

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO**

**ESCUELA DE POSTGRADO**



**“ASIGNACION DE TRANSITO A LA RED DE TRANSPORTE  
DE LA CIUDAD DE TRUJILLO, COMO MEJORA A LA  
PLANIFICACION VIAL SOSTENIBLE”**

TESIS

PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN TRANSPORTES Y  
CONSERVACION VIAL

AUTOR:

Sagastegui Vásquez Erick

ASESOR:

Sagastegui Plasencia Fidel German

F. Sust. : 21 de Junio 2019

Trujillo-Perú

2019

# DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO,  
QUE NUNCA ME ABANDONA  
Y SIEMPRE ME DA VIDA, SALUD.

A MIS PADRES FIDEL GERMAN Y BLANCA,  
QUIENES CON SU APOYO INTEGRAL  
HICIERON, QUE SEA UN HIJO CON VALORES.

A MIS HERMANOS, GERMAN Y LIZ;  
QUIENES CON SU APOYO MORAL;  
Y UNIDAD FAMILIAR MOTIVAN  
SIEMPRE PARA LOGRAR MIS METAS  
TRAZADAS.

ERICK

## **AGRADECIMIENTO**

A TODOS LOS DOCENTES DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO, ESCUELA DE POSTGRADO; Y EN ESPECIAL A MI ASESOR AL Dr. FIDEL GERMAN SAGASTEGUI PLASENCIA, QUIEN ASESORO MI TESIS EN EL MOMENTO OPORTUNO, PARA HACER REALIDAD LA CULMINACION DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACION.

## **JURADO EVALUADOR**

**Tesis: "ASIGNACION DE TRANSITO A LA RED DE TRANSPORTE DE LA CIUDAD  
DE TRUJILLO, COMO MEJORA A LA PLANIFICACION VIAL SOSTENIBLE"**

**Tesista : SAGASTEGUI VASQUEZ ERICK**

---

Dr. Hurtado Zamora Oswaldo  
PRESIDENTE

---

Ms. Narváez Aranda Ricardo Andrés  
SECRETARIO

---

Ms. Gálvez Paredes Jose Alcides  
VOCAL

---

Dr. Sagastegui Plasencia Fidel German  
ASESOR DE TESIS

## **RESUMEN**

La presente Tesis de asignación de tránsito a la red de Transporte de la Ciudad de Trujillo, como mejora a la Planificación vial sostenible, es un aporte importante para procesos de planificación tanto en ejecución de infraestructura nueva, así como modernizaciones o mejoras en la infraestructura vial, habiendo aplicado método del conjunto activo y el método del costo generalizado del transporte en donde se aplicó para nuestras redes regionales en las vías para aporte en su planificación.

El método aplicado a las redes urbanas del transporte en nuestra ciudad, sabiendo que la infraestructura vial en nuestro medio de las zonas habitadas y urbanas, como necesidad de servicio para los usuarios, no estando presente esas semejanzas en el transporte interurbano. El segundo método donde se toma en cuenta las variables del tiempo y la distancia de proceso de recorrido en la vía, considerando la infraestructura real donde circulan los vehículos de los diferentes sectores que se integra las redes regionales de las vías de nuestras carreteras.

Nuestro aporte es proporcionar a los responsables de planificación y programación de inversiones viales, la toma de daciones adecuadas con las necesidades de la población necesita, cuya planificación se realiza con utilización de metodologías y herramientas para permitir realizar estudios de pre inversión y así poder realizar una justificación beneficio costo de los programas de inversión a realizarse, siendo la justificación económica factor importante en la toma de decisiones.

Las informaciones tomadas para la realización de la tesis se integraron para el año 2019, habiéndose realizado estimaciones de costos para este año.

Palabras claves: Asignación \_ tránsito, Red Transporte. Trujillo.

## ABSTRACT

This thesis of allocation of traffic to the transport network of the City of Trujillo, as an improvement to sustainable road planning, is an important contribution to planning processes both in the execution of new infrastructure, as well as modernizations or improvements in road infrastructure, having applied the active set method and the generalized transport cost method where it was applied for our regional networks in the ways to contribute in its planning.

The method applied to urban transport networks in our city, knowing that the road infrastructure in our area of urban and inhabited areas, as a need for service for users, not being similarities in interurban transport. The second method where you take into account the variables of time and distance of the route process in the road, considering the real infrastructure where the vehicles of the different sectors that integrate the regional networks of the roads of our roads.

Our contribution is to provide those responsible for planning and programming of road investments, the taking of adequate decisions with the needs of the population needs, whose planning is carried out with the use of methodologies and tools to allow pre-investment studies and thus be able to carry out a justification cost benefit of the investment programs to be carried out, being the economic justification an important factor in the decision making.

The information taken for the realization of the thesis was integrated for the year 2019, having made cost estimates for this year.

