS
    for j=1:DS
        popSup(i,j)=lowS(j)+rand*(uppS(j)-lowS(j));
    end
end

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i=1:NPS
    varSup=popSup(i,:);
    [XminInf x] = AlgoritmoEDInf_E2(30,0.7,0.9,30,varSup);
    xviejo(i,:)=x;

    R1=feval(g1,varSup,xviejo(i,:));

    if (R1<=0) % Factible
        popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
    else
        popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

if length(popVecFactSup)==0;
    vmaxFactSup=0;
else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup(1)=feval(f1,popVecFactSup(ibestFactSup,:),xviejo(ibestFactSup,
,:));

    if (popVecFactSup(ibestFactSup,:)==popSup(ibestFactSup,:));
        vmaxFactSup=evalFactSup(1);
    else
        vmaxFactSup=0;
    end

    for i=2:m
        evalFactSup(i)=feval(f1,popVecFactSup(i,:),xviejo(i,:));

        if ((evalFactSup(i)>vmaxFactSup) &
(popVecFactSup(i,:)==popSup(i,:)));
            vmaxFactSup=evalFactSup(i);
            ibestFactSup=i;
        end
    end
end

% Operador de selección (torneo)

```

```

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infectible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infectibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

if(Rlbest<=0); % Si F
    evalSup(ibestSup)=feval(f1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
else
    evalSup(ibestSup)=vmaxFactSup + (abs(Rlbest));
end

ZminSupBIDE=evalSup(ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);

    Rl=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

    if (Rl<=0 & Rlbest>=0); % Si F-INF
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        ZminSupBIDE=evalSup(i);
        ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

    elseif (Rl<=0 & Rlbest<=0); % Si F-F
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        if evalSup(i)<ZminSupBIDE;
            ZminSupBIDE=evalSup(i);
            ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end

    elseif (Rl>=0 & Rlbest>=0); % Si INF-INF
        evalSup(i)=vmaxFactSup + (abs(Rl));
        if ((abs(Rl))<(abs(Rlbest)));
            ZminSupBIDE=evalSup(i);
            ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end
    end
end

popBestSup=popSup(ibestSup,:);
xBIDE=xviejo(ibestSup,:);
XminInfBIDE=feval(f2,popSup(ibestSup,:),xBIDE);

```

```

%-----Bucle mutación/cruce/selección-----%

Gsup=1

while (Gsup<GmaxS)

for i=1:NPS

% Selección aleatoria de tres vectores de la población

while 1
v1=floor(rand*NPS)+1;
if v1~=i;
break;
end
end

while 2
v2=floor(rand*NPS)+1;
if v2~=i & v2~=v1;
break;
end
end

while 3
v3=floor(rand*NPS)+1;
if v3~=i & v3~=v2 & v3~=v1;
break;
end
end

% Creación del vector de prueba

jrand=floor(rand*DS)+1;

for j=1:DS

r=rand;
if r <= CRS | j==jrand;
trialSup(j)=popSup(i,j)+FS.*(popSup(v1,j)-
popSup(i,j))+FS.*(popSup(v2,j)-popSup(v3,j)); % ED/target-to-rand/1/bin
else
trialSup(j)=popSup(i,j);
end
end

for j=1:DS
if trialSup(j)>=uppS(j);
trialSup(j)=uppS(j);
elseif trialSup(j)<=lowS(j);
trialSup(j)=lowS(j);
else

```

```

        trialSup(j)=trialSup(j);
    end
end

varSup=trialSup;
[XminInf x]=AlgoritmoEDInf_E2(30,0.7,0.9,30,varSup);           %Nuevo x

% Selección del mejor vector (objetivo o trial)

R1=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
R1trial=feval(g1,trialSup,x);

if (R1trial<=0 & R1>=0); % Si F-INF
    evalTrialSup=feval(f1,trialSup,x);
    newPopSup(i,:)=trialSup;
    evalSup(i)=evalTrialSup;

elseif (R1trial<=0 & R1<=0); % Si F-F
    evalTrialSup=feval(f1,trialSup,x);
    if evalTrialSup<=evalSup(i);
        newPopSup(i,:)=trialSup;
        evalSup(i)=evalTrialSup;
    else
        newPopSup(i,:)=popSup(i,:);
    end

elseif (R1trial>=0 & R1<=0); % Si INF-F
    newPopSup(i,:)=popSup(i,:);

elseif (R1trial>=0 & R1>=0); % Si INF-NF
    evalTrialSup=vmaxFactSup + (abs(R1trial));
    if ((abs(R1trial))<(abs(R1)));
        newPopSup(i,:)=trialSup;
        evalSup(i)=evalTrialSup;
    else
        newPopSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

end

ZminSup_BIDE(1,Gsup)=ZminSupBIDE;

%-----Nueva generación-----%

evalFactSup=zeros([],DS);
popVecFactSup=zeros([],DS);
popVecInfactSup=zeros([],DS);

popSup(:,:)=newPopSup(:,:);
Gsup=Gsup+1

```

```

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i=1:NPS
    varSup=popSup(i,:);
    [XminInf x] = AlgoritmoEDInf_E2(30,0.7,0.9,30,varSup);
    xviejo(i,:)=x;

    R1=feval(g1,varSup,xviejo(i,:));

    if (R1<=0) % Factible
        popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
    else
        popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

if length(popVecFactSup)==0;
    vmaxFactSup=0;
else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup(1)=feval(f1,popVecFactSup(ibestFactSup,:),xviejo(ibestFactSup, :));

    if (popVecFactSup(ibestFactSup,:)==popSup(ibestFactSup,:));
        vmaxFactSup=evalFactSup(1);
    else
        vmaxFactSup=0;
    end

    for i=2:m
        evalFactSup(i)=feval(f1,popVecFactSup(i,:),xviejo(i,:));

        if ((evalFactSup(i)>vmaxFactSup) &
(popVecFactSup(i,:)==popSup(i,:)));
            vmaxFactSup=evalFactSup(i);
            ibestFactSup=i;
        end
    end
end

% Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

```

```

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

if(Rlbest<=0); % Si F
    evalSup(ibestSup)=feval(f1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
else
    evalSup(ibestSup)=vmaxFactSup + (abs(Rlbest));
end

ZminSupBIDE=evalSup(ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);

    Rl=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

    if (Rl<=0 & Rlbest>=0); % Si F-INF
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        ZminSupBIDE=evalSup(i);
        ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

    elseif (Rl<=0 & Rlbest<=0); % Si F-F
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        if evalSup(i)<ZminSupBIDE;
            ZminSupBIDE=evalSup(i);
            ibestSup=i;
            Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end

    elseif (Rl>=0 & Rlbest>=0); % Si INF-INF
        evalSup(i)=vmaxFactSup + (abs(Rl));
        if ((abs(Rl))<(abs(Rlbest)));
            ZminSupBIDE=evalSup(i);
            ibestSup=i;
            Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
        end
    end
end

popBestSup=popSup(ibestSup,:);
xBIDE=xviejo(ibestSup,:);
XminInfBIDE=feval(f2,popSup(ibestSup,:),xBIDE);

ZminSup_BIDE(1,Gsup)=ZminSupBIDE;

end

%Gráfica de ZminSupBIDE versus Generación
Gsup=[1:GmaxS];

```

```

plot(Gsup,ZminSup_BIDE,'--
g','linewidth',2,'marker','o','markersize',8,'markerfacecolor','g','marke
redgecolor','b')
grid on
title('ZminSupBIDE versus Generación','fontsize',12,'color','b')
xlabel('Generación','fontsize',10,'color','b')
ylabel('ZminSupBIDE','fontsize',10,'color','b')

```

PROBLEMA DE NIVEL INFERIOR (MATLAB)

```

%-----Algoritmo ED Nivel inferior-----%
%%
%NPI=Número total de individuos en la población del nivel inferior
%FI=Factor de mutación del nivel inferior
%CRI=Tasa de cruce del nivel inferior
%GmaxI=Número máximo de generaciones del nivel inferior
%%

function [XminInf,popBestInf] =
AlgoritmoEDInf_E2(NPI,FI,CRI,GmaxI,varSup)

lowI=[0];
uppI=[50];
f2=inline('z(1)+x(1)-20).^4','z','x');
g2=inline('4*z(1)+x(1)-50','z','x');

DI=length(lowI);           %Número total de variables de decisión
                             (dimensiones) del nivel inferior
popInf=zeros(NPI,DI);      %Población del nivel inferior
newPopInf=zeros(NPI,DI);  %Nueva población del nivel inferior
popBestInf=zeros(1,DI);   %Mejor individuo de la población de nivel
inferior
evalInf=zeros(1,NPI);     %Valor fitness de nivel inferior
trialInf=zeros(1,DI);    %Vector de prueba de nivel inferior

evalFactInf=zeros([],DI); %Valor fitness de vectores objetivo
                             (individuos) factibles de nivel inferior
popVecFactInf=zeros([],DI); %Población de vectores objetivo
                             (individuos) factibles de nivel inferior
popVecInfactInf=zeros([],DI); %Población de vectores objetivo
                             (individuos) infactibles de nivel inferior

R2=zeros(1,NPI);          %Evaluación de la restricción de nivel
inferior

%-----Inicialización-----%

```

```

% Generación aleatoria de la población inicial de nivel inferior

for i=1:NPI
    for j=1:DI
        popInf(i,j)=lowI(j)+rand*(uppI(j)-lowI(j));
    end
end

% Cálculo del valor máximo factible de nivel inferior (vmaxFactInf)

for i=1:NPI

    R2=feval(g2,varSup,popInf(i,:));

    if (R2<=0); % Factible
        popVecFactInf(i,:)=popInf(i,:);
    else
        popVecInfactInf(i,:)=popInf(i,:);
    end
end

[m,n] = size(popVecFactInf);

if length(popVecFactInf)==0;
    vmaxFactInf=0;
else
    ibestFactInf=1;
    evalFactInf(1)=feval(f2,varSup,popVecFactInf(ibestFactInf,:));

    if (popVecFactInf(ibestFactInf,:)==popInf(ibestFactInf,:));
        vmaxFactInf=evalFactInf(1);
    else
        vmaxFactInf=0;
    end

    for i=2:m;
        evalFactInf(i)=feval(f2,varSup,popVecFactInf(i,:));

        if ((evalFactInf(i)>vmaxFactInf) &
(popVecFactInf(i,:)==popInf(i,:)));
            vmaxFactInf=evalFactInf(i);
            ibestFactInf=i;
        end
    end
end

% Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.

```

%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor violación de restricción.

```
ibestInf=1; % Inicie con el primer miembro de la población
```

```
R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
```

```
if (R2best<=0); % Si F
    evalInf(1)=feval(f2,varSup,popInf(ibestInf,:));
else
    evalInf(1)=vmaxFactInf + (abs(R2best));
end
```

```
XminInf=evalInf(ibestInf);
```

```
for i=2:NPI; % Compruebe los miembros restantes
```

```
    R2=feval(g2,varSup,popInf(i,:));
```

```
    if (R2<=0 & R2best>=0); % Si F-INF
        evalInf(i)= feval(f2,varSup,popInf(i,:));
        XminInf=evalInf(i);
        ibestInf=i;
        R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
```

```
    elseif (R2<=0 & R2best<=0); % Si F-F
        evalInf(i)=feval(f2,varSup,popInf(i,:));
        if evalInf(i)<XminInf;
            XminInf=evalInf(i);
            ibestInf=i;
        R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
    end
```

```
    elseif (R2>=0 & R2best>=0); % Si INF-INF
        evalInf(i)=vmaxFactInf + (abs(R2));
        if (abs(R2))<(abs(R2best));
            XminInf=evalInf(i);
            ibestInf=i;
        R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
    end
```

```
end
```

```
end
```

```
popBestInf=popInf(ibestInf,:);
```

```
%-----Bucle mutación/cruce/selección-----%
```

```
Ginf=0;
```

```
while (Ginf<GmaxI);
```

```

for i=1:NPI;

% Selección aleatoria de tres vectores de la población

while 1
    v1=floor(rand*NPI)+1;
    if v1~=i;
        break;
    end
end

while 2
    v2=floor(rand*NPI)+1;
    if v2~=i & v2~=v1;
        break;
    end
end

while 3
    v3=floor(rand*NPI)+1;
    if v3~=i & v3~=v2 & v3~=v1;
        break;
    end
end

% Creación del vector de prueba

jrand=floor(rand*DI)+1;

for j=1:DI

r=rand;
    if r <= CRI | j==jrand;
        trialInf(j)=popInf(i,j)+FI.*(popInf(v1,j)-
popInf(i,j))+FI.*(popInf(v2,j)-popInf(v3,j)); % ED/target-to-rand/1/bin
    else
        trialInf(j)=popInf(i,j);
    end
end

for j=1:DI
    if trialInf(j)>=uppI(j);
        trialInf(j)=uppI(j);
    elseif trialInf(j)<=lowI(j);
        trialInf(j)=lowI(j);
    else
        trialInf(j)=trialInf(j);
    end
end

% Selección del mejor vector (objetivo o trial)

```

```

R2=feval (g2,varSup,popInf (i,:));
R2trial=feval (g2,varSup,trialInf);

if (R2trial<=0 & R2>=0); % Si F-INF
    evalTrialInf=feval (f2,varSup,trialInf);
    newPopInf (i,:)=trialInf;
    evalInf (i)=evalTrialInf;

elseif (R2trial<=0 & R2<=0); % Si F-F
    evalTrialInf= feval (f2,varSup,trialInf);
    if evalTrialInf<=evalInf (i);
        newPopInf (i,:)=trialInf;
        evalInf (i)=evalTrialInf;
    else
        newPopInf (i,:)=popInf (i,:);
    end

elseif (R2trial>=0 & R2<=0); % Si INF-F
    newPopInf (i,:)=popInf (i,:);

elseif (R2trial>=0 & R2>=0); % Si INF-INF
    evalTrialInf=vmaxFactInf + (abs (R2trial));
    if ((abs (R2trial))<(abs (R2)));
        newPopInf (i,:)=trialInf;
        evalInf (i)=evalTrialInf;
    else
        newPopInf (i,:)=popInf (i,:);
    end
end
end

end

%-----Nueva generación-----%

evalFactInf=zeros ([],DI);
popVecFactInf=zeros ([],DI);
popVecInfactInf=zeros ([],DI);

popInf (:, :)=newPopInf (:, :);
Ginf=Ginf+1;

% Cálculo del valor máximo factible de nivel inferior (vmaxFactInf)

for i=1:NPI

    R2=feval (g2,varSup,popInf (i,:));

    if (R2<=0); % Factible
        popVecFactInf (i,:)=popInf (i,:);
    else
        popVecInfactInf (i,:)=popInf (i,:);

```

```

    end
end

[m,n] = size(popVecFactInf);

if length(popVecFactInf)==0;
    vmaxFactInf=0;
else
    ibestFactInf=1;
    evalFactInf(1)=feval(f2,varSup,popVecFactInf(ibestFactInf,:));

    if (popVecFactInf(ibestFactInf,:)==popInf(ibestFactInf,:));
        vmaxFactInf=evalFactInf(1);
    else
        vmaxFactInf=0;
    end

    for i=2:m;
        evalFactInf(i)=feval(f2,varSup,popVecFactInf(i,:));

        if ((evalFactInf(i)>vmaxFactInf) &
(popVecFactInf(i,:)==popInf(i,:)));
            vmaxFactInf=evalFactInf(i);
            ibestFactInf=i;
        end
    end
end

% Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

ibestInf=1; % Inicie con el primer miembro de la población

R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));

if (R2best<=0); % Si F
    evalInf(1)=feval(f2,varSup,popInf(ibestInf,:));
else
    evalInf(1)=vmaxFactInf + (abs(R2best));
end

XminInf=evalInf(ibestInf);

for i=2:NPI; % Compruebe los miembros restantes

    R2=feval(g2,varSup,popInf(i,:));

```

```

if (R2<=0 & R2best>=0); % Si F-INF
    evalInf(i)= feval(f2,varSup,popInf(i,:));
    XminInf=evalInf(i);
    ibestInf=i;
    R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));

elseif (R2<=0 & R2best<=0); % Si F-F
    evalInf(i)=feval(f2,varSup,popInf(i,:));
    if evalInf(i)<XminInf;
        XminInf=evalInf(i);
        ibestInf=i;
    R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
    end

elseif (R2>=0 & R2best>=0); % Si INF-INF
    evalInf(i)=vmaxFactInf + (abs(R2));
    if (abs(R2))<(abs(R2best));
        XminInf=evalInf(i);
        ibestInf=i;
    R2best=feval(g2,varSup,popInf(ibestInf,:));
    end
end
end

popBestInf=popInf(ibestInf,:);

end

```

En la ventana de comandos:

```

clc
clear all
tic
NPS=30;
FS=0.7;
CRS=0.9;
GmaxS=30;
[ZminSupBIDE z XminInfBIDE xBIDE]= AlgoritmoBIDE_E2(NPS,FS,CRS,GmaxS)
toc

```

Anexo E. Código de programación método GMED – Ejemplo 2

ALGORITMO GMED (MATLAB)

```
%EJEMPLO 2 - GMED
%%
%NPS=Número total de individuos en la población del nivel superior
%FS=Factor de mutación del nivel superior
%CRS=Tasa de cruce del nivel superior
%GmaxS=Número máximo de generaciones del nivel superior
%%

function [ZminSupGMED,popBestSup,XminInfGMED,xGMED]=
AlgoritmoGMED_E2(NPS,FS,CRS,GmaxS)

lowS=[0];
uppS=[50];
f1=inline('16*x(1).^2+9*y(1).^2','x','y');
g1=inline('(-4*x(1)+y(1))','x','y');

f2=inline('(x(1)+y(1)-20).^4','x','y');