Keywords: Traffic Assignment, Transportation Network, Trujillo.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTO .....	iii
JURADO EVALUADOR .....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. EL PROBLEMA .....	1
1.1.1. Realidad problemática.....	1
1.1.2. Enunciado del problema.....	6
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	6
1.3. OBJETIVOS.....	7
1.1.3. Objetivo general .....	7
1.1.4. Objetivos específicos .....	7
1.4. HIPÓTESIS .....	8
1.5. VARIABLES.....	8
II. MARCO DE REFERENCIA .....	11
2.1. ANTECEDENTES .....	11
2.2. MARCO TEÓRICO .....	20
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	25
III. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO.....	41
3.1. POBLACIÓN .....	41
3.2. MUESTRA.....	42
3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	43
3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	44
3.5. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	45

IV.	RESULTADOS .....	47
4.1.	EL TRANSITO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE TRUJILLO.....	49
4.2.	LA CONGESTION Y SU IMPACTO AMBIENTAL.....	51
4.3.	ASIGNACION DE TRANSITO CON RESTRICCIONES .....	53
V.	DISCUSIÓN .....	70
VI.	CONCLUSIONES .....	75
VII.	RECOMENDACIONES .....	77
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. EL PROBLEMA

### 1.1.1. Realidad problemática

“La asignación estática de flujo a los distintos arcos de una red ha sido tratada por numerosos autores dentro del marco de la investigación operativa. En Sheffi (1985), Thomas (1991) y Bell & Iida (1997) encontramos una amplio análisis. Un estudio detallado de Lupi, M. (1985) mostraba que el algoritmo de Frank-Wolfe (F-W) era superior a la mayoría de los otros algoritmos utilizados habitualmente. No obstante, posteriores refinamientos mostraron que existían mejoras aplicables al propio algoritmo Frank – Wolfe<sup>2</sup>”. (Arezki & Van Vliet, 1990; Pág. 49)

“El transporte de pasajeros y mercancías en áreas urbanas constituye un problema cada vez más importante a ser resuelto en nuestra sociedad. En los últimos años se ha demostrado empíricamente que la construcción de infraestructura o la ampliación de las vías existentes no es una solución adecuada a este problema, sino que es necesario planificar con visión de futuro y a largo plazo el transporte urbano con énfasis en el modo masivo y de centros de distribución de mercancías y para el corto y mediano plazo poner énfasis en el diseño físico y operacional de la infraestructura necesaria”. (Moloche Guillermo 2016; pág. 78).

“La congestión vehicular es un fenómeno recurrente en las ciudades más grandes del mundo. En el Perú, Lima, Trujillo y Arequipa son las más afectadas, aunque también se presenta en otras partes”. (Moloche Guillermo. 2016; pág. 80)

“Este problema afecta tanto a los pasajeros como a la carga de productos comerciales y sus costos incluyen el desperdicio de horas trabajadas, pérdida de tiempo de descanso, pérdida de transacciones comerciales, mayor gasto en combustible, contaminación ambiental, deterioro en la salud, accidentes.

Todo ello afecta negativamente la productividad y la competitividad del país”. (Moloché Guillermo. 2016; Pág. 102).

“Los pasajeros que utilizan las redes de transporte público para desplazarse de un lugar a otro, en las grandes ciudades, cotidianamente experimentan situaciones de estrés, debido a que la gran mayoría de ellos deben viajar en vehículos de transporte que están saturados de pasajeros, además de padecer retrasos por la congestión vial, sobre todo en horas pico. Desafortunadamente, el crecimiento de la población seguirá aumentando en los próximos años, por lo que el problema de congestión vial, y el hacinamiento en los vehículos de transporte público en las grandes ciudades, no disminuirán en el corto plazo”. (Fernández Olivares A.G. 2016; Pág. 120).

“Un modelo de asignación de tránsito describe la forma en que los usuarios de un sistema de transporte público emplean la infraestructura disponible entre diferentes orígenes y destinos para planear y realizar sus viajes. El propósito es distribuir sobre todas las posibles líneas y rutas, la demanda de viajes de todos los orígenes a todos los destinos, de tal manera que el tiempo total de viaje sea mínimo, desde la óptica de los usuarios”. (De Cea, J. 2014; Pág. 68).

“La descripción de las principales características de los sistemas de transporte y los problemas asociados es necesaria antes de discutir el enfoque y planeamiento del modelo público de transporte”. (REDALAT EGUES, G. 2017; pág. 80)

“La Congestión en carreteras, retrasos, accidentes, problemas ambientales junto al incremento del tráfico y la demanda de transporte son ejemplos de problemas que afectan a países industriales y desarrollados”. (AXHAUSEN, K. Y Smith, r. l. 1984; Pág. 104)

“Siendo en muchos de los casos poco aceptables porque el crecimiento económico ha superado la capacidad de diseño de estos sistemas preparados

para soportar únicamente situaciones que difieren ligeramente de la media”. (SECTRA, F. 2018; pág. 134).

“Estos problemas parecen empeorar por la falta de planificación o su ausencia en ciudades modernas, se requiere de un esfuerzo para maximizar el uso, la capacidad, y en definitiva la eficiencia del transporte público minimizando el costo de estos planes”. (ORTUZAR, J. 2017; pág. 58)

“La demanda de transporte surge derivada de las necesidades que los seres humanos tienen para vivir en sociedad, ya sea para trabajar, por mera diversión o salud. Desde una perspectiva más abstracta, el viaje de las personas es para realizar una actividad en una localización particular”. (WU J. H. FLORIAN M. Y MARCOTTE P. 2014; pág. 204)

Por lo tanto, se puede deducir que tiene un carácter cualitativo bastante marcado puesto que depende del día, la fecha, la época del año, entre otros. Sin ajustarse a estos atributos una demanda diferenciada sería inútil.

“Adicionalmente, se debe tener en cuenta su dependencia del espacio físico por obvias razones como por ejemplo problemas derivados de la coordinación del transporte público que afectarían al equilibrio entre la demanda exigida y el transporte proporcionado previsto”. (TORRES V. G. Y PEREZ S. J.A. 2016; pág. 89)

“Cabe añadir su irregularidad porque para evitar la congestión en las horas críticas de transporte al trabajo o vuelta del mismo necesitan de una planificación diferente al transporte diseñado para las horas en la tarde”. (NEWLL, G. 1990; pág. 88).