DS=length(lowS); %Número total de variables de decisión
(dimensiones) del nivel superior
popSup=zeros(NPS,DS); %Población del nivel superior
newPopSup=zeros(NPS,DS); %Nueva población del nivel superior
popBestSup=zeros(1,DS); %Mejor individuo de la población de nivel
superior
evalSup=zeros(1,NPS); %Valor fitness de nivel superior
trialSup=zeros(1,DS); %Vector de prueba de nivel superior
xviejo=zeros(NPS,DS); %Soluciones de nivel inferior
xGMED=zeros(1,DS); %Mejor solución de nivel inferior
ZminSup_GMED=zeros(1,[]); %Mínimo valor fitness de nivel superior de
cada generación

evalFactSup=zeros([],DS); %Valor fitness de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecFactSup=zeros([],DS); %Población de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecInfactSup=zeros([],DS); %Población de vectores objetivo
(individuos) infactibles de nivel superior

R1=zeros(1,NPS); %Evaluación de la restricción de nivel
superior

%-----Inicialización-----%
```

```

% Generación aleatoria de la población inicial de nivel superior

for i=1:NPS
    for j=1:DS
        popSup(i,j)=lowS(j)+rand*(upps(j)-lowS(j));
    end
end

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i=1:NPS

    %Escribir GDX

    varSup.name='z';
    varSup.val=popSup(i,:);
    varSup.form='full';
    varSup.type='parameter';

    wgdxd('varSup_E2.gdx',varSup);

    %Leer GDX

    x=gams('E2_InfGMED.gms');
    x=x.val;

    if isempty(x)
        xviejo(i,:)=0;
    else
        xviejo(i,:)=x;
    end

    R1=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

    if (R1<=0) % Factible
        popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
    else
        popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

if length(popVecFactSup)==0
    vmaxFactSup=0;
else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup(1)=feval(f1,popVecFactSup(ibestFactSup,:),xviejo(ibestFactSup,,:));
    if (popVecFactSup(ibestFactSup,:)==popSup(ibestFactSup,:))
        vmaxFactSup=evalFactSup(1);
    else

```

```

        vmaxFactSup=0;
    end

    for i=2:m
        evalFactSup(i)=feval(f1,popVecFactSup(i,:),xviejo(i,:));
        if
            ((evalFactSup(i)>vmaxFactSup) & (popVecFactSup(i,:)==popSup(i,:)))
                vmaxFactSup=evalFactSup(i);
                ibestFactSup=i;
            end
        end
    end

end

% Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

if(Rlbest<=0) % Si F
    evalSup(1)=feval(f1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));
else
    evalSup(1)=vmaxFactSup + (abs(Rlbest));
end

ZminSupGMED=evalSup(ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);

    Rl=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

    if (Rl<=0 & Rlbest>=0) % Si F-INF
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        ZminSupGMED=evalSup(i);
        ibestSup=i;
        Rlbest=feval(g1,popSup(ibestSup,:),xviejo(ibestSup,:));

    elseif (Rl<=0 & Rlbest<=0) % Si F-F
        evalSup(i)= feval(f1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
        if evalSup(i)<ZminSupGMED
            ZminSupGMED=evalSup(i);
            ibestSup=i;
        end
    end
end

```

```

        R1best=feval (g1,popSup (ibestSup, :), xviejo (ibestSup, :));
        end

        elseif (R1>=0 & R1best>=0)    % Si INF-INF
            evalSup(i)=vmaxFactSup + (abs(R1));
            if ((abs(R1))<(abs(R1best)))
                ZminSupGMED=evalSup(i);
                ibestSup=i;
                R1best=feval (g1,popSup (ibestSup, :), xviejo (ibestSup, :));
            end
        end
    end
end

popBestSup=popSup (ibestSup, :);
xGMED=xviejo (ibestSup, :);
XminInfGMED=feval (f2,popSup (ibestSup, :), xGMED);

%-----Bucle mutación/cruce/selección-----%

Gsup=1

while (Gsup<GmaxS)

for i=1:NPS

% Selección aleatoria de tres vectores de la población

while 1
    v1=floor (rand*NPS)+1;
    if v1~=i;
        break;
    end
end

while 2
    v2=floor (rand*NPS)+1;
    if v2~=i & v2~=v1;
        break;
    end
end

while 3
    v3=floor (rand*NPS)+1;
    if v3~=i & v3~=v2 & v3~=v1;
        break;
    end
end

% Creación del vector de prueba

jrand=floor (rand*DS)+1;

```

```

for j=1:DS

r=rand;
  if r <= CRS | j==jrand
      trialSup(j)=popSup(i,j)+FS.*(popSup(v1,j)-
popSup(i,j))+FS.*(popSup(v2,j)-popSup(v3,j)); % ED/target-to-rand/1/bin
  else
      trialSup(j)=popSup(i,j);
  end
end

for j=1:DS
  if trialSup(j)>=uppS(j)
      trialSup(j)=uppS(j);
  elseif trialSup(j)<=lowS(j)
      trialSup(j)=lowS(j);
  else
      trialSup(j)=trialSup(j);
  end
end

%Escribir GDX

varSupT.name='z';
varSupT.val=trialSup;
varSupT.form='full';
varSupT.type='parameter';

wgdx('varSup_E2.gdx',varSupT);

%Leer GDX

x=gams('E2_InfGMED.gms');
x=x.val;

if isempty(x)
    x=0;
else
    x=x;
end

% Selección del mejor vector (objetivo o trial)

R1=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));
R1trial=feval(g1,trialSup,x);

if (R1trial<=0 & R1>=0) % Si F-INF
    evalTrialSup=feval(f1,trialSup,x);
    newPopSup(i,:)=trialSup;
    evalSup(i)=evalTrialSup;

elseif (R1trial<=0 & R1<=0) % Si F-F
    evalTrialSup=feval(f1,trialSup,x);

```

```

    if evalTrialSup<=evalSup(i)
        newPopSup(i,:)=trialSup;
        evalSup(i)=evalTrialSup;
    else
        newPopSup(i,:)=popSup(i,:);
    end

elseif (Rltrial>=0 & Rl<=0) % Si INF-F
    newPopSup(i,:)=popSup(i,:);

elseif (Rltrial>=0 & Rl>=0) % Si INF-INF
    evalTrialSup=vmaxFactSup + (abs(Rltrial));
    if ((abs(Rltrial))<(abs(Rl)))
        newPopSup(i,:)=trialSup;
        evalSup(i)=evalTrialSup;
    else
        newPopSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

end

ZminSup_GMED(1,Gsup)=ZminSupGMED;

%-----Nueva generación-----%

evalFactSup=zeros([],DS);
popVecFactSup=zeros([],DS);
popVecInfactSup=zeros([],DS);

popSup(:,:)=newPopSup(:,:);
Gsup=Gsup+1

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i=1:NPS

    %Escribir GDx

    varSupN.name='z';
    varSupN.val=popSup(i,:);
    varSupN.form='full';
    varSupN.type='parameter';

    wgdX('varSup_E2.gdx',varSupN);

    %Leer GDx

    x=gams('E2_InfGMED.gms');
    x=x.val;

```

```

    if isempty(x)
        xviejo(i,:)=0;
    else
        xviejo(i,:)=x;
    end

    R1=feval(g1,popSup(i,:),xviejo(i,:));

    if (R1<=0) % Factible
        popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
    else
        popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

if length(popVecFactSup)==0
    vmaxFactSup=0;
else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup(1)=feval(f1,popVecFactSup(ibestFactSup,:),xviejo(ibestFactSup,,:));
if (popVecFactSup(ibestFactSup,:)==popSup(ibestFactSup,:))
    vmaxFactSup=evalFactSup(1);
else
    vmaxFactSup=0;
end

for i=2:m
    evalFactSup(i)=feval(f1,popVecFactSup(i,:),xviejo(i,:));
    if
((evalFactSup(i)>vmaxFactSup) & (popVecFactSup(i,:)==popSup(i,:)))
        vmaxFactSup=evalFactSup(i);
        ibestFactSup=i;
    end
end

end

% Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

```

```

Rlbest=feval (g1,popSup (ibestSup, :), xviejo (ibestSup, :));

if (Rlbest<=0) % Si F
    evalSup (1)=feval (f1,popSup (ibestSup, :), xviejo (ibestSup, :));
else
    evalSup (1)=vmaxFactSup + (abs (Rlbest));
end

ZminSupGMED=evalSup (ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup (i, :);

    R1=feval (g1,popSup (i, :), xviejo (i, :));

    if (R1<=0 & Rlbest>=0) % Si F-INF
        evalSup (i)= feval (f1,popSup (i, :), xviejo (i, :));
        ZminSupGMED=evalSup (i);
        ibestSup=i;
        Rlbest=feval (g1,popSup (ibestSup, :), xviejo (ibestSup, :));

    elseif (R1<=0 & Rlbest<=0) % Si F-F
        evalSup (i)= feval (f1,popSup (i, :), xviejo (i, :));
        if evalSup (i)<ZminSupGMED
            ZminSupGMED=evalSup (i);
            ibestSup=i;
            Rlbest=feval (g1,popSup (ibestSup, :), xviejo (ibestSup, :));
        end

    elseif (R1>=0 & Rlbest>=0) % Si INF-INF
        evalSup (i)=vmaxFactSup + (abs (R1));
        if ((abs (R1))<(abs (Rlbest)))
            ZminSupGMED=evalSup (i);
            ibestSup=i;
            Rlbest=feval (g1,popSup (ibestSup, :), xviejo (ibestSup, :));
        end
    end
end

popBestSup=popSup (ibestSup, :);
xGMED=xviejo (ibestSup, :);
XminInfGMED=feval (f2,popSup (ibestSup, :), xGMED);

ZminSup_GMED (1, Gsup)=ZminSupGMED;

end

%Gráfica de ZminSupGMED versus Generación
Gsup=[1:GmaxS];

```

```

plot(Gsup,ZminSup_GMED,'--
g','linewidth',2,'marker','o','markersize',8,'markerfacecolor','g','marke
redgecolor','b')
grid on
title('ZminSupGMED versus Generación','fontsize',12,'color','b')
xlabel('Generación','fontsize',10,'color','b')
ylabel('ZminSupGMED','fontsize',10,'color','b')

```

PROBLEMA DE NIVEL INFERIOR (GAMS)

\$ontext

Ejemplo 2 - GMED

\$offtext

\$set matout "'matsol.gdx', x ";

\$if exist matdata.gms \$include matdata.gms

scalar

z 'variable de nivel superior';

\$gdxin varSup_E2.gdx

\$load z

\$gdxin

variables

x variable de nivel inferior,

evalInf evaluación de la función objetivo de nivel inferior;

equations

f2 función objetivo de nivel inferior

R2 restricción de nivel inferior;

f2.. evalInf=e= power((z + x - 20),4);

R2.. 4*z + x - 50=l=0;

x.lo=0;

x.up=20;

model E2_InfGMED/all/;

solve E2_InfGMED using nlp minimizing evalInf

execute_unload %matout%;

En la ventana de comandos de MATLAB:

```
clc
clear all
tic
NPS=30;
FS=0.7;
CRS=0.9;
GmaxS=30;
[ZminSupGMED z XminInfGMED xGMED]= AlgoritmoGMED_E2(NPS,FS,CRS,GmaxS)
toc
```

Anexo F. Resultados y tiempos de ejemplos tipo académico

BIDE – Ejemplo 1

1	2	3	4	5
<i>Elapsed time is 1665.699867 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1719.732213 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1663.689362 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1598.628496 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1621.270308 seconds.</i>
ZminSupBIDE = 100.0004	ZminSupBIDE = 99.9997	ZminSupBIDE = 99.9999	ZminSupBIDE = 99.9999	ZminSupBIDE = 100.0001
z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000
XminInfBIDE = 7.2721e-09	XminInfBIDE = 9.7665e-09	XminInfBIDE = 6.4392e-09	XminInfBIDE = 3.0124e-07	XminInfBIDE = 1.7395e-08
xBIDE = 9.9999	xBIDE = 10.0000	xBIDE = 10.0000	xBIDE = 9.9997	xBIDE = 9.9999
>>	>>	>>	>>	>>
6	7	8	9	10
<i>Elapsed time is 1634.650702 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1570.817603 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1639.621016 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1824.557874 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1674.651146 seconds.</i>
ZminSupBIDE = 100.0009	ZminSupBIDE = 100.0004	ZminSupBIDE = 99.9998	ZminSupBIDE = 100.0004	ZminSupBIDE = 100.0000
z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000
XminInfBIDE = 2.2660e-08	XminInfBIDE = 3.2620e-10	XminInfBIDE = 1.0458e-09	XminInfBIDE = 7.2721e-09	XminInfBIDE = 3.9921e-09
xBIDE = 9.9999	xBIDE = 10.0000	xBIDE = 10.0000	xBIDE = 9.9999	xBIDE = 10.0000
>>	>>	>>	>>	>>
11	12	13	14	15
<i>Elapsed time is 1643.416992 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1729.710531 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1565.620241 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1812.708779 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1667.685901 seconds.</i>
ZminSupBIDE = 100.0000	ZminSupBIDE = 100.0001	ZminSupBIDE = 100.0014	ZminSupBIDE = 100.0000	ZminSupBIDE = 100.0004
z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0001	z = 10.0000	z = 10.0000
XminInfBIDE = 1.5410e-08	XminInfBIDE = 1.2904e-07	XminInfBIDE = 5.4867e-09	XminInfBIDE = 1.3197e-09	XminInfBIDE = 7.2721e-09
xBIDE = 9.9999	xBIDE = 9.9998	xBIDE = 9.9999	xBIDE = 10.0000	xBIDE = 9.9999
>>	>>	>>	>>	>>

16	17	18	19	20
<i>Elapsed time is 1560.104812 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1620.325445 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1689.398772 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1646.306642 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1652.431046 seconds.</i>
ZminSupBIDE = 100.0004 z = 10.0000 XminInfBIDE = 7.2721e-09 xBIDE = 9.9999 >>	ZminSupBIDE = 99.9999 z = 10.0000 XminInfBIDE = 3.0124e-07 xBIDE = 9.9997 >>	ZminSupBIDE = 100.0002 z = 10.0000 XminInfBIDE = 1.4452e-09 xBIDE = 10.0000 >>	ZminSupBIDE = 99.9999 z = 10.0000 XminInfBIDE = 3.6427e-09 xBIDE = 10.0000 >>	ZminSupBIDE = 100.0005 z = 10.0000 XminInfBIDE = 2.0763e-09 xBIDE = 10.0000 >>
21	22	23	24	25
<i>Elapsed time is 1612.577374 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1710.034584 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1535.423703 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1655.977342 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1691.657438 seconds.</i>
ZminSupBIDE = 100.0005 z = 10.0000 XminInfBIDE = 7.9925e-09 xBIDE = 9.9999 >>	ZminSupBIDE = 100.0000 z = 10.0000 XminInfBIDE = 3.4600e-10 xBIDE = 10.0000 >>	ZminSupBIDE = 100.0000 z = 10.0000 XminInfBIDE = 4.4022e-10 xBIDE = 10.0000 >>	ZminSupBIDE = 99.9999 z = 10.0000 XminInfBIDE = 3.0124e-07 xBIDE = 9.9997 >>	ZminSupBIDE = 100.0043 z = 10.0002 XminInfBIDE = 1.0919e-07 xBIDE = 9.9997 >>
26	27	28	29	30
<i>Elapsed time is 1612.875536 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1701.536257 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1673.346751 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1623.976353 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1811.436316 seconds.</i>
ZminSupBIDE = 100.0004 z = 10.0000 XminInfBIDE = 7.2721e-09 xBIDE = 9.9999 >>	ZminSupBIDE = 99.9999 z = 10.0000 XminInfBIDE = 3.0124e-07 xBIDE = 9.9997 >>	ZminSupBIDE = 100.0001 z = 10.0000 XminInfBIDE = 1.7395e-08 xBIDE = 9.9999 >>	ZminSupBIDE = 100.0006 z = 10.0000 XminInfBIDE = 4.3656e-09 xBIDE = 10.0000 >>	ZminSupBIDE = 100.0017 z = 10.0001 XminInfBIDE = 1.0475e-08 xBIDE = 9.9999 >>

GMED – Ejemplo 1

1	2	3	4	5
<i>Elapsed time is 178.748695 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 205.399859 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 189.012503 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 171.048584 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 166.373225 seconds.</i>
ZminSupGMED = 100.0002	ZminSupGMED = 100.0002	ZminSupGMED = 100.0022	ZminSupGMED = 100.0021	ZminSupGMED = 100.0083
z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0001	z = 10.0001	z = 10.0004
XminInfGMED = 1.1195e-09	XminInfGMED = 5.1328e-10	XminInfGMED = 1.0761e-07	XminInfGMED = 1.0366e-07	XminInfGMED = 1.5592e-06
xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000	xGMED = 9.9999	xGMED = 9.9999	xGMED = 9.9996
>>	>>	>>	>>	>>
6	7	8	9	10
<i>Elapsed time is 167.086931 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 162.334095 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 163.298451 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 159.069477 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 161.052371 seconds.</i>
ZminSupGMED = 100.0006	ZminSupGMED = 100.0004	ZminSupGMED = 100.0008	ZminSupGMED = 100.0005	ZminSupGMED = 100.0005
z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000
XminInfGMED = 7.9515e-09	XminInfGMED = 4.1384e-09	XminInfGMED = 1.4399e-08	XminInfGMED = 4.7052e-09	XminInfGMED = 5.1212e-09
xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000
>>	>>	>>	>>	>>
11	12	13	14	15
<i>Elapsed time is 160.998090 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 160.079668 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 160.005326 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 161.661154 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 161.219177 seconds.</i>
ZminSupGMED = 100.0001	ZminSupGMED = 100.0012	ZminSupGMED = 100.0013	ZminSupGMED = 100.0008	ZminSupGMED = 100.0010
z = 10.0000	z = 10.0001	z = 10.0001	z = 10.0000	z = 10.0000
XminInfGMED = 3.0664e-10	XminInfGMED = 3.2008e-08	XminInfGMED = 3.6331e-08	XminInfGMED = 1.3440e-08	XminInfGMED = 2.1167e-08
xGMED = 10.0000	xGMED = 9.9999	xGMED = 9.9999	xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000
>>	>>	>>	>>	>>

16	17	18	19	20
<i>Elapsed time is 165.654724 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 161.861040 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 176.225289 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 162.344950 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 167.870926 seconds.</i>
ZminSupGMED = 100.0008	ZminSupGMED = 100.0004	ZminSupGMED = 100.0009	ZminSupGMED = 100.0001	ZminSupGMED = 100.0001
z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000
XminInfGMED = 1.5207e-08	XminInfGMED = 3.6044e-09	XminInfGMED = 1.6717e-08	XminInfGMED = 1.1191e-10	XminInfGMED = 4.6772e-10
xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000
>>	>>	>>	>>	>>
21	22	23	24	25
<i>Elapsed time is 178.890384 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 160.851192 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 163.472242 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 162.161066 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 162.813076 seconds.</i>
ZminSupGMED = 100.0000	ZminSupGMED = 100.0016	ZminSupGMED = 100.0000	ZminSupGMED = 100.0001	ZminSupGMED = 100.0002
z = 10.0000	z = 10.0001	z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0000
XminInfGMED = 4.8551e-12	XminInfGMED = 5.7420e-08	XminInfGMED = 9.3826e-12	XminInfGMED = 3.0999e-10	XminInfGMED = 8.1430e-10
xGMED = 10.0000	xGMED = 9.9999	xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000
>>	>>	>>	>>	>>
26	27	28	29	30
<i>Elapsed time is 160.294492 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 184.700836 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 163.659283 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 161.163750 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 160.363243 seconds.</i>
ZminSupGMED = 100.0002	ZminSupGMED = 100.0002	ZminSupGMED = 100.0022	ZminSupGMED = 100.0021	ZminSupGMED = 100.0083
z = 10.0000	z = 10.0000	z = 10.0001	z = 10.0001	z = 10.0004
XminInfGMED = 1.1195e-09	XminInfGMED = 5.1328e-10	XminInfGMED = 1.0761e-07	XminInfGMED = 1.0366e-07	XminInfGMED = 1.5592e-06
xGMED = 10.0000	xGMED = 10.0000	xGMED = 9.9999	xGMED = 9.9999	xGMED = 9.9996
>>	>>	>>	>>	>>

BIDE – Ejemplo 2

1	2	3	4	5
Elapsed time is 1613.191586 seconds.	<i>Elapsed time is</i> 1548.090306 <i>seconds.</i>	<i>Elapsed time is</i> 1827.971782 <i>seconds.</i>	<i>Elapsed time is</i> 2145.455979 <i>seconds.</i>	Elapsed time is 1740.475027 seconds.
ZminSupBIDE = 2.2499e+03 z = 11.2469 XminInfBIDE = 195.9524 xBIDE = 5.0116 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2496 XminInfBIDE = 197.5338 xBIDE = 5.0015 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2499 XminInfBIDE = 197.7548 xBIDE = 5.0001 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2462 XminInfBIDE = 195.4207 xBIDE = 5.0149 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2510 XminInfBIDE = 198.4211 xBIDE = 4.9959 >>
6	7	8	9	10
Elapsed time is 1905.445369 seconds.	<i>Elapsed time is</i> 1872.930272 <i>seconds.</i>	<i>Elapsed time is</i> 1640.654616 <i>seconds.</i>	<i>Elapsed time is</i> 1661.981175 <i>seconds.</i>	<i>Elapsed time is</i> 1592.932491 <i>seconds.</i>
ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2474 XminInfBIDE = 196.1398 xBIDE = 5.0103 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2514 XminInfBIDE = 198.7071 xBIDE = 4.9941 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2476 XminInfBIDE = 196.2816 xBIDE = 5.0094 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2482 XminInfBIDE = 196.7309 xBIDE = 5.0066 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2499 XminInfBIDE = 197.7605 xBIDE = 5.0001 >>
11	12	13	14	15
Elapsed time is 1644.283130 seconds.	<i>Elapsed time is</i> 1598.121273 <i>seconds.</i>	Elapsed time is 1637.790758 seconds.	Elapsed time is 1720.052126 seconds.	<i>Elapsed time is</i> 1607.042593 <i>seconds.</i>
ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2510 XminInfBIDE = 198.4211 xBIDE = 4.9959 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2455 XminInfBIDE = 195.0112 xBIDE = 5.0175 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2457 XminInfBIDE = 195.0681 xBIDE = 5.0171 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2510 XminInfBIDE = 198.4211 xBIDE = 4.9959 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2510 XminInfBIDE = 198.4211 xBIDE = 4.9959 >>

16	17	18	19	20
Elapsed time is 2142.498099 seconds.	Elapsed time is 1854.487796 seconds.	Elapsed time is 1680.523676 seconds.	Elapsed time is 1686.883790 seconds.	Elapsed time is 1824.735000 seconds.
ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2520 XminInfBIDE = 199.0456 xBIDE = 4.9919 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2499 XminInfBIDE = 197.7411 xBIDE = 5.0002 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2511 XminInfBIDE = 198.4992 xBIDE = 4.9954 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2477 XminInfBIDE = 196.3486 xBIDE = 5.0089 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2496 XminInfBIDE = 197.5661 xBIDE = 5.0013 >>
21	22	23	24	25
<i>Elapsed time is 1752.803769 seconds.</i>	Elapsed time is 1608.715228 seconds.	Elapsed time is 1592.095652 seconds.	Elapsed time is 1631.071949 seconds.	Elapsed time is 1675.610423 seconds.
ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2486 XminInfBIDE = 196.9155 xBIDE = 5.0054 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2489 XminInfBIDE = 197.0945 xBIDE = 5.0043 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2483 XminInfBIDE = 196.7424 xBIDE = 5.0065 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2443 XminInfBIDE = 194.1677 xBIDE = 5.0229 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2513 XminInfBIDE = 198.6364 xBIDE = 4.9945 >>
26	27	28	29	30
<i>Elapsed time is 1791.141983 seconds.</i>	Elapsed time is 1629.912409 seconds.	<i>Elapsed time is 1713.656700 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1817.810822 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 1659.894780 seconds.</i>
ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2468 XminInfBIDE = 195.8554 xBIDE = 5.0122 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2513 XminInfBIDE = 198.6388 xBIDE = 4.9945 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2509 XminInfBIDE = 198.3633 xBIDE = 4.9962 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2510 XminInfBIDE = 198.4841 xBIDE = 4.9955 >>	ZminSupBIDE = 2.2500e+03 z = 11.2495 XminInfBIDE = 197.4464 xBIDE = 5.0020 >>

GMED – Ejemplo 2

1	2	3	4	5
<i>Elapsed time is 175.956699 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 176.971454 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 180.729183 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 176.163284 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 172.171905 seconds.</i>
ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2499 XminInfGMED = 197.6922 xGMED = 5.0004 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2499 XminInfGMED = 197.6749 xGMED = 5.0005 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2498 XminInfGMED = 197.6282 xGMED = 5.0008 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2441 XminInfGMED = 194.0732 xGMED = 5.0234 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2495 XminInfGMED = 197.4342 xGMED = 5.0020 >>
6	7	8	9	10
<i>Elapsed time is 177.091706 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 178.185108 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 174.936602 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 174.325081 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 172.319143 seconds.</i>
ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2460 XminInfGMED = 195.2145 xGMED = 5.0161 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2508 XminInfGMED = 198.2487 xGMED = 4.9969 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2487 XminInfGMED = 196.9107 xGMED = 5.0053 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2515 XminInfGMED = 198.7043 xGMED = 4.9940 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2502 XminInfGMED = 197.8748 xGMED = 4.9992 >>
11	12	13	14	15
<i>Elapsed time is 174.763826 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 182.440388 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 189.856483 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 181.290869 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 187.681718 seconds.</i>
ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2509 XminInfGMED = 198.3265 xGMED = 4.9964 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2500 XminInfGMED = 197.7503 xGMED = 5.0000 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2496 XminInfGMED = 197.4767 xGMED = 5.0018 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2507 XminInfGMED = 198.2253 xGMED = 4.9970 >>	ZminSupGMED = 2.2500e+03 z = 11.2505 XminInfGMED = 198.0691 xGMED = 4.9980 >>

16	17	18	19	20
<i>Elapsed time is 182.217430 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 171.731896 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 170.294903 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 170.792375 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 189.320432 seconds.</i>
ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03
z = 11.2500	z = 11.2498	z = 11.2499	z = 11.2497	z = 11.2501
XminInfGMED = 197.7727	XminInfGMED = 197.6270	XminInfGMED = 197.6721	XminInfGMED = 197.5834	XminInfGMED = 197.8244
xGMED = 4.9999	xGMED = 5.0008	xGMED = 5.0005	xGMED = 5.0011	xGMED = 4.9996
>>	>>	>>	>>	>>
21	22	23	24	25
<i>Elapsed time is 170.408169 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 166.182963 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 170.384622 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 170.066570 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 167.610446 seconds.</i>
ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03
z = 11.2513	z = 11.2495	z = 11.2502	z = 11.2498	z = 11.2502
XminInfGMED = 198.5813	XminInfGMED = 197.4502	XminInfGMED = 197.8975	XminInfGMED = 197.6417	XminInfGMED = 197.9043
xGMED = 4.9948	xGMED = 5.0019	xGMED = 4.9991	xGMED = 5.0007	xGMED = 4.9990
>>	>>	>>	>>	>>
26	27	28	29	30
<i>Elapsed time is 169.171995 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 171.001731 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 178.860364 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 172.024507 seconds.</i>	<i>Elapsed time is 170.012253 seconds.</i>
ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03	ZminSupGMED = 2.2500e+03
z = 11.2498	z = 11.2501	z = 11.2519	z = 11.2506	z = 11.2507
XminInfGMED = 197.6052	XminInfGMED = 197.8062	XminInfGMED = 198.9287	XminInfGMED = 198.1114	XminInfGMED = 198.2049
xGMED = 5.0009	xGMED = 4.9997	xGMED = 4.9926	xGMED = 4.9977	xGMED = 4.9972
>>	>>	>>	>>	>>

Anexo G. Formulación del CNDP

El CNDP se describe en el marco de la programación binivel, como se detalla a continuación. La notación utilizada es la siguiente:

- E *Conjunto de enlaces en la red*
- W *Conjunto de pares origen – destino (OD)*
- P_w *Conjunto de rutas p entre el par w*
- T *Vector de demanda de los pares w , $T = [T_w] \forall w \in W$*
- h *Vector de flujo en las rutas, $h = [h_p^w] \forall p \in P_w, \forall w \in W$*
- x *Vector de flujo en los enlaces, $x = [x_a] \forall a \in E$*
- z *Vector de expansión de capacidad de los enlaces, $z = [z_a] \forall a \in E$*
- u *Vector de límite superior de expansión de capacidad de los enlaces,*
 $u = [u_a] \forall a \in E$
- $G(z)$ *Vector de costos de inversión, $G(z) = [G_a(z_a)] \forall a \in E$*
- θ *Factor de conversión de costo de inversión a tiempo de viaje*
- $\underline{\Delta}$ *Matriz de incidencia enlace – ruta, $\underline{\Delta} = [\delta_{a,p}^w] \forall a \in E, p \in P_w, w \in W$,*
donde $\delta_{a,p}^w = 1$ si el enlace a forma parte de la ruta p que conecta el par w , y
 $\delta_{a,p}^w = 0$ de lo contrario.
- $c_a(x_a, z_a)$ *Función de tiempo de viaje en el enlace a , $\forall a \in E$*
- K_a *Capacidad existente del enlace a , $\forall a \in E$*
- A_a, B_a *Parámetros de la función de tiempo de viaje en el enlace a , $\forall a \in E$*
- f_1 *Función objetivo de nivel superior*
- f_2 *Función objetivo de nivel inferior*

El CNDP es formulado como sigue:

[ULP]

$$\begin{aligned} \mathbf{Min}_z \quad f_1(x, z) &= \sum_{a \in E} (c_a(x_a, z_a)x_a + \theta G_a(z_a)) \\ \text{s.a} \quad &0 \leq z_a \leq u_a \quad \forall a \in E \end{aligned}$$

Donde $x(z)$ es el flujo de equilibrio definido por el problema de minimización del nivel inferior.

[LLP]

$$\begin{aligned} \mathbf{Min}_x \quad f_2 &= \sum_{a \in E} \int_0^{x_a} c_a(w, z_a) dw \\ \text{s.a} \quad & \\ &\sum_{p \in P_w} h_p^w = T_w, \quad \forall w \in W \\ &x_a = \sum_{w \in W} \sum_{p \in P_w} h_p^w \delta_{a,p}^w \quad \forall a \in E \\ &h_p^w \geq 0, \quad \forall p \in P_w, w \in W \end{aligned}$$

Anexo H. Datos de entrada – Redes de prueba 1 y 2 CNDP

Red 1

Demanda (vehículos/por hora) – Red de prueba 1

Destino Origen	6	8	9
1	120	150	100
2	130	200	90
4	80	180	110

Fuente. CHIOU, Suh-Wen.

Parámetros de enlaces – Red de prueba 1

$f_1(x, z) = \sum_{a \in E} (c_a(x_a, z_a)x_a + \theta_a z_a) ; c_a(x_a, z_a) = A_a + B_a \left(\frac{x_a}{K_a + z_a} \right)^4$				
Enlace	A_a	B_a	K_a	θ_a
1	2	0,3	280	-
2	1,5	0,225	290	-
3	3	0,45	280	-
4	1	0,15	280	-
5	1	0,15	600	-
6	2	0,3	300	1,5
7	2	0,3	500	-
8	1	0,15	400	-
9	1,5	0,225	500	1
10	1	0,15	700	1
11	2	0,3	250	1,5
12	1	0,15	300	-
13	1	0,15	350	1
14	1	0,15	220	-

Fuente. CHIOU, Suh-Wen.

Red 2

Demanda (vehículos/por hora) – Red de prueba 2

Destino Origen	1	6
1	-	5
6	10	-

Fuente. XU, Tianze; WEI,Heng y HU, Guanghua.

Parámetros de enlaces – Red de prueba 2

$f_1(x, z) = \sum_{a \in E} (c_a(x_a, z_a)x_a + \theta_a z_a) ; c_a(x_a, z_a) = A_a + B_a \left(\frac{x_a}{K_a + z_a} \right)^4$				
Enlace	A_a	B_a	K_a	θ_a
1	1	10	3	2
2	2	5	10	3
3	3	3	9	5
4	4	20	4	4
5	5	50	3	9
6	2	20	2	1
7	1	10	1	4
8	1	1	10	3
9	2	8	45	2
10	3	3	3	5
11	9	2	2	6
12	4	10	6	8
13	4	25	44	5
14	2	33	20	3
15	5	5	1	6
16	6	1	4,6	1
17	5	9	45	2
18	5	9	45	2

Fuente. XU, Tianze; WEI,Heng y HU, Guanghua.

Anexo I. Código de programación método GMED – Red 1 CNDP

ALGORITMO GMED (MATLAB)

```
%RED 1 [14enlaces, 9nodos, 9paresOD] - GMED
%%
%NPS=Número total de individuos en la población del nivel superior
%FS=Factor de mutación del nivel superior
%CRS=Tasa de cruce del nivel superior
%GmaxS=Número máximo de generaciones del nivel superior
%%

function [ZminSupGMED,popBestSup,XminInfGMED,xGMED]=
AlgoritmoGMED_Red1CNDP(NPS,FS,CRS,GmaxS)

lowS=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; %Límite inferior de expansión de
capacidad
uppS=[0 0 0 0 0 500 0 0 500 500 500 0 500 0]; %Límite superior de
expansión de capacidad

Aa=[2 1.5 3 1 1 2 2 1 1.5 1 2 1 1 1]; %Parámetro de la función de tiempo
de viaje en el enlace a
Ba=[0.3 0.225 0.45 0.15 0.15 0.3 0.3 0.15 0.225 0.15 0.3 0.15 0.15 0.15];
%Parámetro de la función de tiempo de viaje en el enlace a
Ka=[280 290 280 280 600 300 500 400 500 700 250 300 350 220]; %Capacidad
existente del enlace a
teta=[0 0 0 0 0 1.5 0 0 1 1 1.5 0 1 0]; %Costo monetario de incrementar
la capacidad

f1=inline('(Aa.*x + ((Ba.*x).*((x./(Ka+z)).^4)) +
(teta.*z))','z','Aa','Ba','Ka','teta','x');
f2=inline('(Aa.*x + (Ba.*(x.^5)) ./
(5*((Ka+z).^4))','z','Aa','Ba','Ka','x');

DS=length(lowS); %Número total de variables de decisión
(dimensiones) del nivel superior
E=length(lowS); %Número total de enlaces en la red
popSup=zeros(NPS,DS); %Población del nivel superior
newPopSup=zeros(NPS,DS); %Nueva población del nivel superior
popBestSup=zeros(1,DS); %Mejor individuo de la población de nivel
superior
evalSup=zeros(1,NPS); %Valor fitness de nivel superior
trialSup=zeros(1,DS); %Vector de prueba de nivel superior
xviejo=zeros(NPS,DS); %Soluciones de nivel inferior
xGMED=zeros(1,DS); %Mejor solución de nivel inferior
ZminSup_GMED=zeros(1,[]); %Mínimo valor fitness de nivel superior de
cada generación
```

```

%-----Inicialización-----%

% Generación aleatoria de la población inicial de nivel superior

for i=1:NPS
    for j=1:DS
        popSup(i,j)=lowS(j)+rand*(uppS(j)-lowS(j));
    end
end

% Encontrar la mejor solución de la población inicial

for i=1:NPS

    %Escribir GDX

    varSup.name='z';
    varSup.val=popSup(i,:);
    varSup.form='full';
    varSup.type='parameter';
    varSup.dim=1;

    wgdxd('varSup_RED1.gdx',varSup);

    %Leer GDX

    x=gams('RED1_CNDPInfGMED.gms');
    x=x.val;

    %Ordenar en un vector

    xtam=size(x);
    xord=zeros(1,E);

    for j=1:xtam(1,1)
        xord(1,x(j,1))=x(j,2);
    end

    xviejo(i,:)=xord;

end

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

evalSup1=feval(f1,popSup(ibestSup,:),Aa,Ba,Ka,teta,xviejo(ibestSup,:));
%f1: 'z','Aa','Ba','Ka','teta','x'
sumevalSup(1)=0;
for a=1:E
    sumevalSup(1)=sumevalSup(1)+evalSup1(1,a);
end

```

```

ZminSupGMED=sumevalSup (ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup (i, :);

    evalSupi=feval (f1, popSup (i, :), Aa, Ba, Ka, teta, xviejo (i, :));
    %f1: 'z', 'Aa', 'Ba', 'Ka', 'teta', 'x'
    sumevalSup (i)=0;
    for a=1:E
        sumevalSup (i)=sumevalSup (i)+evalSupi (1, a);
    end

    if sumevalSup (i)<ZminSupGMED
        ZminSupGMED=sumevalSup (i);
        ibestSup=i;
    end
end

popBestSup=popSup (ibestSup, :);
xGMED=xviejo (ibestSup, :);
XminInfGMED_Vec=feval (f2, popSup (ibestSup, :), Aa, Ba, Ka, xGMED);
%f2: 'z', 'Aa', 'Ba', 'Ka', 'x'

sumevalInf=0;
for a=1:E
    sumevalInf=sumevalInf+XminInfGMED_Vec (1, a);
end

XminInfGMED=sumevalInf;

%-----Bucle mutación/cruce/selección-----%

Gsup=1

while (Gsup<GmaxS)

for i=1:NPS

% Selección aleatoria de tres vectores de la población

while 1
    v1=floor (rand*NPS)+1;
    if v1~=i;
        break;
    end
end

while 2
    v2=floor (rand*NPS)+1;
    if v2~=i & v2~=v1;
        break;

```

```

        end
    end

    while 3
        v3=floor(rand*NPS)+1;
        if v3~=i & v3~=v2 & v3~=v1;
            break;
        end
    end

    % Creación del vector de prueba

    jrand=floor(rand*DS)+1;

    for j=1:DS

        r=rand;
        if r <= CRS | j==jrand;
            trialSup(j)=popSup(i,j)+FS.*(popSup(v1,j)-
popSup(i,j))+FS.*(popSup(v2,j)-popSup(v3,j)); % ED/target-to-rand/1/bin
        else
            trialSup(j)=popSup(i,j);
        end
    end

    for j=1:DS
        if trialSup(j)>=uppS(j);
            trialSup(j)=uppS(j);
        elseif trialSup(j)<=lowS(j);
            trialSup(j)=lowS(j);
        else
            trialSup(j)=trialSup(j);
        end
    end

    %Escribir GDX

    varSupT.name='z';
    varSupT.val=trialSup;
    varSupT.form='full';
    varSupT.type='parameter';
    varSupT.dim=1;

    wgdx('varSup_RED1.gdx',varSupT);

    %Leer GDX

    x=gams('RED1_CNDPInfgMED.gms');
    x=x.val;

    %Ordenar en un vector

```

```

xtam=size(x);
xord=zeros(1,E);

for j=1:xtam(1,1)
    xord(1,x(j,1))=x(j,2);
end

x=xord;

% Selección del mejor vector (objetivo o trial)

evalTrialSup=feval(f1,trialSup,Aa,Ba,Ka,teta,x);
%f1: 'z','Aa','Ba','Ka','teta','x'
sumevalTrialSup=0;
for a=1:E
    sumevalTrialSup=sumevalTrialSup+evalTrialSup(1,a);
end

if sumevalTrialSup<=sumevalSup(i)
    newPopSup(i,:)=trialSup;
    sumevalSup(i)=sumevalTrialSup;
else
    newPopSup(i,:)=popSup(i,:);
end

end

ZminSup_GMED(1,Gsup)=ZminSupGMED;

%-----Nueva generación-----%

popSup(:,:)=newPopSup(:,:);
Gsup=Gsup+1

% Encontrar la mejor solución de la nueva generación

for i=1:NPS

    %Escribir GDX

    varSupN.name='z';
    varSupN.val=popSup(i,:);
    varSupN.form='full';
    varSupN.type='parameter';
    varSupN.dim=1;

    wgdxd('varSup_RED1.gdx',varSupN);

    %Leer GDX

```

```

x=gams ('RED1_CNDPInfgMED.gms');
x=x.val;

%Ordenar en un vector

xtam=size(x);
xord=zeros(1,E);

for j=1:xtam(1,1)
    xord(1,x(j,1))=x(j,2);
end

xviejo(i,:)=xord;

end

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

evalSup1=feval(f1,popSup(ibestSup,:),Aa,Ba,Ka,teta,xviejo(ibestSup,:));
%f1: 'z','Aa','Ba','Ka','teta','x'
sumevalSup(1)=0;
for a=1:E
    sumevalSup(1)=sumevalSup(1)+evalSup1(1,a);
end

ZminSupGMED=sumevalSup(ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);

    evalSupi=feval(f1,popSup(i,:),Aa,Ba,Ka,teta,xviejo(i,:));
    %f1:'z','Aa','Ba','Ka','teta','x'
    sumevalSup(i)=0;
    for a=1:E
        sumevalSup(i)=sumevalSup(i)+evalSupi(1,a);
    end

    if sumevalSup(i)<ZminSupGMED
        ZminSupGMED=sumevalSup(i);
        ibestSup=i;
    end
end

popBestSup=popSup(ibestSup,:);
xGMED=xviejo(ibestSup,:);
XminInfgMED_Vec=feval(f2,popSup(ibestSup,:),Aa,Ba,Ka,xGMED);
%f2:'z','Aa','Ba','Ka','x'

sumevalInf=0;
for a=1:E
    sumevalInf=sumevalInf+XminInfgMED_Vec(1,a);

```

```

end

XminInfGMED=sumevalInf;

ZminSup_GMED(1,Gsup)=ZminSupGMED;

end

%Gráfica de ZminSupGMED versus Generación
Gsup=[1:GmaxS];
plot(Gsup,ZminSup_GMED,'--
g','linewidth',2,'marker','o','markersize',8,'markerfacecolor','g','marke
redcolor','b')
grid on
title('ZminSupGMED versus Generación','fontsize',12,'color','b')
xlabel('Generación','fontsize',10,'color','b')
ylabel('ZminSupGMED','fontsize',10,'color','b')

```

PROBLEMA DE NIVEL INFERIOR (GAMS)

```

$ontext

Resolver el problema de nivel inferior de la RED 1 [14 enlaces, 9 nodos y
9 pares OD] - GMED

$offtext

$set matout "'matsol.gdx', x ";

$if exist matdata.gms $include matdata.gms

set

a Enlaces en la red /1*14/
p Rutas en la red /1*33/
w Pares origen-destino /1*9/

Pw(p,w) Rutas p entre el par w

      / (1,2,3,4). 1
      (1,2). 2
      (1). 3
      (1*11). 4
      (1,2,3,4). 5
      (1,2,3,4). 6
      (1,2,3,4). 7

```

(1). 8
 (1,2). 9/;

parameters

z(a) 'Variable de nivel superior (expansión de capacidad del enlace a)'

Aa(a) P. de la función de tiempo de viaje en el enlace a	/1	2.0
	2	1.5
	3	3.0
	4	1.0
	5	1.0
	6	2.0
	7	2.0
	8	1.0
	9	1.5
	10	1.0
	11	2.0
	12	1.0
	13	1.0
	14	1.0/

Ba(a) P. de la función de tiempo de viaje en el enlace a	/1	0.300
	2	0.225
	3	0.450
	4	0.150
	5	0.150
	6	0.300
	7	0.300
	8	0.150
	9	0.225
	10	0.150
	11	0.300
	12	0.150
	13	0.150
	14	0.150/

Ka(a) Capacidad existente del enlace a	/1	280
	2	290
	3	280
	4	280
	5	600
	6	300
	7	500
	8	400
	9	500
	10	700
	11	250
	12	300
	13	350
	14	220/

T(w) Demanda de los pares w	/1	120
-----------------------------	----	-----

```

2      130
3      80
4      100
5      90
6      110
7      150
8      200
9      180/;

```

```

$gdxin varSup_RED1.gdx
$load z
$gdxin

```

```
table
```

```
d(a,p,w) Si el enlace a forma parte de la ruta p que conecta el par w
```

	1	2	3	4	5	6
7	8	9				
1.1	1			1		
1						
1.2	1			1		
1.10				1		
1.11				1		
2.3						
1						
2.4	1					
1						
2.6				1		
2.7				1		
2.8				1		
2.9				1		
3.2						
1						
3.3	1			1		
3.4				1		
3.5				1		
4.1	1	1		1	1	
5.1						
1		1				
5.2	1	1		1	1	
5.3					1	
5.4					1	
5.10				1		
5.11				1		
6.1	1	1		1	1	
7.1			1			1
1						
7.2						1
7.3						1
1						

7.4	1						
7.6				1			
7.7				1			
7.8				1			
8.2							
1							
8.4							1
1							
8.9				1			
9.1			1				1
9.2	1	1		1	1		
9.3	1			1			
9.4	1						
9.6				1			
10.1							
1	1	1					
10.2							
1							
10.3							1
1							
10.4					1		
10.5				1			
10.8				1			
10.11				1			
11.2							1
11.3					1		
11.4				1			
11.7				1			
11.10				1			
12.1				1	1		1
12.2				1	1		
12.3				1			
12.6				1			
13.2							
1							
13.4							1
1							
13.9				1			
14.3							1
14.4					1		1
14.5				1			
14.8				1			
14.9				1			
14.11				1			
;							

variables

h(p,w) Flujo en la ruta p entre el par w,
x(a) Flujo en el enlace a,
evalInf Valor de la función objetivo de nivel inferior;

positive variables h;

```
equations
```

```
f2 Función objetivo de nivel inferior
```

```
TDEM(w) Restricción de conservación del flujo
```

```
FLUJOA(a) Relación del flujo en el enlace con el flujo en las rutas  
(flujo en el enlace a);
```

```
f2.. evalInf
```

```
=e=sum(a, ((Aa(a)*x(a))+((Ba(a)*((x(a))**5))/(5*((Ka(a)+z(a))**4)))));
```

```
TDEM(w).. sum(Pw(p,w),h(p,w)) =e= T(w);
```

```
FLUJOA(a).. x(a)=e=sum(w,sum(Pw(p,w),h(p,w)*d(a,p,w)));
```

```
model RED1_CNDPInfGMED /all/;
```

```
solve RED1_CNDPInfGMED using nlp minimizing evalInf;
```

```
execute_unload %matout%;
```

En la ventana de comandos de MATLAB:

```
clc  
clear all  
tic  
NPS=20;  
FS=0.8;  
CRS=0.8;  
GmaxS=150;  
[ZminSupGMED z XminInfGMED xGMED]=  
AlgoritmoGMED_Red1CNDP(NPS,FS,CRS,GmaxS)  
toc
```

Anexo J. Código de programación método GMED – Red 2 CNDP

ALGORITMO GMED (MATLAB)

```
%RED 2 [18enlaces, 6nodos, 2paresOD] - GMED
%%
%NPS=Número total de individuos en la población del nivel superior
%FS=Factor de mutación del nivel superior
%CRS=Tasa de cruce del nivel superior
%GmaxS=Número máximo de generaciones del nivel superior
%%

function [ZminSupGMED,popBestSup,XminInfGMED,xGMED]=
AlgoritmoGMED_Red2CNDP(NPS,FS,CRS,GmaxS)

lowS=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; %Límite inferior de
expansión de capacidad
uppS=[20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20]; %Límite
superior de expansión de capacidad

Aa=[1 2 3 4 5 2 1 1 2 3 9 4 4 2 5 6 5 5]; %Parámetro de la función de
tiempo de viaje en el enlace a
Ba=[10 5 3 20 50 20 10 1 8 3 2 10 25 33 5 1 9 9]; %Parámetro de la
función de tiempo de viaje en el enlace a
Ka=[3 10 9 4 3 2 1 10 45 3 2 6 44 20 1 4.6 45 45]; %Capacidad existente
del enlace a
teta=[2 3 5 4 9 1 4 3 2 5 6 8 5 3 6 1 2 2]; %Costo monetario de
incrementar la capacidad del enlace a

f1=inline('(Aa.*x + ((Ba.*x).*(x./(Ka+z)).^4)) +
(teta.*z)'),'z','Aa','Ba','Ka','teta','x');
f2=inline('(Aa.*x + (Ba.*(x.^5)) ./
(5*(Ka+z).^4))'),'z','Aa','Ba','Ka','x');

DS=length(lowS); %Número total de variables de decisión
(dimensiones) del nivel superior
E=length(lowS); %Número total de enlaces en la red
popSup=zeros(NPS,DS); %Población del nivel superior
newPopSup=zeros(NPS,DS); %Nueva población del nivel superior
popBestSup=zeros(1,DS); %Mejor individuo de la población de nivel
superior
evalSup=zeros(1,NPS); %Valor fitness de nivel superior
trialSup=zeros(1,DS); %Vector de prueba de nivel superior
xviejo=zeros(NPS,DS); %Soluciones de nivel inferior
xGMED=zeros(1,DS); %Mejor solución de nivel inferior
ZminSup_GMED=zeros(1,[]); %Mínimo valor fitness de nivel superior de
cada generación
```

```

%-----Inicialización-----%

% Generación aleatoria de la población inicial de nivel superior

for i=1:NPS
    for j=1:DS
        popSup(i,j)=lowS(j)+rand*(upps(j)-lowS(j));
    end
end

% Encontrar la mejor solución de la población inicial

for i=1:NPS

    %Escribir GDX

    varSup.name='z';
    varSup.val=popSup(i,:);
    varSup.form='full';
    varSup.type='parameter';
    varSup.dim=1;

    wgdxd('varSup_RED2.gdx',varSup);

    %Leer GDX

    x=gams('RED2_CNDPInfGMED.gms');
    x=x.val;

    %Ordenar en un vector

    xtam=size(x);
    xord=zeros(1,E);

    for j=1:xtam(1,1)
        xord(1,x(j,1))=x(j,2);
    end

    xviejo(i,:)=xord;

end

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

evalSup1=feval(f1,popSup(ibestSup,:),Aa,Ba,Ka,teta,xviejo(ibestSup,:));
%f1: 'z','Aa','Ba','Ka','teta','x'

sumevalSup(1)=0;
for a=1:E
    sumevalSup(1)=sumevalSup(1)+evalSup1(1,a);
end

```

```

end

ZminSupGMED=sumevalSup(ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);

    evalSupi=feval(f1,popSup(i,:),Aa,Ba,Ka,teta,xviejo(i,:));
    %f1: 'z','Aa','Ba','Ka','teta','x'

    sumevalSup(i)=0;
    for a=1:E
        sumevalSup(i)=sumevalSup(i)+evalSupi(1,a);
    end

    if sumevalSup(i)<ZminSupGMED
        ZminSupGMED=sumevalSup(i);
        ibestSup=i;
    end

end

popBestSup=popSup(ibestSup,:);
xGMED=xviejo(ibestSup,:);
XminInfGMED_Vec=feval(f2,popSup(ibestSup,:),Aa,Ba,Ka,xGMED);
%f2:'z','Aa','Ba','Ka','x'

sumevalInf=0;
for a=1:E
    sumevalInf=sumevalInf+XminInfGMED_Vec(1,a);
end

XminInfGMED=sumevalInf;

%-----Bucle mutación/cruce/selección-----%

Gsup=1

while (Gsup<GmaxS)

for i=1:NPS

% Selección aleatoria de tres vectores de la población

while 1
    v1=floor(rand*NPS)+1;
    if v1~=i;
        break;
    end
end

end

```

```

while 2
    v2=floor(rand*NPS)+1;
    if v2~=i & v2~=v1;
        break;
    end
end

while 3
    v3=floor(rand*NPS)+1;
    if v3~=i & v3~=v2 & v3~=v1;
        break;
    end
end

% Creación del vector de prueba

jrand=floor(rand*DS)+1;

for j=1:DS

r=rand;
    if r <= CRS | j==jrand
        trialSup(j)=popSup(i,j)+FS.*(popSup(v1,j)-
popSup(i,j))+FS.*(popSup(v2,j)-popSup(v3,j)); % ED/target-to-rand/1/bin
    else
        trialSup(j)=popSup(i,j);
    end
end

for j=1:DS
    if trialSup(j)>=uppS(j)
        trialSup(j)=uppS(j);
    elseif trialSup(j)<=lowS(j)
        trialSup(j)=lowS(j);
    else
        trialSup(j)=trialSup(j);
    end
end

%Escribir GDX

varSupT.name='z';
varSupT.val=trialSup;
varSupT.form='full';
varSupT.type='parameter';
varSupT.dim=1;

wgdx('varSup_RED2.gdx',varSupT);