“Por otro lado, los medios de transporte proporcionados son un servicio, no pueden ser acumulados, pierden su beneficio si no son consumidos donde y cuando es necesario. Para un buen diseño de transporte sin pérdidas muy acentuadas es necesario adaptar el servicio a su demanda”. (CEPEDA, M. COMINETTI R. y FLORIAN, F. 2016; pág. 148)

“Para dar este servicio se necesitan infraestructuras y vehículos en conjunto con una regla de funcionamiento para que el movimiento de pasajeros que devienen equilibrio con el servicio dado. Complicaciones adicionales surgen si el transporte urbano de una ciudad no es gestionado por una misma entidad, ya que la coordinación se hace más difícil debido un aumento de la complejidad en la relación entre las diferentes entidades”. (BELTRAN, P. GSCHWENDER A.; MUNIZAGA, M. PALMA, C. y ZUÑIGA, M. 2016. pág. 214)

“La congestión del tráfico es también otro efecto a tener en cuenta, puesto que en una ciudad no sólo circula transporte público, pero dependen de las infraestructuras de las que posea la ciudad para garantizar su correcto funcionamiento. Un ejemplo, podrían ser los carriles bus garantizando en cierta medida una descongestión del transporte urbano en detrimento del de otro tipo”. (CHEN, Y. 2016. pág. 87).

“La planificación del transporte público urbano colectivo (TPUC) basada en herramientas de apoyo a la decisión cobra cada vez más importancia, tanto en los países desarrollados como en los en vías de desarrollo”. (BARRA, A. y KAWAMOTO, E. 2005. Pág. 85)

“Una proporción importante de los viajes en las ciudades medianas y grandes son efectuados utilizando transporte público colectivo. Problemas como la asignación de flota y personal, han recibido amplio tratamiento, contándose con modelos de optimización para los cuales se dispone de algoritmos eficientes de resolución”. (BAAJ, M. y MHMASSANI H. 1995; pág. 67)

“En cambio, el problema de optimización de rutas y frecuencias posee varias fuentes de complejidad (no linealidad, no convexidad, múltiples objetivos) que dificultan tanto su formulación como la derivación de algoritmos eficientes de resolución”. (FISC, C. AND NGUYEN, S. 2017; pág. 35)

En tal sentido se crea la necesidad de realizar el estudio sobre la Asignación de Transito a la Red de Transporte de la Ciudad de Trujillo, como mejora a la Planificación vial sostenible.



Fotografía N° 01: Vista de la realidad del transporte actual en Trujillo  
Fuente: Municipalidad Provincial de Trujillo – TMT. 2019.

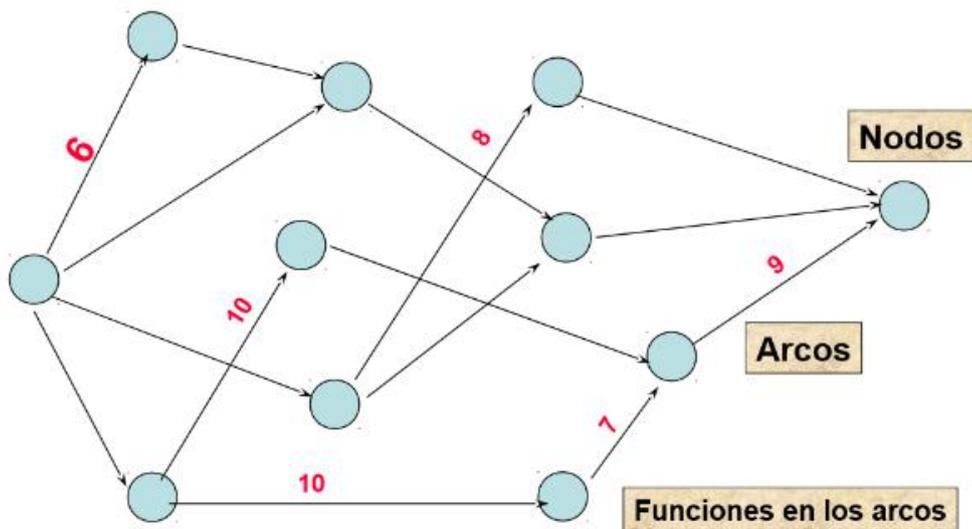
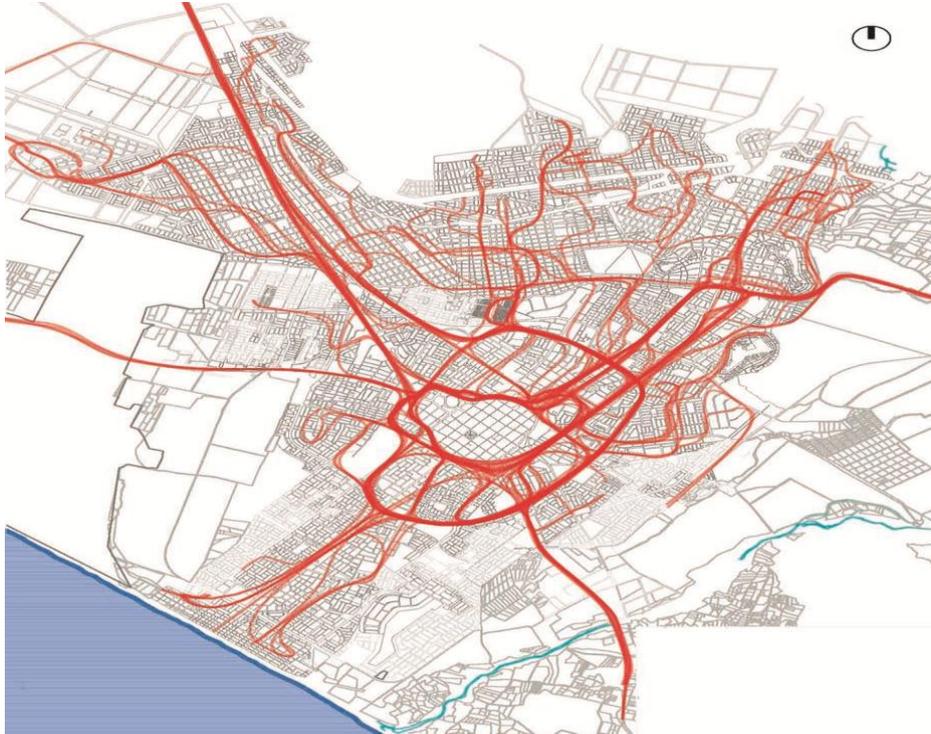