%Leer GDX

x=gams('RED2_CNDPInfGMED.gms');

```

```

x=x.val;

%Ordenar en un vector

xtam=size(x);
xord=zeros(1,E);

for j=1:xtam(1,1)
    xord(1,x(j,1))=x(j,2);
end

x=xord;

% Selección del mejor vector (objetivo o trial)

evalTrialSup=feval(f1,trialSup,Aa,Ba,Ka,teta,x);
%f1: 'z','Aa','Ba','Ka','teta','x'

sumevalTrialSup=0;
for a=1:E
    sumevalTrialSup=sumevalTrialSup+evalTrialSup(1,a);
end

if sumevalTrialSup<=sumevalSup(i)
    newPopSup(i,:)=trialSup;
    sumevalSup(i)=sumevalTrialSup;
else
    newPopSup(i,:)=popSup(i,:);
end

end

ZminSup_GMED(1,Gsup)=ZminSupGMED;

%-----Nueva generación-----%

popSup(:,:)=newPopSup(:,:);
Gsup=Gsup+1

% Encontrar la mejor solución de la nueva generación

for i=1:NPS

    %Escribir GDX

    varSupN.name='z';
    varSupN.val=popSup(i,:);
    varSupN.form='full';
    varSupN.type='parameter';
    varSupN.dim=1;

```

```

    wgdxd('varSup_RED2.gdx',varSupN);

%Leer GDx

x=gams('RED2_CNDPInfGMED.gms');
x=x.val;

%Ordenar en un vector

xtam=size(x);
xord=zeros(1,E);

for j=1:xtam(1,1)
    xord(1,x(j,1))=x(j,2);
end

xviejo(i,:)=xord;

end

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población
varSup=popSup(ibestSup,:);

evalSup1=feval(f1,popSup(ibestSup,:),Aa,Ba,Ka,teta,xviejo(ibestSup,:));
%fl: 'z','Aa','Ba','Ka','teta','x'

sumevalSup(1)=0;
for a=1:E
    sumevalSup(1)=sumevalSup(1)+evalSup1(1,a);
end

ZminSupGMED=sumevalSup(ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes
    varSup=popSup(i,:);

    evalSupi=feval(f1,popSup(i,:),Aa,Ba,Ka,teta,xviejo(i,:));
    %fl: 'z','Aa','Ba','Ka','teta','x'

    sumevalSup(i)=0;
    for a=1:E
        sumevalSup(i)=sumevalSup(i)+evalSupi(1,a);
    end

    if sumevalSup(i)<ZminSupGMED
        ZminSupGMED=sumevalSup(i);
        ibestSup=i;
    end
end

end

```

```

popBestSup=popSup(ibestSup,:);
xGMED=xviejo(ibestSup,:);
XminInfGMED_Vec=feval(f2,popSup(ibestSup,:),Aa,Ba,Ka,xGMED);
%f2:'z','Aa','Ba','Ka','x'

sumevalInf=0;
for a=1:E
    sumevalInf=sumevalInf+XminInfGMED_Vec(1,a);
end

XminInfGMED=sumevalInf;

ZminSup_GMED(1,Gsup)=ZminSupGMED;

end

%Gráfica de ZminSupGMED versus Generación
Gsup=[1:GmaxS];
plot(Gsup,ZminSup_GMED,'--
g','linewidth',2,'marker','o','markersize',8,'markerfacecolor','g','marke
redgecolor','b')
grid on
title('ZminSupGMED versus Generación','fontsize',12,'color','b')
xlabel('Generación','fontsize',10,'color','b')
ylabel('ZminSupGMED','fontsize',10,'color','b')

```

PROBLEMA DE NIVEL INFERIOR (GAMS)

```

$ontext

Resolver el problema de nivel inferior de la RED 2 [18 enlaces, 6 nodos y
2 pares OD] - GMED

$offtext

$set matout "'matsol.gdx', x ";

$if exist matdata.gms $include matdata.gms

set

a Enlaces en la red /1*18/
p Rutas en la red /1*12/
w Pares origen-destino /1,2/

Pw(p,w) Rutas p entre el par w

```

```

/(1*12). 1
(1*12). 2/;

```

parameters

z(a) 'Variable de nivel superior (expansión de capacidad del enlace a)'

Aa(a) P. de la función de tiempo de viaje en el enlace a	/1	1
	2	2
	3	3
	4	4
	5	5
	6	2
	7	1
	8	1
	9	2
	10	3
	11	9
	12	4
	13	4
	14	2
	15	5
	16	6
	17	5
	18	5/

Ba(a) P. de la función de tiempo de viaje en el enlace a	/1	10
	2	5
	3	3
	4	20
	5	50
	6	20
	7	10
	8	1
	9	8
	10	3
	11	2
	12	10
	13	25
	14	33
	15	5
	16	1
	17	9
	18	9/

Ka(a) Capacidad existente del enlace a	/1	3
	2	10
	3	9
	4	4
	5	3
	6	2
	7	1
	8	10

3.6	0	0
3.7	0	0
3.8	0	0
3.9	0	1
3.10	0	1
3.11	0	0
3.12	0	0
4.1	0	0
4.2	0	0
4.3	1	0
4.4	1	0
4.5	0	0
4.6	0	0
4.7	0	1
4.8	1	1
4.9	0	0
4.10	0	0
4.11	0	1
4.12	0	1
5.1	1	0
5.2	1	0
5.3	0	0
5.4	0	0
5.5	0	0
5.6	0	0
5.7	1	0
5.8	1	0
5.9	0	0
5.10	0	0
5.11	0	0
5.12	0	0
6.1	0	0
6.2	0	0
6.3	0	0
6.4	0	0
6.5	0	1
6.6	0	1
6.7	0	1
6.8	0	1
6.9	0	0
6.10	0	0
6.11	0	1
6.12	0	1
7.1	0	0
7.2	0	0
7.3	0	1
7.4	0	1
7.5	0	0
7.6	0	0
7.7	1	0
7.8	0	0
7.9	0	0
7.10	0	0
7.11	1	0

7.12	1	0
8.1	0	0
8.2	0	0
8.3	1	0
8.4	1	0
8.5	1	0
8.6	1	0
8.7	0	0
8.8	0	0
8.9	0	0
8.10	0	0
8.11	0	0
8.12	0	0
9.1	0	1
9.2	0	1
9.3	0	0
9.4	0	0
9.5	0	0
9.6	0	0
9.7	0	1
9.8	0	1
9.9	0	0
9.10	0	0
9.11	0	0
9.12	0	0
10.1	0	0
10.2	1	0
10.3	0	1
10.4	0	0
10.5	0	0
10.6	0	1
10.7	1	0
10.8	0	0
10.9	0	0
10.10	0	1
10.11	0	0
10.12	0	1
11.1	1	0
11.2	0	0
11.3	1	0
11.4	0	0
11.5	0	0
11.6	1	0
11.7	0	0
11.8	1	0
11.9	0	0
11.10	1	0
11.11	0	0
11.12	1	0
12.1	0	0
12.2	0	0
12.3	0	1
12.4	0	1
12.5	0	1

12.6	0	1
12.7	0	0
12.8	0	0
12.9	0	0
12.10	0	0
12.11	0	0
12.12	0	0
13.1	0	0
13.2	0	1
13.3	1	0
13.4	0	0
13.5	0	0
13.6	1	0
13.7	0	1
13.8	0	0
13.9	0	0
13.10	1	0
13.11	0	0
13.12	1	0
14.1	0	0
14.2	1	0
14.3	0	0
14.4	1	0
14.5	1	0
14.6	0	0
14.7	1	0
14.8	0	0
14.9	1	0
14.10	0	0
14.11	1	0
14.12	0	0
15.1	0	1
15.2	0	0
15.3	0	1
15.4	0	0
15.5	0	0
15.6	0	1
15.7	0	0
15.8	0	1
15.9	0	0
15.10	0	1
15.11	0	0
15.12	0	1
16.1	0	0
16.2	0	1
16.3	0	0
16.4	0	1
16.5	0	1
16.6	0	0
16.7	0	1
16.8	0	0
16.9	0	1
16.10	0	0
16.11	0	1

```

16.12    0      0
17.1     0      0
17.2     0      0
17.3     0      0
17.4     0      0
17.5     0      0
17.6     0      0
17.7     0      0
17.8     0      0
17.9     1      0
17.10    1      0
17.11    1      0
17.12    1      0
18.1     0      0
18.2     0      0
18.3     0      0
18.4     0      0
18.5     0      0
18.6     0      0
18.7     0      0
18.8     0      0
18.9     0      1
18.10    0      1
18.11    0      1
18.12    0      1;

```

variables

h(p,w) Flujo en la ruta p entre el par w,
x(a) Flujo en el enlace a,
evalInf Valor de la función objetivo de nivel inferior;

positive variables h;

equations

f2 Función objetivo de nivel inferior
TDEM(w) Restricción de conservación del flujo
FLUJOA(a) Relación del flujo en el enlace con el flujo en las rutas
(flujo en el enlace a);

```

f2.. evalInf
=e=sum(a, ((Aa(a)*x(a))+((Ba(a)*((x(a))**5))/(5*((Ka(a)+z(a))**4)))));
TDEM(w).. sum(Pw(p,w),h(p,w)) =e= T(w);
FLUJOA(a).. x(a)=e=sum(w,sum(Pw(p,w),h(p,w)*d(a,p,w)));

```

model RED2_CNDPInfGMED /all/;

solve RED2_CNDPInfGMED using nlp minimizing evalInf;

execute_unload %matout%;

En la ventana de comandos de MATLAB:

```
clc
clear all
tic
NPS=20;
FS=0.8;
CRS=0.8;
GmaxS=150;
[ZminSupGMED z XminInfGMED xGMED]=
AlgoritmoGMED_Red2CNDP(NPS,FS,CRS,GmaxS)
toc
```

Anexo K. Resultados GMED del CNDP

RED 1

1	2	3	4	5	6
ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03
z =	z =	z =	z =	z =	z =
1.0e-13 * Columns 1 through 9 0 0 0 0 0 0 0.2386 0 0 0.2527 Columns 10 through 14 0.5694 0.0808 0 0 0	1.0e-13 * Columns 1 through 8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 Columns 9 through 14 0 0.1404 0.0498 0 0 0	1.0e-12 * Columns 1 through 8 0 0 0 0 0 0 0.0092 0 0 Columns 9 through 14 0.0007 0.3674 0.0071 0 0.0135 0	1.0e-13 * Columns 1 through 8 0 0 0 0 0 0 0.7159 0 0 Columns 9 through 14 0.4531 0 0 0 0.0004 0	1.0e-07 * Columns 1 through 8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 Columns 9 through 14 0 0.2515 0.1316 0 0 0	1.0e-13 * Columns 1 through 8 0 0 0 0 0 0 0.4047 0 0 Columns 9 through 14 0.3173 0.4778 0.0175 0 0.1215 0
XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
Columns 1 through 9 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 Columns 10 through 14 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115
>>	>>	>>	>>	>>	>>

7	8	9	10	11	12
ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03
z =	z =	z =	z =	z =	z =
1.0e-12 * Columns 1 through 8 0 0 0 0 0 0.0071 0 0 Columns 9 through 14 0.0053 0.2772 0.0016 0 0.0087 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1.0e-09 * Columns 1 through 8 0 0 0 0 0 0 0 0 Columns 9 through 14 0.1633 0.0060 0 0 0.0903 0	1.0e-12 * Columns 1 through 8 0 0 0 0 0 0 0 0 Columns 9 through 14 0 0.0262 0.0019 0 0.2199 0	1.0e-13 * Columns 1 through 8 0 0 0 0 0 0 0 0 Columns 9 through 14 0.0967 0.3900 0.0232 0 0.1199 0	1.0e-13 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.6170 0 0 0.2619 0 0 0 Columns 13 through 14 0.1796 0
XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03	XminInfGMED= 3.5950e+03
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 8 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 Columns 9 through 14 330.0000 250.3962 147.8885 0 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115
>>	>>	>>	>>	>>	>>

13	14	15	16	17	18
ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03
z =	z =	z =	z =	z =	z =
1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.0329 0 0 0.0142 0 0 0 Columns 13 through 14 0.2551 0	1.0e-13 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.2487 0 0 0.5144 0 0.1289 0 Columns 13 through 14 0 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.0321 0 0 0 0.1990 0.0112 0 Columns 13 through 14 0.0201 0.3790 0 0 0 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.0321 0 0 0 0.1990 0.0112 0 Columns 13 through 14 0.0125 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.0045 0 0 0.0509 0.2617 0.0018 0 Columns 13 through 14 0 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.0004 0 0 0.0453 0.2090 0.0041 0 Columns 13 through 14 0.0035 0
XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115
>>	>>	>>	>>	>>	>>

19	20	21	22	23	24
ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03
z =	z =	z =	z =	z =	z =
1.0e-13 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0 0.1560 0 0 0.0190 0 0.1274 0 Columns 13 through 14 0.0023 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.0575 0 0 0.0453 0.1069 0.0039 0 Columns 13 through 14 0.0184 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0 0.0065 0 0 0 0.3076 0.0023 0 Columns 13 through 14 0 0	1.0e-13 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0 0.4013 0 0 0.7019 0.3558 0.0504 0 Columns 13 through 14 0.1477 0	1.0e-13 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.3856 0 0 0.3860 0.6837 0.1406 0 Columns 13 through 14 0.0289 0
XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115
>>	>>	>>	>>	>>	>>

25	26	27	28	29	30
ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03	ZminSupGMED = 3.8385e+03
z =	z =	z =	z =	z =	z =
1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.0081 0 0 0.0060 0.2742 0 0 Columns 13 through 14 0 0	1.0e-13 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.1279 0 0 0.0675 0.2599 0.0058 0 Columns 13 through 14 0 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0 0 0 0.0501 0.1564 0.0033 0 Columns 13 through 14 0 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.0154 0 0 0.0326 0.1122 0.0037 0 Columns 13 through 14 0.0043 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.0587 0 0 0 0.3760 0.0013 0 Columns 13 through 14 0 0	1.0e-12 * Columns 1 through 12 0 0 0 0 0 0.0017 0 0 0.0393 0.1217 0.0084 0 Columns 13 through 14 0.0026 0
XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03	XminInfGMED = 3.5950e+03
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115	Columns 1 through 12 58.2934 141.7153 169.9912 0 478.2934 0 80.0000 431.7153 330.0000 250.3962 147.8885 0 Columns 13 through 14 431.7153 152.1115
>>	>>	>>	>>	>>	>>

RED 2

1	2	3	4	5	6
ZminSupGMED = 192.3576	ZminSupGMED = 191.8415	ZminSupGMED = 191.8529	ZminSupGMED = 191.0679	ZminSupGMED = 191.4834	ZminSupGMED = 191.3232
z =	z =	z =	z =	z =	z =
<i>Columns 1 through 8</i> 0 0.1274 0.0397 0 0 6.0377 0.0856 0.0793 <i>Columns 9 through 16</i> 0.0595 0.0326 0 0.0023 0 0.0147 0.0120 6.8375 <i>Columns 17 through 18</i> 0.0154 0	<i>Columns 1 through 8</i> 0.0582 0.0067 0.0058 0.0097 0.0098 5.8612 0 0.0685 <i>Columns 9 through 16</i> 0 0.0016 0.0121 0.0280 0.0192 0 0.0155 6.7502 <i>Columns 17 through 18</i> 0 0	<i>Columns 1 through 8</i> 0.1368 0.0104 0.0003 0.0005 0.0011 5.0051 0.0674 0.0914 <i>Columns 9 through 16</i> 0.0912 0 0.0001 0 0 0.0065 0 7.2689 <i>Columns 17 through 18</i> 0.0215 0.0148	<i>Columns 1 through 8</i> 0.0176 0 0.0067 0.0077 0 5.0719 0.0042 0.0036 <i>Columns 9 through 16</i> 0.0025 0 0.0004 0.0072 0.0275 0 0 7.7112 <i>Columns 17 through 18</i> 0 0.0245	<i>Columns 1 through 8</i> 0.0013 0.1081 0.0005 0 0.0045 4.9000 0 0 <i>Columns 9 through 16</i> 0.0453 0.0259 0.0055 0.0092 0.0097 0 0 7.0689 <i>Columns 17 through 18</i> 0.0166 0	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0068 0.0153 0 0 0 5.1233 0.0039 0.0216 0 <i>Columns 10 through 18</i> 0.0071 0.0271 0.0103 0.0082 0.0210 0 8.2244 0 0.0167
XminInfGMED = 158.3304	XminInfGMED = 158.4181	XminInfGMED = 158.8043	XminInfGMED = 158.6789	XminInfGMED = 158.8953	XminInfGMED = 158.5682
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
<i>Columns 1 through 8</i> 0 5.0000 6.1812 0 0 3.8188 0 5.0000 <i>Columns 9 through 16</i> 0.9795 0 0 3.8188 0 5.0000 0.9795 9.0205 <i>Columns 17 through 18</i> 0 5.2017	<i>Columns 1 through 8</i> 0 5.0000 6.1987 0 0 3.8013 0 5.0000 <i>Columns 9 through 16</i> 0.9836 0 0 3.8013 0 5.0000 0.9836 9.0164 <i>Columns 17 through 18</i> 0 5.2151	<i>Columns 1 through 8</i> 0 5.0000 6.3777 0 0 3.6223 0 5.0000 <i>Columns 9 through 16</i> 0.9651 0 0 3.6223 0 5.0000 0.9651 9.0349 <i>Columns 17 through 18</i> 0 5.4126	<i>Columns 1 through 8</i> 0 5.0000 6.3612 0 0 3.6388 0 5.0000 <i>Columns 9 through 16</i> 0.9626 0 0 3.6388 0 5.0000 0.9626 9.0374 <i>Columns 17 through 18</i> 0 5.3986	<i>Columns 1 through 8</i> 0 5.0000 6.4003 0 0 3.5997 0 5.0000 <i>Columns 9 through 16</i> 0.9664 0 0 3.5997 0 5.0000 0.9664 9.0336 <i>Columns 17 through 18</i> 0 5.4339	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.3482 0 0 3.6518 0 5.0000 0.9601 <i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.6518 0 5.0000 0.9601 9.0399 0 5.3880 >>
>>	>>	>>	>>	>>	>>

7	8	9	10	11	12
ZminSupGMED = 191.6490	ZminSupGMED = 191.9162	ZminSupGMED = 191.6464	ZminSupGMED = 192.2103	ZminSupGMED = 191.6474	ZminSupGMED = 192.2801
z =	z =	z =	z =	z =	z =
<i>Columns 1 through 9</i> 0 0.0337 0.0719 0.0426 0 4.6808 0 0.0778 0	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0088 0 0.0093 0 0.0026 6.0320 0 0.0138 0.0370	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0706 0.0162 0.0203 0.0255 0 5.2816 0.0349 0.0028 0	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0076 0.0149 0.1573 0.0137 0.0068 5.0069 0.0041 0.0983 0.0261	<i>Columns 1 through 9</i> 0 0 0.0004 0 0 6.0524 0.0055 0.0708 0.0113	<i>Columns 1 through 9</i> 0 0.0996 0.1095 0 0.0126 4.9663 0.0191 0 0
<i>Columns 10 through 18</i> 0.0133 0 0.0073 0.0262 0 0 7.6169 0.0008 0	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0252 0.0242 0 0 0.2049 0 7.9747 0 0	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0.0004 0.0015 0.0110 0.0465 0 7.7832 0.0240 0.1018	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0064 0 0.0042 0 0.1255 0.0433 7.6654 0 0	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0047 0.0247 0 0.0360 0.0059 0 7.2166 0.0775 0	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0107 0 0.0294 0.0445 0.0081 0 7.9978 0.0358 0.1417
XminInfGMED = 158.9039	XminInfGMED = 158.1764	XminInfGMED = 158.5459	XminInfGMED = 158.5143	XminInfGMED = 158.3115	XminInfGMED = 158.6258
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.4625 0 0 3.5375 0 5.0000 0.9631	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.1801 0 0 3.8199 0 5.0000 0.9612	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.3181 0 0 3.6819 0 5.0000 0.9622	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.3908 0 0 3.6092 0 5.0000 1.0041	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.1761 0 0 3.8239 0 5.0000 0.9654	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.3897 0 0 3.6103 0 5.0000 0.9611
<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.5375 0 5.0000 0.9631 9.0369 0 5.4994	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.8199 0 5.0000 0.9612 9.0388 0 5.2189	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.6819 0 5.0000 0.9622 9.0378 0 5.3559	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.6092 0 5.0000 1.0041 8.9959 0 5.3867	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.8239 0 5.0000 0.9654 9.0346 0 5.2107	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.6103 0 5.0000 0.9611 9.0389 0 5.4286
>>	>>	>>	>>	>>	>>

13	14	15	16	17	18
ZminSupGMED = 191.8912	ZminSupGMED = 191.9503	ZminSupGMED = 191.0929	ZminSupGMED = 191.1321	ZminSupGMED = 192.4219	ZminSupGMED = 191.4109
z =	z =	z =	z =	z =	z =
<i>Columns 1 through 9</i> 0 0.0106 0.0112 0.0291 0 4.5644 0 0 0.1487	<i>Columns 1 through 9</i> 0.1693 0 0.0921 0 0.0089 5.5689 0.0111 0 0	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0072 0 0.0131 0.0271 0.0003 5.5033 0.0058 0.0004 0.0551	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0137 0 0 0 0 5.4459 0.0021 0.0221 0	<i>Columns 1 through 9</i> 0 0 0.0786 0.0262 0 4.3033 0.0021 0 0	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0235 0.0236 0.0225 0.0004 0 5.6828 0.0124 0.0205
<i>Columns 10 through 18</i> 0.0548 0.0014 0.0027 0 0.0101 0.0198 6.8283 0.0336 0.0061	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0228 0.0050 0 0 0.0096 0.0499 7.0568 0.0434 0	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 0 0.0001 0.0096 0.0029 7.6495 0.0168 0	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0135 0.0116 0.0129 0.0029 0.0012 0.0075 7.6453 0.0173 0.0005	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0013 0.0162 0.0049 0.0109 0.0204 0.1369 8.6767 0.0004 0.0344	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 0 0.0054 0.0038 0.0043 0 7.7411 0.1339 0.0242
XminInfGMED = 159.1159	XminInfGMED = 158.3512	XminInfGMED = 158.4539	XminInfGMED = 158.4631	XminInfGMED = 158.5824	XminInfGMED = 158.3530
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.4886 0 0 3.5114 0 5.0000 0.9871	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.2679 0 0 3.7321 0 5.0000 1.0143	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.2732 0 0 3.7268 0 5.0000 0.9656	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.2794 0 0 3.7206 0 5.0000 0.9700	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.5683 0 0 3.4317 0 5.0000 1.0887	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.2388 0 0 3.7612 0 5.0000 0.9624
<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.5114 0 5.0000 0.9871 9.0129 0 5.5015	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.7321 0 5.0000 1.0143 8.9857 0 5.2536	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.7268 0 5.0000 0.9656 9.0344 0 5.3075	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.7206 0 5.0000 0.9700 9.0300 0 5.3094	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.4317 0 5.0000 1.0887 8.9113 0 5.4795	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.7612 0 5.0000 0.9624 9.0376 0 5.2764
>>	>>	>>	>>	>>	>>

19	20	21	22	23	24
ZminSupGMED = 192.0080	ZminSupGMED = 191.9540	ZminSupGMED = 191.4063	ZminSupGMED = 191.6246	ZminSupGMED = 191.6171	ZminSupGMED = 191.3302
z =	z =	z =	z =	z =	z =
<i>Columns 1 through 9</i> 0.0182 0.0366 0.0432 0.0684 0.0095 4.5241 0.0430 0 0	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0215 0 0.1013 0.0108 0.0045 5.5146 0.0027 0.0093 0.0485	<i>Columns 1 through 9</i> 0 0.0100 0 0 0.0068 5.1734 0.0043 0.0262 0.0486	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0059 0.0342 0 0.0079 0 5.9605 0.0121 0.0098 0.0124	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0042 0.0042 0.0068 0.0021 0.0029 4.7198 0.0193 0.0503	<i>Columns 1 through 9</i> 0 0.0468 0 0 0 5.4192 0 0.0369 0.0373
<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 0.0155 0.0122 0.0693 0.0083 7.6913 0 0.0140	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0096 0.0026 0.0205 0 0.0280 0.0075 7.3976 0.0629 0.1405	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0041 0.0254 0 0.0046 0.0404 0.0008 7.0575 0.0110 0.0164	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0113 0.0232 0.0145 0.0059 0.0277 0.0267 7.8396 0.0155 0	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0229 0.0313 0.0178 0 0.0194 0.0115 0 7.1619 0.0392 0.0050	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 0.0229 0.0047 0.0099 0.0088 7.3715 0.0081 0.0266
XminInfGMED = 158.9796	XminInfGMED = 158.4299	XminInfGMED = 158.7515	XminInfGMED = 158.1299	XminInfGMED = 159.0039	XminInfGMED = 158.5091
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.5000 0 0 3.5000 0 5.0000 0.9706	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.2730 0 0 3.7270 0 5.0000 0.9715	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.3398 0 0 3.6602 0 5.0000 0.9672	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.1859 0 0 3.8141 0 5.0000 0.9874	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.4479 0 0 3.5521 0 5.0000 0.9658	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.2819 0 0 3.7181 0 5.0000 0.9729
<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.5000 0 5.0000 0.9706 9.0294 0 5.5294	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.7270 0 5.0000 0.9715 9.0285 0 5.3015	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.6602 0 5.0000 0.9672 9.0328 0 5.3726	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.8141 0 5.0000 0.9874 9.0126 0 5.1985	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.5521 0 5.0000 0.9658 9.0342 0 5.4821	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.7181 0 5.0000 0.9729 9.0271 0 5.3091
>>	>>	>>	>>	>>	>>

25	26	27	28	29	30
ZminSupGMED = 190.9888	ZminSupGMED = 191.7317	ZminSupGMED = 191.9142	ZminSupGMED = 192.4985	ZminSupGMED = 191.6116	ZminSupGMED = 191.6973
z =	z =	z =	z =	z =	z =
<i>Columns 1 through 9</i> 0 0.0142 0.0055 0 0.0175 5.4415 0.0017 0.0020 0.0000	<i>Columns 1 through 9</i> 0 0.0087 0.0014 0 0.0024 5.1646 0.0121 0.0188 0.2994	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0524 0 0 0.0126 0 4.8357 0.0094 0.0547 0.0231	<i>Columns 1 through 9</i> 0.1316 0.0752 0.0495 0 0 6.3666 0.0363 0.0118	<i>Columns 1 through 9</i> 0.0272 0.0369 0.0140 0.0125 0 5.2276 0 0.0012	<i>Columns 1 through 9</i> 0 0.0258 0.0287 0 0.0086 5.2619 0.0549 0 0.0733
<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 0 0 0.0035 0 7.6199 0 0.0214	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0.0154 0.0109 0.0088 0.0145 0.0046 7.4031 0 0	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0000 0.0077 0.0118 0 0 0.0406 7.2996 0.1429 0.0809	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0.0102 0 0.0343 0 0.0170 8.0417 0.1299 0.0813	<i>Columns 10 through 18</i> 0.0628 0.0074 0.0067 0.0058 0 0.0692 0.0055 7.6178 0.0623 0.0429	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0.0175 0 0.0174 0.0505 0.0113 7.9409 0 0
XminInfGMED = 158.5003	XminInfGMED = 158.6648	XminInfGMED = 158.7613	XminInfGMED = 157.9710	XminInfGMED = 158.5815	XminInfGMED = 158.4903
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.2846 0 0 3.7154 0 5.0000 0.9630	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.3390 0 0 3.6610 0 5.0000 0.9687	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.4154 0 0 3.5846 0 5.0000 1.0038	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.1342 0 0 3.8658 0 5.0000 0.9772	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.3279 0 0 3.6721 0 5.0000 0.9683	<i>Columns 1 through 9</i> 0 5.0000 6.3235 0 0 3.6765 0 5.0000 0.9722
<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.7154 0 5.0000 0.9630 9.0370 0 5.3215	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.6610 0 5.0000 0.9687 9.0313 0 5.3703	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.5846 0 5.0000 1.0038 8.9962 0 5.4116	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.8658 0 5.0000 0.9772 9.0228 0 5.1570	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.6721 0 5.0000 0.9683 9.0317 0 5.3595	<i>Columns 10 through 18</i> 0 0 3.6765 0 5.0000 0.9722 9.0278 0 5.3513
>>	>>	>>	>>	>>	>>

Anexo L. Factores de corrección para cálculo de la capacidad en carreteras de dos carriles

Factor de corrección por pendiente (F_{pe})

Pend. Asc. %	Longitud de la pendiente (km)											
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
2	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
3	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
4	0.98	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
5	0.98	0.95	0.94	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91
6	0.97	0.95	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89
7	0.96	0.93	0.91	0.89	0.89	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86
8	0.96	0.92	0.89	0.87	0.86	0.85	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.84
9	0.94	0.89	0.85	0.83	0.82	0.81	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
10	0.92	0.85	0.81	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.75	0.74	0.74	0.74
11	0.90	0.81	0.76	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69	0.69	0.68	0.68	0.68
12	0.87	0.76	0.71	0.68	0.67	0.64	0.64	0.63	0.63	0.61	0.61	0.61

Fuente. COLOMBIA. INVIAS, UNIVERSIDAD DEL CAUCA.

Factor por distribución en los dos sentidos (F_d)

Distribución por sentidos A/D	Porcentaje de zonas de no rebase					
	0	20	40	60	80	100
50/50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
60/40	0.90	0.89	0.87	0.86	0.85	0.83
70/30	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74	0.71
80/20	0.75	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63
90/10	0.69	0.66	0.64	0.61	0.58	0.56
100/00	0.64	0.61	0.58	0.56	0.53	0.50

Fuente. COLOMBIA. INVIAS, UNIVERSIDAD DEL CAUCA.

Factor por efecto combinado de ancho de carril y berma (F_{cb})

Ancho utilizable de la berma (m)	Ancho del carril (m)				
	3.65	3.50	3.30	3.00	2.70
1.80	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92
1.50	0.99	0.99	0.98	0.95	0.91
1.20	0.99	0.98	0.97	0.95	0.91
1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.90
0.50	0.98	0.97	0.96	0.93	0.89
0.00	0.97	0.96	0.95	0.92	0.88

Fuente. COLOMBIA. INVIAS, UNIVERSIDAD DEL CAUCA.

Anexo M. Capacidad de tramos y enlaces del corredor Bogotá-Yopal

ENLACE 1: BOGOTÁ – CHIPAQUE – CÁQUEZA

TRAMO	Bogotá – Chipaque – Cáqueza
Tipo de terreno	Montañoso
Pendiente (%)	12
Longitud de la pendiente (km)	2,5
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50
Zonas de no rebase (%)	80
Ancho de la berma (m)	0,5
Ancho del carril (m)	3,5
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,67 * 1 * 0,97 \cong 2080$
CAPACIDAD ENLACE	2080

ENLACE 2: BOGOTÁ – LA CALERA – CÁQUEZA

TRAMO	Bogotá – Patios	Patios – La Calera	La Calera – Choachí – Cáqueza
Tipo de terreno	Plano	Montañoso	Montañoso
Pendiente (%)	1	9	8
Longitud de la pendiente (km)	0,5	2	5
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50	50/50	50/50
Zonas de no rebase (%)	20	80	80
Ancho de la berma (m)	1,5	0	0
Ancho del carril (m)	3,5	3,5	3
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,99 * 1 * 0,99 = 3137$	$3200 * 0,83 * 1 * 0,96 \cong 2550$	$3200 * 0,84 * 1 * 0,92 \cong 2473$
CAPACIDAD ENLACE	2473		

ENLACE 3: CÁQUEZA – VILLAVICENCIO

TRAMO	Cáqueza – El Tablón	El Tablón – Chirajara	Chirajara – Pipiral	Pipiral – Villavicencio
Tipo de terreno	Montañoso	Montañoso	Montañoso	Escarpado
Pendiente (%)	12	12	11	12
Longitud de la pendiente (km)	2	2	2,5	2
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50	50/50	50/50	50/50
Zonas de no rebase (%)	80	100	100	100
Ancho de la berma (m)	1	1,5	0,5	0,5
Ancho del carril (m)	3,5	3,5	3,0	3,0
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,68 * 1 * 0,98$ $\cong 2132$	$3200 * 0,68 * 1 * 0,99$ $\cong 2154$	$3200 * 0,72 * 1 * 0,93$ $\cong 2143$	$3200 * 0,68 * 1 * 0,93$ $\cong 2024$
CAPACIDAD ENLACE	2024			

ENLACE 4: VILLAVICENCIO – AGUACLARA

TRAMO	Villavicencio – Conexión Anillo Vial	Conexión Anillo Vial – Cumaral	Cumaral – Paratebueno	Paratebueno – Barranca de Upía	Barranca de Upía – Villanueva	Villanueva – Aguaclara
Tipo de terreno	Plano	Plano	Ondulado	Ondulado	Ondulado	Ondulado
Pendiente (%)	2	2	5	4	3	5
Longitud de la pendiente (km)	2,5	2	2,5	3	3	3
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50	50/50
Zonas de no rebase (%)	20	20	40	40	40	40
Ancho de la berma (m)	0,5	1,2	1,5	0	0	0
Ancho del carril (m)	3,65	3,65	3,65	3,5	3,5	3,5
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,97 * 1 * 0,98 \cong 3042$	$3200 * 0,98 * 1 * 0,99 \approx 3105$	$3200 * 0,92 * 1 * 0,99 \cong 2915$	$3200 * 0,94 * 1 * 0,96 \cong 2888$	$3200 * 0,95 * 1 * 0,96 \cong 2918$	$3200 * 0,92 * 1 * 0,96 \cong 2826$
CAPACIDAD ENLACE	2826					

ENLACE 5: BOGOTÁ – SISGA

TRAMO	Bogotá – Briceño – Sisga
Tipo de terreno	Ondulado
Pendiente (%)	4
Longitud de la pendiente (km)	2,5
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50
Zonas de no rebase (%)	40
Ancho de la berma (m)	1,5
Ancho del carril (m)	3,5
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,94 * 1 * 0,99 \cong 2978$
CAPACIDAD ENLACE	2978

ENLACE 6: SISGA – AGUACLARA

TRAMO	Sisga – Machetá – Manta – Guateque	Guateque – Garagoa – Macanal – Santa María
Tipo de terreno	Montañoso	Montañoso
Pendiente (%)	9	11
Longitud de la pendiente (km)	4,5	5
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50	50/50
Zonas de no rebase (%)	80	80
Ancho de la berma (m)	0	0
Ancho del carril (m)	3,65	3,5
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,80 * 1 * 0,97 \cong 2483$	$3200 * 0,68 * 1 * 0,96 \cong 2089$
CAPACIDAD ENLACE	2089	

(Continuación)

TRAMO	Santa María – Cachipay – San Luis de Gaceano	San Luis de Gaceano – Aguaclara
Tipo de terreno	Montañoso	Montañoso
Pendiente (%)	11	10
Longitud de la pendiente (km)	2,5	2,5
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50	50/50
Zonas de no rebase (%)	80	80
Ancho de la berma (m)	0	0
Ancho del carril (m)	3,5	3,5
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,72 * 1 * 0,96 \cong 2212$	$3200 * 0,78 * 1 * 0,96 \cong 2396$
CAPACIDAD ENLACE	2089	

ENLACE 7: AGUACLARA – AGUAZUL

TRAMO	Aguaclara – Monterrey	Monterrey – Tauramena	Tauramena – Aguazul
Tipo de terreno	Plano	Ondulado	Ondulado
Pendiente (%)	2	4	4
Longitud de la pendiente (km)	3	3	3,5
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50	50/50	50/50
Zonas de no rebase (%)	20	40	40
Ancho de la berma (m)	0	1,2	1
Ancho del carril (m)	3,5	3,65	3,65
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,97 * 1 * 0,96 \cong 2980$	$3200 * 0,94 * 1 * 0,99 \cong 2978$	$3200 * 0,93 * 1 * 0,99 \cong 2946$
CAPACIDAD ENLACE	2946		

ENLACE 8: SISGA – AGUAZUL

TRAMO	Sisga – Tunja	Tunja – Sogamoso	Sogamoso – Aguazul
Tipo de terreno	Ondulado	Ondulado	Ondulado
Pendiente (%)	2	3	3
Longitud de la pendiente (km)	2,5	1,5	3
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50	50/50	50/50
Zonas de no rebase (%)	40	40	40
Ancho de la berma (m)	0,5	1	0
Ancho del carril (m)	3	3,5	3,5
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,97 * 1 * 0,93 \cong 2887$	$3200 * 0,96 * 1 * 0,98 \cong 3011$	$3200 * 0,95 * 1 * 0,96 \cong 2918$
CAPACIDAD ENLACE	2887		

ENLACE 9: AGUAZUL – YOPAL

TRAMO	Aguazul – Yopal
Tipo de terreno	Plano
Pendiente (%)	2
Longitud de la pendiente (km)	2
Distribución por sentidos (Ascenso/Descenso)	50/50
Zonas de no rebase (%)	20
Ancho de la berma (m)	0
Ancho del carril (m)	3,65
CAPACIDAD TRAMO	$3200 * 0,98 * 1 * 0,97 \cong 3042$
CAPACIDAD ENLACE	3042

Anexo N. Código de programación método GMED – Modelo de corredor logístico tipo “green” (Aplicación)

ALGORITMO GMED (MATLAB)