Figura N° 01: Representación de un problema de Redes

Fuente : Plan DEMETRU.



**Figura N° 02 : Rutas del transporte público de la Ciudad de Trujillo**  
Fuente: Plan DEMETRU.

### **1.1.2. Enunciado del problema**

¿Cuál es la Asignación de tránsito a la red de transporte de la ciudad de Trujillo, como mejora a la planificación vial sostenible. ?

### **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Se justifica la Investigación a realizar dado que por medio de la misma se busca:

- Resolver el problema de Asignación de tránsito a las redes de transporte de la Ciudad de Trujillo con los procedimientos de la programación lineal.
- Contribuir a la solución de un problema de transporte que surge cuando se necesita un modelo costo efectividad que permita transportar ciertos bienes desde un lugar

de origen a un destino que necesita aquellos bienes, con ciertas restricciones en la cantidad que se puede transportar.

- El Objetivo del trabajo de Investigación es encontrar los caminos para trasladar mercancía, desde varias plantas (orígenes) a diferentes centros de almacenamiento (destinos), de manera que se minimice el costo del transporte.
- La cantidad de los bienes disponibles en cada localización (origen) es limitada y la cantidad de demanda de los bienes necesarios (destino) en cada una de las localizaciones es conocida.

La importancia del presente trabajo es una propuesta para la planificación vial con información de aplicación en la ciudad de Trujillo a fin de tener una sostenibilidad en el tiempo.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.1.3. Objetivo general**

Realizar una propuesta para la asignación de tránsito para la red de transporte de la ciudad de Trujillo, como mejora a la planificación vial sostenible.

#### **1.1.4. Objetivos específicos**

- a) Elaborar una propuesta de los recorridos diversos que se tiene en la ciudad de Trujillo, con la finalidad de equilibrar la demanda y la oferta.
- b) Determinar las diversas características operacionales de los recorridos, como tiempo, velocidad, frecuencias entre unidades, tipología de vehículos a asignar a cada ruta.
- c) Recopilar información actualizada para planificación sostenible vial de la ciudad de Trujillo.

d) Realizar el diseño de asignación de tránsito a los distritos colindantes de la ciudad de Trujillo como un sistema integrado.

e) Proponer mejoras para el transporte vial de los usuarios en las rutas de los usuarios hacia destinos de viaje.

f) Realizar la propuesta de mejora del sistema de tránsito en la red existente del transporte.

#### **1.4. HIPÓTESIS**

Si se Propone la Asignación de tránsito a la red de transporte de la Ciudad de Trujillo, Mejorará la Planificación Vial Sostenible y entonces no habrá tiempo perdido, ni congestión, ni contaminación.

#### **1.5. VARIABLES**

##### **1.5.1. Variable Independiente:**

Ciudad de Trujillo.

##### **1.5.2. Variable Dependiente:**

Asignación de Transito a la Red de Transporte, como mejora a la Planificación Vial Sostenible.

##### **1.5.3. Operacionalización de variables**

**Tabla N° 01: Asignación de Transito a la Red de Transporte, como mejora a la Planificación Vial Sostenible.**

CONCEPTULIZACION	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEM	TECNICAS E INSTRUMENTOS
<p><b>ASIGNACION DE TRANSITO A LA RED DE TRANSPORTE EN TRUJILLO</b></p> <p>La ciudad de Trujillo, no es ajena a la problemática existente como: el desarrollo actual en infraestructura es insuficiente, el crecimiento vehicular desregulado, el crecimiento horizontal de la infraestructura urbana, limitaciones financieras del gobierno central, regional o local para la renovación del parque automotor , y la falta de modelo institucional normativo y técnico han hecho que el sistema de transporte existente sea ineficiente.</p>	<p>Evaluación actual de la asignación de tránsito.</p> <p>Inventario de la red de transporte de la Ciudad de Trujillo.</p>	<p>Número de vehículos.</p> <p>Número de rutas.</p> <p>Estaciones de Rutas.</p> <p>Acción de control.</p> <p>Área Saturada.</p> <p>Calidad de Servicio.</p> <p>SOAT vigente.</p>	<p>¿Cuántos vehículos tiene el parque automotor de Trujillo?</p> <p>¿Cuál es el número de rutas, área saturada y acción de control municipal?</p> <p>¿Cuál es la calidad de servicio en la red de transporte en Trujillo?</p>	<p>Información Recopilada</p> <p>Observación directa</p> <p>Resultados de ensayos</p> <p>Fichas nemotécnicas</p> <p>Cuaderno de notas</p> <p>Carta topográfica</p> <p>Cámara fotográfica</p>
	<p>Evaluación de la planificación vial sostenible en la Ciudad de Trujillo</p>	<p>Resultados cuantitativos y cualitativos de las obras de planificación vial sostenible.</p>	<p>¿Cuál es la realidad de la planificación vial sostenible en Trujillo?</p> <p>¿Cuáles son las rutas existentes en Trujillo?</p> <p>¿Existe acciones de control para las rutas y tipos de vehículos?</p>	<p>Observación directa</p> <p>Monitoreo</p> <p>Cuaderno de notas</p> <p>Registros de rutas</p> <p>Cartas topográficas</p>
	<p>Niveles de intervención</p>	<p>Mantenimiento diario</p> <p>Mantenimiento mensual</p> <p>Rehabilitación y mejoramiento</p>	<p>¿Cuáles son las tareas de mantenimiento diario?</p> <p>¿Cuáles son las tareas de mantenimiento mensual?</p> <p>¿Cuáles son las tareas de</p>	<p>Observación directa</p> <p>Fichas nemotécnicas</p> <p>Lista de chequeo</p>

			rehabilitación y mejoramiento?	
	Modalidad de ejecución	<b>Administración</b> <b>Directa</b> <b>Contrato</b> <b>Convenio</b> <b>Interinstitucional</b>	¿Cuál es la modalidad de Administración Directa? ¿Cuál es la modalidad de contrato? ¿Cuál es la modalidad de Convenios Interinstitucional?	Observación directa Cuaderno de notas

Tabla N° 02: Ciudad de Trujillo

CONCEPTUALIZACION	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEM	TECNICAS E INSTRUMENTOS
<p><b>CIUDAD DE TRUJILLO</b> Treinta y ocho puntos con mayor incidencia de siniestralidad en el año 2016 detecto en la ciudad de Trujillo el personal de la Subgerencia de seguridad Vial de la municipalidad provincial. No se cuenta con informacion acerca de la metodologia para mejorar el proceso de asignacion de transito a la red de transporte.</p>	Mantenimiento diario	Equipo y maquinaria Mano de obra Materiales	¿Qué equipo y maquinaria se necesita cuando hay accidentes? ¿Cuál es la mano de obra necesaria? ¿Qué materiales se necesitan?	Observacion directa Fichas nematécnicas Cuaderno de notas Manual de rubros y rendimientos
	Mantenimiento mensual	Equipo y maquinaria Mano de obra Materiales	¿Qué equipo y maquinaria se necesita cuando hay accidentes? ¿Cuál es la mano de obra necesaria? ¿Qué materiales se necesitan?	Observacion directa Fichas nematécnicas Cuaderno de notas Manual de rubros y rendimientos
<p><b>Costos de operación y mantemiento de las vias urbanas y sémaforos en la ciudad de Trujillo</b> El presupuesto designado para el mantenimiento y conservacion se realiza por el gobierno central, Regional y Local</p>	Costos variables	Alimentacion Vestimenta Medicina	¿Cuánto consume en alimentación? ¿Cuál es el tiempo de duracion de su vestimenta? ¿Cuánto se gasta en medicina?	Facturas Hojas de salud

	Costos fijos	Seguros Impuestos	¿Cuánto gasta en seguros? ¿Cuánto gasta en salarios?	Cuaderno de notas y registro de facturas
--	--------------	----------------------	---	--

## II. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1. ANTECEDENTES

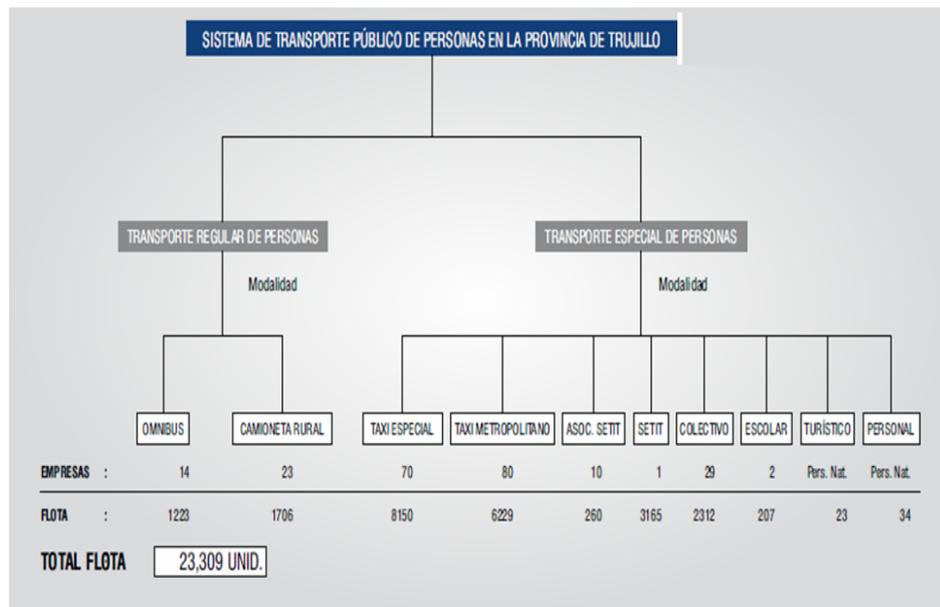
“Las primeras herramientas de diseño óptimo de rutas y frecuencias surgen en la década del 70, basados en ideas intuitivas, sin una formulación del modelo y su función objetivo, en algunos casos sin exploración del espacio de soluciones”. (AXHAUSEN Y SMITH, 1984; Pág. 86).

“En la década del 80 se formulan algunas funciones objetivo, y se incorporan nuevos parámetros tales como el cubrimiento de la demanda, factor de carga (proporción de pasajeros parados respecto a la cantidad de asientos) y transferencias de los buses”. (AXHAUSEN Y SMITH, 1984; Pág. 94).