```
%APLICACIÓN DEL MODELO CORREDOR LOGÍSTICO TIPO “GREEN” - GMED
%%
%NPS=Número total de individuos en la población del nivel superior
%FS=Factor de mutación del nivel superior
%CRS=Tasa de cruce del nivel superior
%GmaxS=Número máximo de generaciones del nivel superior
%%

function [ZminSupGMED, popBestSup, XminInfGMED, xGMED]=
AlgoritmoGMED_ACLG(NPS, FS, CRS, GmaxS)

lowSa=[0 0 0 0 0 0 0 0 0]; %Mínima expansión de capacidad del enlace a
uppSa=[1120 727 1176 374 222 1111 254 313 158]; %Máxima expansión de
capacidad del enlace a
toa=[1.65 3.5 1.28 1.88 0.98 2.98 1.35 5.1 0.5]; %Tiempo a flujo libre
para atravesar el enlace a
CAa=[2080 2473 2024 2826 2978 2089 2946 2887 3042]; %Capacidad existente
del enlace a
La=[62 121 65.4 135 64.7 141 101 266 27.2]; %Longitud del enlace a
Fbm=[0.850 0.850 0.850 0.850 0.850 0.850 0.850 0.850 0.807 0.7857;
1.786 1.786 1.786 1.786 1.786 1.786 1.786 1.786 0.116 0.109;
0.375 0.375 0.375 0.375 0.375 0.375 0.375 0.375 0.3956 0.360];
%Factor de emisión del contaminante b para el vehículo tipo m
LEb=[3000000; 3000000; 3000000]; %Valor límite de emisiones del
contaminante b

clog=116.26;
f1=inline('(x.*toa).*(1+ (0.15*((x./(CAa+z)).^4))))+
clog','z','toa','CAa','x','clog');
g1=inline('(La.*Fbm.*xma) ','La','Fbm','xma'); %Rest. contaminante 1
g2=inline('(La.*Fbm.*xma) ','La','Fbm','xma'); %Rest. contaminante 2
g3=inline('(La.*Fbm.*xma) ','La','Fbm','xma'); %Rest. contaminante 3

f2=inline('(toa.*x +
(toa.*0.15)./(5)).*((x.^5))./(CAa+z).^4)','z','toa','CAa','x');

M=10; %Número total de vehículos
A=length(lowSa); %Número total de enlaces en la red

DS=length(lowSa); %Número total de variables de decisión
(dimensiones) del nivel superior
popSup=zeros(NPS,DS); %Población del nivel superior
newPopSup=zeros(NPS,DS); %Nueva población del nivel superior
```

```

popBestSup=zeros(1,DS);           %Mejor individuo de la población de nivel
superior
evalSup=zeros(1,NPS);           %Valor fitness de nivel superior
trialSup=zeros(1,DS);           %Vector de prueba de nivel superior
xviejo=zeros(NPS,DS);           %Soluciones de nivel inferior
xGMED=zeros(1,DS);             %Mejor solución de nivel inferior
xmaviejo=zeros(M,A,NPS);

evalFactSup=zeros([],DS);       %Valor fitness de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecFactSup=zeros([],DS);     %Población de vectores objetivo
(individuos) factibles de nivel superior
popVecInfactSup=zeros([],DS);   %Población de vectores objetivo
(individuos) infactibles de nivel superior

%-----Inicialización-----%

% Generación aleatoria de la población inicial de nivel superior

for i=1:NPS
for j=1:DS
    popSup(i,j)=lowSa(j)+rand*(uppSa(j)-lowSa(j));
end
end

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i=1:NPS

    %Escribir GDX

    varSup.name='z';
    varSup.val=popSup(i,:);
    varSup.form='full';
    varSup.type='parameter';

    wgdg('varSup_ACLG.gdx',varSup)

    %Leer GDX

    varInf=gams('ACLG_InfGMED.gms');
    x=readgdx('matsol.gdx','x');
    xma=readgdx('matsol.gdx','xma');

    %Ordenar x

    xord=zeros(1,A);

    if isempty(x)
        xord=xord;
    end
end

```

```

else
    xtam=size(x);
    for j=1:xtam(1,1);
        xord(1,x(j,1))=x(j,2);
    end
end

xviejo(i,:)=xord;

%Ordenar xma

xmaord=zeros(M,A);

if isempty(xma);
    xmaord=xmaord;
else
    xmatam = size(xma);
    for k=1:xmatam(1,1)
        xmaord(xma(k,1),xma(k,2)) = xma(k,3);
    end
end

xmaviejo(:,:,i)=xmaord(:,:,i);

%Restricciones de emisiones

R1=0;
R2=0;
R3=0;

for m=1:M
    for a=1:A
        R1terk=feval(g1,La(1,a),Fbm(1,m),xmaviejo(m,a,i));
        R2terk=feval(g2,La(1,a),Fbm(2,m),xmaviejo(m,a,i));
        R3terk=feval(g3,La(1,a),Fbm(3,m),xmaviejo(m,a,i));
        R1=R1+R1terk;
        R2=R2+R2terk;
        R3=R3+R3terk;
    end
end

if (R1<=LEb(1) && R2<=LEb(2) && R3<=LEb(3)) % Factible
    popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
else
    popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

if length(popVecFactSup)==0
    vmaxFactSup=0;

```

```

else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup1=feval (f1,popVecFactSup (ibestFactSup, :), toa, CAa, xviejo (ibestF
actSup, :), clog);
    evalFactSup (1)=sum (evalFactSup1);

    if (popVecFactSup (ibestFactSup, :)==popSup (ibestFactSup, :))
        vmaxFactSup=evalFactSup (1);
    else
        vmaxFactSup=0;
    end

    for i=2:m

evalFactSupi=feval (f1,popVecFactSup (i, :), toa, CAa, xviejo (i, :), clog);
        evalFactSup (i)=sum (evalFactSupi);
        if
((evalFactSup (i)>vmaxFactSup) & (popVecFactSup (i, :)==popSup (i, :)))
            vmaxFactSup=evalFactSup (i);
            ibestFactSup=i;
        end
    end

end

%Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infactible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infactibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población

R1best=0;
R2best=0;
R3best=0;

for m=1:M
for a=1:A
R1bestTerk=feval (g1,La (1, a), Fbm (1, m), xmaviejo (m, a, ibestSup));
R2bestTerk=feval (g2,La (1, a), Fbm (2, m), xmaviejo (m, a, ibestSup));
R3bestTerk=feval (g3,La (1, a), Fbm (3, m), xmaviejo (m, a, ibestSup));
R1best=R1best+R1bestTerk;
R2best=R2best+R2bestTerk;
R3best=R3best+R3bestTerk;
end
end

if (R1best<=LEb (1) && R2best<=LEb (2) && R3best<=LEb (3)) % Si F

```

```

    evalSup1=feval (f1,popSup (ibestSup, :), toa, CAa, xviejo (ibestSup, :), clog);
%f1: 'z','toa','CAa','x','clog'
    evalSup (1)=sum (evalSup1);
else
    evalSup (1)=vmaxFactSup + (abs (R1best)+abs (R2best)+abs (R3best));
end

ZminSupGMED=evalSup (ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes

    R1=0;
    R2=0;
    R3=0;

    for m=1:M
    for a=1:A
    R1terk=feval (g1,La (1,a), Fbm (1,m), xmaviejo (m,a,i));
    R2terk=feval (g2,La (1,a), Fbm (2,m), xmaviejo (m,a,i));
    R3terk=feval (g3,La (1,a), Fbm (3,m), xmaviejo (m,a,i));
    R1=R1+R1terk;
    R2=R2+R2terk;
    R3=R3+R3terk;
    end
    end

    if ( (R1<=LEb (1) && R2<=LEb (2) && R3<=LEb (3)) && (R1best>=LEb (1) ||
R2>=LEb (2) || R3>=LEb (3)) ) % Si F-INF
        evalSupi=feval (f1,popSup (i, :), toa, CAa, xviejo (i, :), clog);
        evalSup (i)=sum (evalSupi);
        ZminSupGMED=evalSup (i)
        ibestSup=i

        R1best=0;
        R2best=0;
        R3best=0;

        for m=1:M
        for a=1:A
        R1bestTerk=feval (g1,La (1,a), Fbm (1,m), xmaviejo (m,a,ibestSup));
        R2bestTerk=feval (g2,La (1,a), Fbm (2,m), xmaviejo (m,a,ibestSup));
        R3bestTerk=feval (g3,La (1,a), Fbm (3,m), xmaviejo (m,a,ibestSup));
        R1best=R1best+R1bestTerk;
        R2best=R2best+R2bestTerk;
        R3best=R3best+R3bestTerk;
        end
        end

        elseif ( (R1<=LEb (1) && R2<=LEb (2) && R3<=LEb (3)) && (R1best<=LEb (1)
&& R2best<=LEb (2) && R3best<=LEb (3)) ) % Si F-F
            evalSupi=feval (f1,popSup (i, :), toa, CAa, xviejo (i, :), clog);
            evalSup (i)=sum (evalSupi);

```

```

    if evalSup(i)<ZminSupGMED
        ZminSupGMED=evalSup(i);
        ibestSup=i;

    R1best=0;
    R2best=0;
    R3best=0;

    for m=1:M
        for a=1:A
            R1bestTerk=feval(g1,La(1,a),Fbm(1,m),xmaviejo(m,a,ibestSup));
            R2bestTerk=feval(g2,La(1,a),Fbm(2,m),xmaviejo(m,a,ibestSup));
            R3bestTerk=feval(g3,La(1,a),Fbm(3,m),xmaviejo(m,a,ibestSup));
            R1best=R1best+R1bestTerk;
            R2best=R2best+R2bestTerk;
            R3best=R3best+R3bestTerk;
        end
    end

    end

    elseif ( (R1>=LEb(1) || R2>=LEb(2) || R3>=LEb(3)) && (R1best>=LEb(1)
|| R2best>=LEb(2) || R3best>=LEb(3)) ) % Si INF-INF
        evalSup(i)=vmaxFactSup + (abs(R1)+abs(R2)+abs(R3));
        if
            ((abs(R1)+abs(R2)+abs(R3))<(abs(R1best)+abs(R2best)+abs(R3best)));
                ZminSupGMED=evalSup(i);
                ibestSup=i;

            R1best=0;
            R2best=0;
            R3best=0;

            for m=1:M
                for a=1:A
                    R1bestTerk=feval(g1,La(1,a),Fbm(1,m),xmaviejo(m,a,ibestSup));
                    R2bestTerk=feval(g2,La(1,a),Fbm(2,m),xmaviejo(m,a,ibestSup));
                    R3bestTerk=feval(g3,La(1,a),Fbm(3,m),xmaviejo(m,a,ibestSup));
                    R1best=R1best+R1bestTerk;
                    R2best=R2best+R2bestTerk;
                    R3best=R3best+R3bestTerk;
                end
            end

            end

        end

    end

popBestSup=popSup(ibestSup,:);
xGMED=xviejo(ibestSup,:);
XminInfGMED_Vec=feval(f2,popSup(ibestSup,:),toa,CAa, xGMED);
%f2:'z','toa','CAa','x'

```

```

XminInfGMED=sum(XminInfGMED_Vec);

%-----Bucle mutación/cruce/selección-----%

Gsup=1

while (Gsup<GmaxS)

for i=1:NPS

% Selección aleatoria de tres vectores de la población

while 1
v1=floor(rand*NPS)+1;
if v1~=i;
break;
end
end

while 2
v2=floor(rand*NPS)+1;
if v2~=i && v2~=v1;
break;
end
end

while 3
v3=floor(rand*NPS)+1;
if v3~=i && v3~=v2 && v3~=v1;
break;
end
end

% Creación del vector de prueba

jrand=floor(rand*DS)+1;

for j=1:DS

r=rand;
if r <= CRS || j==jrand
trialSup(j)=popSup(i,j)+FS.*(popSup(v3,j)-
popSup(i,j))+FS.*(popSup(v1,j)-popSup(v2,j)); % ED/target-to-rand/1/bin
else
trialSup(j)=popSup(i,j);
end
end

for j=1:DS
if trialSup(j)>=uppSa(j)
trialSup(j)=uppSa(j);

```

```

        elseif trialSup(j) <= lowSa(j)
            trialSup(j) = lowSa(j);
        else
            trialSup(j) = trialSup(j);
        end
    end
end

%Escribir GDx

varSupT.name = 'z';
varSupT.val = trialSup;
varSupT.form = 'full';
varSupT.type = 'parameter';

wgdx('varSup_ACLG.gdx', varSupT)

%Leer GDx

varInf = gams('ACLG_InfGMED.gms');
x = readgdx('matsol.gdx', 'x');
xma = readgdx('matsol.gdx', 'xma');

%Ordenar x

xord = zeros(1, A);

if isempty(x)
    xord = xord;
else
    xtam = size(x);
    for j = 1:xtam(1,1)
        xord(1, x(j,1)) = x(j,2);
    end
end

x = xord;

%Ordenar xma

xmaord = zeros(M, A);

if isempty(xma);
    xmaord = xmaord;
else
    xmatam = size(xma);
    for k = 1:xmatam(1,1)
        xmaord(xma(k,1), xma(k,2)) = xma(k,3);
    end
end

xma = xmaord;

```

```

% Selección del mejor vector (objetivo o trial)

R1=0;
R2=0;
R3=0;

for m=1:M
for a=1:A
R1terk=feval(g1,La(1,a),Fbm(1,m),xmaviejo(m,a,i));
R2terk=feval(g2,La(1,a),Fbm(2,m),xmaviejo(m,a,i));
R3terk=feval(g3,La(1,a),Fbm(3,m),xmaviejo(m,a,i));
R1=R1+R1terk;
R2=R2+R2terk;
R3=R3+R3terk;
end
end

R1trial=0;
R2trial=0;
R3trial=0;

for m=1:M
for a=1:A
R1trialTerk=feval(g1,La(1,a),Fbm(1,m),xma(m,a));
R2trialTerk=feval(g2,La(1,a),Fbm(2,m),xma(m,a));
R3trialTerk=feval(g3,La(1,a),Fbm(3,m),xma(m,a));
R1trial=R1trial+R1trialTerk;
R2trial=R2trial+R2trialTerk;
R3trial=R3trial+R3trialTerk;
end
end

if (R1trial<=LEb(1) && R2trial<=LEb(2) && R3trial<=LEb(3)) &&
(R1>=LEb(1) || R2>=LEb(2) || R3>=LEb(3)) ) % Si F-INF
    evalTrialSup_Vec=feval(f1,trialSup,toa,CAa,x,clog);
    evalTrialSup=sum(evalTrialSup_Vec);

    newPopSup(i,:)=trialSup;
    evalSup(i)=evalTrialSup;

elseif (R1trial<=LEb(1) && R2trial<=LEb(2) && R3trial<=LEb(3)) &&
(R1<=LEb(1) && R2<=LEb(2) && R3<=LEb(3)) ) % Si F-F
    evalTrialSup_Vec=feval(f1,trialSup,toa,CAa,x,clog);
    evalTrialSup=sum(evalTrialSup_Vec);

    if evalTrialSup<=evalSup(i)
        newPopSup(i,:)=trialSup;
        evalSup(i)=evalTrialSup;
    else
        newPopSup(i,:)=popSup(i,:);
    end
end

```

```

elseif ( (R1trial>=LEb(1) || R2trial>=LEb(2) || R3trial>=LEb(3)) &&
(R1<=LEb(1) && R2<=LEb(2) && R3<=LEb(3)) ) % Si INF-F
    newPopSup(i,:) = popSup(i,:);

elseif ( (R1trial>=LEb(1) || R2trial>=LEb(2) || R3trial>=LEb(3)) &&
(R1>=LEb(1) || R2>=LEb(2) || R3>=LEb(3)) ) % Si INF-INF
    evalTrialSup = vmaxFactSup + (abs(R1trial)+abs(R2trial)+abs(R3trial));

    if (
(abs(R1trial)+abs(R2trial)+abs(R3trial)) < (abs(R1)+abs(R2)+abs(R3)) )
        newPopSup(i,:) = trialSup;
        evalSup(i) = evalTrialSup;
    else
        newPopSup(i,:) = popSup(i,:);
    end
end
end

ZminSup_GMED(1, Gsup) = ZminSupGMED;

%-----Nueva generación-----%

evalFactSup = zeros([], DS);
popVecFactSup = zeros([], DS);
popVecInfactSup = zeros([], DS);

popSup(:, :) = newPopSup(:, :);
Gsup = Gsup + 1

% Cálculo del valor máximo factible de nivel superior (vmaxFactSup)

for i = 1:NPS

    %Escribir GDX

    varSupN.name = 'z';
    varSupN.val = popSup(i, :);
    varSupN.form = 'full';
    varSupN.type = 'parameter';

    wgdxd('varSup_ACLG.gdx', varSupN)

    %Leer GDX

    varInf = gams('ACLG_InfGMED.gms');
    x = readgdx('matsol.gdx', 'x');
    xma = readgdx('matsol.gdx', 'xma');

    %Ordenar x

    xord = zeros(1, A);

```

```

if isempty(x)
    xord=xord;
else
    xtam=size(x);
    for j=1:xtam(1,1);
        xord(1,x(j,1))=x(j,2);
    end
end

xviejo(i,:)=xord;

%Ordenar xma

xmaord=zeros(M,A);

if isempty(xma);
    xmaord=xmaord;
else
    xmatam = size(xma);
    for k=1:xmatam(1,1)
        xmaord(xma(k,1),xma(k,2)) = xma(k,3);
    end
end

xmaviejo(:,:,i)=xmaord(:,:,i);

%Restricciones de emisiones

R1=0;
R2=0;
R3=0;

for m=1:M
    for a=1:A
        R1terk=feval(g1,La(1,a),Fbm(1,m),xmaviejo(m,a,i));
        R2terk=feval(g2,La(1,a),Fbm(2,m),xmaviejo(m,a,i));
        R3terk=feval(g3,La(1,a),Fbm(3,m),xmaviejo(m,a,i));
        R1=R1+R1terk;
        R2=R2+R2terk;
        R3=R3+R3terk;
    end
end

if (R1<=LEb(1) && R2<=LEb(2) && R3<=LEb(3)) % Factible
    popVecFactSup(i,:)=popSup(i,:);
else
    popVecInfactSup(i,:)=popSup(i,:);
end
end

[m,n] = size(popVecFactSup);

```

```

if length(popVecFactSup)==0
    vmaxFactSup=0;

else
    ibestFactSup=1;

evalFactSup1=feval(f1,popVecFactSup(ibestFactSup,:),toa,CAa,xviejo(ibestFactSup,:),clog);
evalFactSup(1)=sum(evalFactSup1);

    if (popVecFactSup(ibestFactSup,')==popSup(ibestFactSup,))
        vmaxFactSup=evalFactSup(1);
    else
        vmaxFactSup=0;
    end

    for i=2:m

evalFactSupi=feval(f1,popVecFactSup(i,:),toa,CAa,xviejo(i,:),clog);
        evalFactSup(i)=sum(evalFactSupi);
        if
((evalFactSup(i)>vmaxFactSup) & (popVecFactSup(i,')==popSup(i,)))
            vmaxFactSup=evalFactSup(i);
            ibestFactSup=i;
        end
    end

end

%Operador de selección (torneo)

%1.Cualquier solución factible (F) es preferida a cualquier solución
infectible (INF).
%2.Entre dos soluciones factibles (F), se prefiere la que tenga mejor
valor fitness.
%3.Entre dos soluciones infectibles (INF), se prefiere la que tenga menor
violación de restricción.

ibestSup=1; % Inicie con el primer miembro de la población

R1best=0;
R2best=0;
R3best=0;

for m=1:M
for a=1:A
R1bestTerk=feval(g1,La(1,a),Fbm(1,m),xmaviejo(m,a,ibestSup));
R2bestTerk=feval(g2,La(1,a),Fbm(2,m),xmaviejo(m,a,ibestSup));
R3bestTerk=feval(g3,La(1,a),Fbm(3,m),xmaviejo(m,a,ibestSup));
R1best=R1best+R1bestTerk;
R2best=R2best+R2bestTerk;
R3best=R3best+R3bestTerk;
end

```

```

end

if (R1best<=LEb(1) && R2best<=LEb(2) && R3best<=LEb(3)) % Si F
    evalSup1=feval (f1,popSup (ibestSup, :), toa, CAa, xviejo (ibestSup, :), clog);
%f1: 'z','toa','CAa','x','clog'
    evalSup (1)=sum (evalSup1);
else
    evalSup (1)=vmaxFactSup + (abs (R1best)+abs (R2best)+abs (R3best));
end

ZminSupGMED=evalSup (ibestSup);

for i=2:NPS % Compruebe los miembros restantes

    R1=0;
    R2=0;
    R3=0;

    for m=1:M
        for a=1:A
            R1terk=feval (g1,La (1,a), Fbm (1,m), xmaviejo (m,a,i));
            R2terk=feval (g2,La (1,a), Fbm (2,m), xmaviejo (m,a,i));
            R3terk=feval (g3,La (1,a), Fbm (3,m), xmaviejo (m,a,i));
            R1=R1+R1terk;
            R2=R2+R2terk;
            R3=R3+R3terk;
        end
    end

    if ( (R1<=LEb(1) && R2<=LEb(2) && R3<=LEb(3)) && (R1best>=LEb(1) ||
R2>=LEb(2) || R3>=LEb(3)) ) % Si F-INF
        evalSupi=feval (f1,popSup (i, :), toa, CAa, xviejo (i, :), clog);
        evalSup (i)=sum (evalSupi);
        ZminSupGMED=evalSup (i)
        ibestSup=i

        R1best=0;
        R2best=0;
        R3best=0;

        for m=1:M
            for a=1:A
                R1bestTerk=feval (g1,La (1,a), Fbm (1,m), xmaviejo (m,a,ibestSup));
                R2bestTerk=feval (g2,La (1,a), Fbm (2,m), xmaviejo (m,a,ibestSup));
                R3bestTerk=feval (g3,La (1,a), Fbm (3,m), xmaviejo (m,a,ibestSup));
                R1best=R1best+R1bestTerk;
                R2best=R2best+R2bestTerk;
                R3best=R3best+R3bestTerk;
            end
        end

        elseif ( (R1<=LEb(1) && R2<=LEb(2) && R3<=LEb(3)) && (R1best<=LEb(1)
&& R2best<=LEb(2) && R3best<=LEb(3)) ) % Si F-F

```

```

evalSupi=feval (f1,popSup (i, :), toa, CAa, xviejjo (i, :), clog);
evalSup (i)=sum (evalSupi);

if evalSup (i)<ZminSupGMED
    ZminSupGMED=evalSup (i);
    ibestSup=i;

R1best=0;
R2best=0;
R3best=0;

for m=1:M
for a=1:A
R1bestTerk=feval (g1, La (1, a), Fbm (1, m), xmaviejjo (m, a, ibestSup));
R2bestTerk=feval (g2, La (1, a), Fbm (2, m), xmaviejjo (m, a, ibestSup));
R3bestTerk=feval (g3, La (1, a), Fbm (3, m), xmaviejjo (m, a, ibestSup));
R1best=R1best+R1bestTerk;
R2best=R2best+R2bestTerk;
R3best=R3best+R3bestTerk;
end
end

end

elseif ( (R1>=LEb (1) || R2>=LEb (2) || R3>=LEb (3)) && (R1best>=LEb (1)
|| R2best>=LEb (2) || R3best>=LEb (3)) ) % Si INF-INF
evalSup (i)=vmaxFactSup + (abs (R1)+abs (R2)+abs (R3));
if
((abs (R1)+abs (R2)+abs (R3))<(abs (R1best)+abs (R2best)+abs (R3best)));
ZminSupGMED=evalSup (i);
ibestSup=i;

R1best=0;
R2best=0;
R3best=0;

for m=1:M
for a=1:A
R1bestTerk=feval (g1, La (1, a), Fbm (1, m), xmaviejjo (m, a, ibestSup));
R2bestTerk=feval (g2, La (1, a), Fbm (2, m), xmaviejjo (m, a, ibestSup));
R3bestTerk=feval (g3, La (1, a), Fbm (3, m), xmaviejjo (m, a, ibestSup));
R1best=R1best+R1bestTerk;
R2best=R2best+R2bestTerk;
R3best=R3best+R3bestTerk;
end
end

end

end
end

popBestSup=popSup (ibestSup, :);
xGMED=xviejjo (ibestSup, :);

```

```

XminInfGMED_Vec=feval(f2,popSup(ibestSup,:),toa,CAa, xGMED);
%f2:'z','toa','CAa','x'
XminInfGMED=sum(XminInfGMED_Vec);

ZminSup_GMED(1,Gsup)=ZminSupGMED;

end

%Gráfica de ZminSupGMED versus Generación
Gsup=[1:GmaxS];
plot(Gsup,ZminSup_GMED,'--
g','linewidth',2,'marker','o','markersize',8,'markerfacecolor','g','marke
redgecolor','b')
grid on
title('ZminSupGMED versus Generación','fontsize',12,'color','b')
xlabel('Generación','fontsize',10,'color','b')
ylabel('ZminSupGMED','fontsize',10,'color','b')

```

PROBLEMA DE NIVEL INFERIOR (GAMS)

\$ontext

Aplicación del modelo de corredor logístico tipo "green" - GMED

\$offtext

\$set matout "'matsol.gdx', x , xma ";

\$if exist matdata.gms \$include matdata.gms

set

a Enlaces en la red /1*9/

k Rutas en la red /1*6/

w Pares origen-destino /1*3/

kw(k,w) Rutas que conectan el par w

```

      / (1,2) . 1
      (1,2) . 2
      (1*6) . 3/

```

m Vehículos /1*10/;

parameters

z(a) 'Expansión de capacidad del enlace a (variable de nivel superior)'

to(a) Tiempo a flujo libre para atravesar el enlace a	/1	1.65
	2	3.5
	3	1.28
	4	1.88
	5	0.98
	6	2.98
	7	1.35
	8	5.1
	9	0.5/

CA(a) Capacidad existente del enlace a

/1	2080
2	2473
3	2024
4	2826
5	2978
6	2089
7	2946
8	2887
9	3042/

PCE(m) Vehículos de pasajeros equivalente para el vehículo tipo m

/1	2.5
2	2.5
3	2.5
4	3
5	3
6	3
7	3
8	3
9	2
10	1/;

\$gdxin varSup_ACLG.gdx
 \$load z
 \$gdxin

table

q(m,w) Número de vehículos tipo m que circulan entre el origen O y el destino D (par w)

	1	2	3
1	143	607	57
2	22	87	5
3	10	20	6
4	4	4	1
5	7	26	3
6	55	71	26
7	37	61	11
8	69	45	40

9	65	45	42
10	277	238	137;

table

delta(a,k,w) Si el enlace a forma parte de la ruta k que conecta el par w

	1	2	3
1.1	1	0	1
1.2	0	0	0
1.3	0	0	0
1.4	0	0	0
1.5	0	0	1
1.6	0	0	0
2.1	0	0	0
2.2	1	0	1
2.3	0	0	0
2.4	0	0	0
2.5	0	0	0
2.6	0	0	1
3.1	1	0	1
3.2	1	0	1
3.3	0	0	0
3.4	0	0	0
3.5	0	0	1
3.6	0	0	1
4.1	0	1	1
4.2	0	1	1
4.3	0	0	0
4.4	0	0	0
4.5	0	0	1
4.6	0	0	1
5.1	0	0	0
5.2	0	0	0
5.3	0	0	1
5.4	0	0	1
5.5	0	0	0
5.6	0	0	0
6.1	0	0	0
6.2	0	1	0
6.3	0	0	0
6.4	0	0	1
6.5	0	0	1
6.6	0	0	1
7.1	0	1	1
7.2	0	0	1
7.3	0	0	0
7.4	0	0	1
7.5	0	0	0
7.6	0	0	0
8.1	0	0	0
8.2	0	1	0
8.3	0	0	1

8.4	0	0	0
8.5	0	0	1
8.6	0	0	1
9.1	0	1	1
9.2	0	1	1
9.3	0	0	1
9.4	0	0	1
9.5	0	0	1
9.6	0	0	1;

variables

f(m,k,w) Flujo del vehículo tipo m en la ruta k del par w,
xma(m,a) Flujo del vehículo tipo m en el enlace a,
x(a) Flujo vehicular total en el enlace a,
evalInf Valor de la función objetivo de nivel inferior;

positive variables f;

equations

f2 Función objetivo de nivel inferior
QVEH(m,w) Restricción de conservación del flujo
FLUJOMA(m,a) Relación del flujo en el enlace con el flujo en las rutas
FLUJOA(a) Flujo total en el enlace;

```
f2.. evalInf =e=sum(a, ((to(a)* x(a)) + (((to(a)*0.15)/5)*
((x(a))**5)/(CA(a)+z(a))**4)))));
QVEH(m,w).. sum(kw(k,w), f(m,k,w))=e= q(m,w);
FLUJOMA(m,a).. xma(m,a)=e=sum(w, sum(kw(k,w), f(m,k,w)*delta(a,k,w)));
FLUJOA(a).. x(a) =e= sum(m,PCE(m)*xma(m,a));
```

```
model ACLG_InfGMED /all/;
```

```
solve ACLG_InfGMED using nlp minimizing evalInf;
```

```
execute_unload %matout%;
```

En la ventana de comandos de MATLAB:

```
clc
clear all
NPS=20;
FS=0.8;
CRS=0.8;
GmaxS=150;
[ZminSupGMED z XminInfGMED xGMED]= AlgoritmoGMED_ACLG(NPS,FS,CRS,GmaxS)
```

Anexo O. Resultados GMED de la aplicación

1	2	3	4	5	6
ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04
z =	z =	z =	z =	z =	z =
1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.1200 0.1083 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.3130	1.1200 0.4864 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.2739	1.1200 0.7270 1.1760 0.3740 0.2220 1.1109 0.2540 0	1.1200 0.6594 1.1760 0.3740 0.2188 1.1102 0.2540 0.0709	1.1200 0.6818 1.1760 0.3740 0.2208 1.1108 0.2540 0.2679	1.1200 0.5150 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580
XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680
>>	>>	>>	>>	>>	>>

7	8	9	10	11	12
ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04
z = 1.0e+03 *	z = 1.0e+03 *	z = 1.0e+03 *	z = 1.0e+03 *	z = 1.0e+03 *	z = 1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.1200 0.7270 1.1760 0.3740 0.2219 1.1109 0.2540 0	1.1200 0.3760 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.2411	1.1200 0.6594 1.1760 0.3740 0.2188 1.1102 0.2540 0.0709	1.1200 0.1083 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.3130	1.1200 0.5150 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0	1.1200 0.4864 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.2739
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580
XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04
xGMED = 1.0e+03 *	xGMED = 1.0e+03 *	xGMED = 1.0e+03 *	xGMED = 1.0e+03 *	xGMED = 1.0e+03 *	xGMED = 1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680
>>	>>	>>	>>	>>	>>

13	14	15	16	17	18
ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04
z =	z =	z =	z =	z =	z =
1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.1200 0.7270 1.1760 0.3740 0.2220 1.1109 0.2540 0	1.1200 0.3760 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.2411	1.1200 0.1083 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.3130	1.1200 0.3760 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.2411	1.1200 0.6594 1.1760 0.3740 0.2188 1.1102 0.2540 0.0709	1.1200 0.4864 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.2739
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580
XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680
>>	>>	>>	>>	>>	>>

19	20	21	22	23	24
ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04
z =	z =	z =	z =	z =	z =
1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.1200 0.6818 1.1760 0.3740 0.2208 1.1108 0.2540 0.2679	1.1200 0.7270 1.1760 0.3740 0.2219 1.1109 0.2540 0	1.1200 0.6594 1.1760 0.3740 0.2188 1.1102 0.2540 0.0709	1.1200 0.5150 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0	1.1200 0.5150 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0	1.1200 0.5150 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580
XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680
>>	>>	>>	>>	>>	>>

25	26	27	28	29	30
ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04	ZminSupGMED = 2.0492e+04
z =	z =	z =	z =	z =	z =
1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.1200 0.3760 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.2411	1.1200 0.6594 1.1760 0.3740 0.2188 1.1102 0.2540 0.0709	1.1200 0.4864 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.2739	1.1200 0.3760 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.2411	1.1200 0.6594 1.1760 0.3740 0.2188 1.1102 0.2540 0.0709	1.1200 0.1083 1.1760 0.3740 0.2220 1.1110 0.2540 0.3130
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580
XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04	XminInfGMED = 1.8183e+04
xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =	xGMED =
1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *	1.0e+03 *
Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8	Columns 1 through 8
1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000	1.3605 0 1.3605 2.7340 0.6340 0.6340 3.3680 0.0000
Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9	Column 9
3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680	3.3680
>>	>>	>>	>>	>>	>>