“En la década del 90 aparecen otros enfoques, como ser la utilización de metaheurísticas y la exploración del espacio de soluciones. La facilidad de integrar módulos existentes y de incorporar interfaces gráficas, estimulan el desarrollo de nuevos métodos, los que se diferenciarán por su:

- a) **Adaptabilidad:** respecto de los datos disponibles, principalmente aquellos relativos a la topología de la red de tránsito y a la demanda de viajes (matrices origen-destino);
- b) **Interactividad:** con el usuario, de modo de permitir la incorporación de conocimiento humano (técnico humano) en el proceso de toma de decisiones;
- c) **Eficiencia:** calidad en los resultados y tiempos de procesamiento razonables;
- d) **Flexibilidad:** en cuanto al horizonte de planificación, los primeros métodos refirieron a planificaciones de corto y mediano plazo”. (Axhausen y Smith, 1984; Pág. 138).

En la provincia de Trujillo, se ha dado un crecimiento considerable del parque automotor, contando en la actualidad con 23,309 und. De transporte público de manera formal entre los que se encuentran taxis, combis, colectivos camionetas, microbuses, transporte turístico, servicio de movilidad escolar, transporte de personal, siendo gran parte con antigüedad mayor a 20 años (Figura N° 03).



**Figura N° 03 : Sistema de transporte público en la provincia de Trujillo**  
Fuente: MPT-TMT).

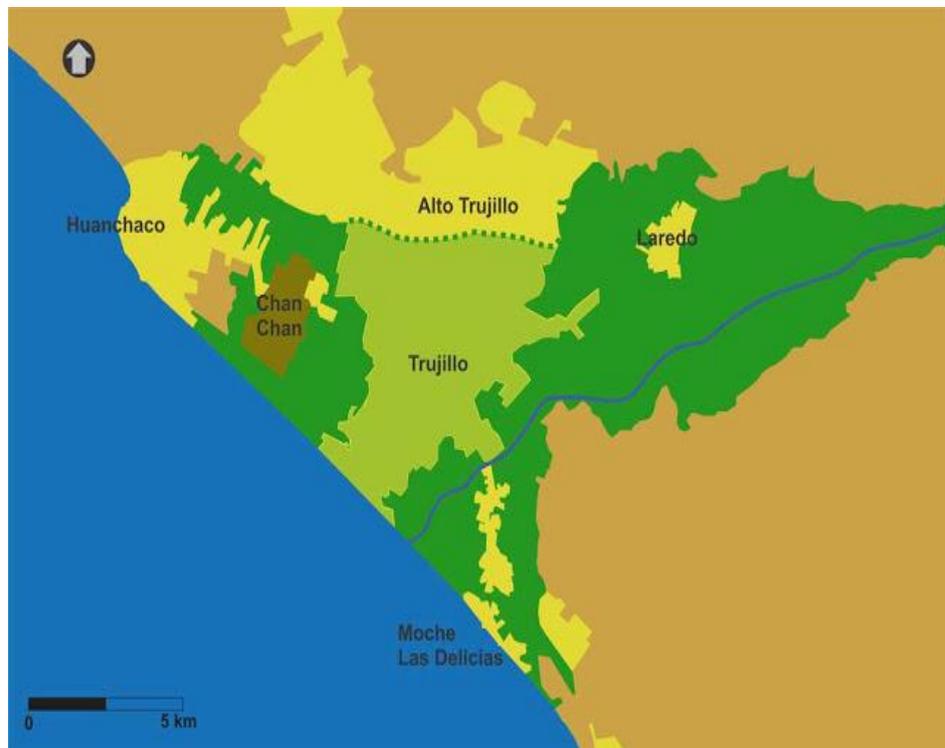
Las matrices determinadas a través de matriz origen destino se calculan con tres metodologías:

- 1.- Estimación directa:** se desarrolla a través de encuestas a domicilio a aplicado en los vehículos de viaje
- 2.- Estimación por modelos de demanda:** Se realiza por el modelo de gravedad o distribución.

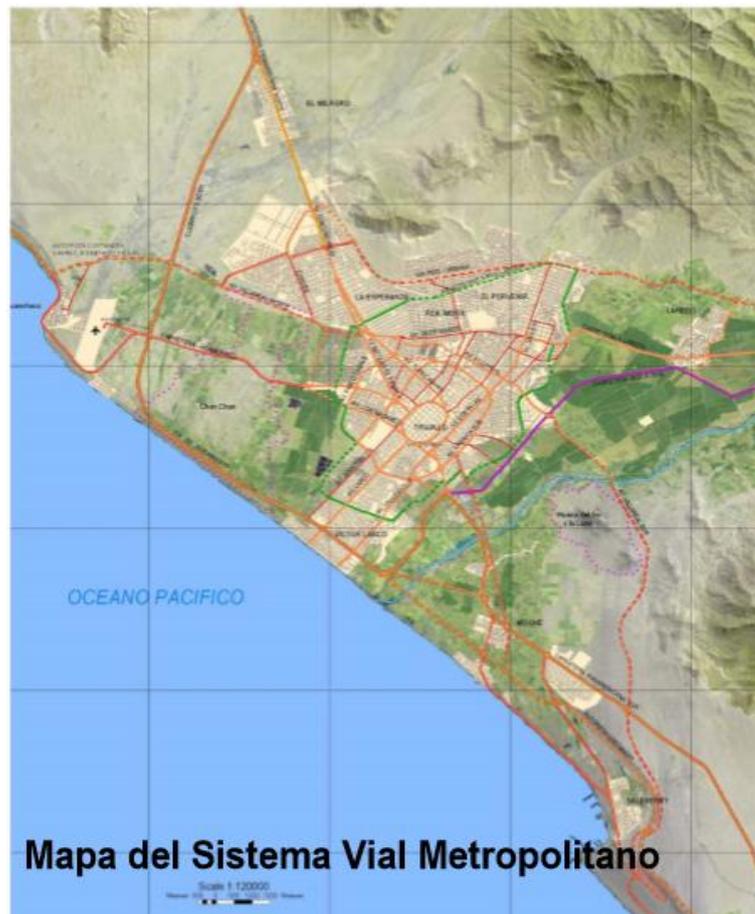
**3.- Estimación mediante conteos de tráfico:** Se actualiza con conteo del tráfico para alimentar la data de la matriz origen-destino.

De las aproximaciones indicadas anteriormente, la primera es la utiliza los resultados de la teoría de muestras, siendo la metodología con resultados más acerteros, siendo sus encuestras amplias y con mucho detalle, permitiendo elaborar matrices origen destino.

**Figura N° 04 : Trujillo: sistema de ocupación metropolitano.  
(Fuente: Google Earth.)**



La definición de sus causas es una tarea por demás compleja, se estima que el crecimiento demográfico, el crecimiento del parque automotor, las condiciones geográficas de la ciudad que limitan la expansión de la infraestructura vial; y, la preferencia por el uso del automóvil; inciden dramáticamente en los niveles de aforo que presenta la red vial.



**Figura N° 05: Mapa del sistema vial Metropolitano de Trujillo.**  
**Fuente: Atlas ambiental de Trujillo**

La congestión, en sí misma, genera un costo en tiempo de movilización; sin embargo, existen muchos otros problemas sociales que desencadena; uno de los más importantes es la contaminación ambiental y sus efectos sobre la salud humana.

Desde una perspectiva económica, la congestión es un medio que racionaliza cuantitativamente el exceso de demanda por espacio para circular por ciertas vías a determinadas horas; no obstante, este mecanismo ocasiona inconvenientes en el mercado de movilización cuando el nivel de aforo se torna tan excesivo, que disminuye la velocidad de todos los vehículos en circulación a la mitad de la velocidad libre de congestión; conforme estimación de la Comisión Económica para América Latina.

## **INVESTIGACIONES INTERNACIONALES**

**1.- FERNÁNDEZ OLIVARES, A. G. (2011),** Modelos matemáticos de asignación de tránsito. Aplicación a la red metropolitana de la ciudad de México y sus efectos en el STC-Metro; siendo sus conclusiones:

- “La planificación del transporte urbano es un problema fundamental en las grandes ciudades.
- El presente trabajo forma parte de un proyecto de planeación cuyo objetivo es predecir el comportamiento de los usuarios en un sistema de transporte.
- Específicamente, se estudian modelos matemáticos de asignación de tránsito que están basados en el supuesto de que los usuarios utilizan estrategias de tipo óptimo para alcanzar su destino.
- Los modelos y sus algoritmos de solución se aplican a la red de transporte del Valle de México, utilizando el programa EMME, el cual tiene incorporadas las herramientas que permiten predecir la asignación de la demanda en escenarios con congestión y restricciones de capacidad en las líneas de transporte”.

**2.- GONZALEZ CABRERA, H. (2012).** Implementación de un algoritmo para asignación de tráfico vehicular”. México. Universidad Nacional Autónoma de Mexico; siendo sus conclusiones:

- “En esta tesis se llevó a cabo la implementación de un algoritmo que permite resolver el problema de equilibrio del usuario (PEU) en una Red Vial congestionada que posee diferentes tipos de arcos.
- Su Formulación matemática, así como la de las funciones de tiempo de viaje fueron efectuadas en el laboratorio de transporte y sistemas territoriales (LTST) del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Londoño y Lozano, 2012).

- El Proceso unificado ha sido el marco de desarrollo de software empleado en dicho trabajo de investigación con el objetivo de brindar estabilidad, control y organización durante la implementación realizada. Dicha metodología se adaptó de gran forma al carácter de investigación que presenta el Proyecto, capturando los requisitos de mayor riesgo y modificando aquellos que surgieron al momento de evaluar y verificar las distintas posibilidades que existen para llevar a cabo la implementación.
- El Algoritmo soluciona el problema de equilibrio del usuario y distribuye el flujo vehicular sobre la Red Vial. Las funciones de tiempo de viaje han sido programadas para trabajar con cada tipo de arco se combinan en un solo proceso de Asignación”.

## **INVESTIGACIONES NACIONALES**

**1.-ASTETE CHUQUICHAICO, R. G. (2011).** “Metodología para mejorar el proceso de Asignación de tráfico a una red de Transporte”; siendo sus conclusiones:

- “El Proceso de planificación del transporte consta de varias fases, una de ellas es la etapa de asignación, la cual sirve para crear nuevos escenarios para la toma de decisiones.
- Los problemas de Asignación de tráfico se resuelven optimizando los flujos en una determinada red de transporte, los algoritmos resuelven problemas de asignación de un origen contra varios destinos.
- Las funciones que describen el flujo de transporte, son funciones no lineales con restricciones lineales, estas funciones son efectivas cuando consideran solo algunos parámetros principales involucrados en los problemas de flujos de redes, tales como el costo de desplazamiento y el tiempo de desplazamiento”.

**2.- LÓPEZ ESQUIVEL, D. E. (2014).** Realizó una investigación denominada: **“Diseño de un modelo de monitoreo para mejorar el flujo de tránsito vehicular a través de semáforos inteligentes en la ciudad de Trujillo”**; donde se llegó a las siguientes conclusiones:

- “El Análisis del sistema actual de tránsito vehicular, realizado en las principales intersecciones de la Ciudad de Trujillo, arrojó como resultado la necesidad de controlar las condiciones del mismo a través del soporte de una herramienta computacional como es la propuesta en el presente trabajo de investigación.
- Como parte del diseño del sistema de monitoreo se identificó los indicadores de mal funcionamiento de tránsito vehicular, los mismos que se orientan a agilizar el seguimiento adecuado y registro de los acontecimientos viales ocurridos.
- El Diseño del Algoritmo de tránsito vehicular de monitoreo propuesto se ajustó a las necesidades encontradas en el centro de control de tráfico de la Municipalidad provincial de Trujillo, utilizando como base los formatos empleados: Información vial, reparación de semáforos, configuración de semáforos, análisis microscópico, análisis macroscópico.
- Los actuadores, sirvieron de guía para el diseño arquitectónico de la propuesta computacional mejorando las condiciones de movilidad de los vehículos y peatones, por medio de la optimización de tiempos, fases y ciclos de las intersecciones viales sanforizadas.
- El diseño del sistema propuesto produce un mejoramiento en el tránsito vehicular en un 20% más para el centro de control de tráfico vehicular, entre lo que destaca el análisis del tránsito vehicular, registro de acontecimientos viales y la generación oportuna de informes sobre los datos obtenidos, así como lo referente a la gestión vial y vehicular de la Ciudad”.

**3.- RUIZ SALINA, M. T. (2017).** Realizó una investigación denominada: **“Modelación de una Red de transporte universitaria mediante el software VISUM 15. LIMA.”**; donde llego a las siguientes conclusiones:

- “Las mejoras que se presentarían en el Área de Estudio sobre la que se aplicaron las modificaciones, incluyeron la anulación de nueve vías de transporte privado en los centros 1; 2 y 5, por tratarse de vías que, al ser eliminadas a corto plazo, no significarían un impacto notable. Además, se colocaron como máximo vías de dos carriles por sentido en toda la red de transporte. Estas medidas buscaban responder a la hipótesis de la reducción de infraestructura de transporte motorizada por medio de la movilidad sostenible. Con estas nuevas condiciones, además de la reubicación y creación de servicios, la disminución que se obtendría del uso del transporte privado, según los resultados del software empleado, sería de 31 %.
- Dicho resultado da pie a sostener que es posible el cambio paulatino de la prioridad en los modelos de transporte, disminuyendo el privilegio al automóvil y apostando por el aumento de las áreas con espacios de interacción social. Estas áreas, no implican ser espacios urbanizados o no, ya que una ciudad puede ser urbanizada con la existencia de distintos puntos de servicios (diversa), pero en donde además la calle, lugar público de toda la ciudad es diseñada para ser aprovechada por el ciudadano, en su transcurso diario. Por ejemplo, a través de la caminata y la movilización en bicicleta.
- El aumento de la partición modal en el sistema de transporte público, en contraposición a generar una Red de transporte más congestionada y con más demoras, conllevo a un aumento de la velocidad promedio de viaje y reducción de tiempo promedio de viaje por transporte público. Se puede sustentar la relación entre uno de los puntos clave del nuevo enfoque de la planificación de transporte: promover por medio de políticas de transporte el cambio modal y menores impedancias del modo de transporte que se quiere

beneficiar. Como se mencionó en el estado del arte, la preferencia de los usuarios por algún modo de transporte, recae mucho en las impedancias que son el costo beneficio expresado principalmente en tiempo costo monetario. Por medio de facilidades como las implementadas en el modelo y que son aplicadas en planes de movilidad, entre ellas carriles segregados, mayores velocidades permitidas para el transporte masivo y puntos de parada accesibles en toda la Red de transporte, se logra una mejor circulación con menos demoras y por tanto reducción en los tiempos de viaje. Esta reducción de impedancia, haría más atrayente el uso del modo de transporte favorecido, lo cual se reflejó en un aumento del 31% de uso del transporte público en el modelo.

- De la investigación realizada y el uso del software, se pudo observar que el software VISUM se usa ingresando datos tomados pertenecientes a la etapa de generación de viajes, como son la matriz de viajes entre las zonas del área de estudio, los estratos o grupos de personas, los modos de transporte, incluso es posible ingresar una matriz de horario de viaje. Sin embargo, estas cualidades del software, no cubrían las necesidades para efectuar el diseño de una red de transporte siguiendo una metodología en base a la planificación del uso del suelo, etapa muy importante considerada en la movilidad sostenible.
- Finalmente de la investigación realizada y el piloto del plan de movilidad que se basa en otros aplicados en Chile y España e indicadores sugeridos por el observatorio de prospectiva Tecnológica Industrial, OPTI y el observatorio de movilidad Urbana del banco de desarrollo de América Latina, CAF; identificamos que algunos parámetros esenciales para cambiar nuestro modelo de planificación, son la planificación de la oferta de actividades y servicios, la estructura del uso de suelo y la jerarquía modal, Con estos tres parámetros, es posible generar ciudades policéntricas con

diversidad adecuada de los servicios que la población necesita y además compactas, donde sea posible llegar a los puntos de destino por medio de distintos modos de transporte sostenibles y de forma accesible”.

## **MARCO TEORICO**

### **ESTUDIOS ORIGEN-DESTINO**

El estudio está orientado a establecer la caracterización de la demanda de transporte en el área de estudio.

**Ámbito de la encuesta.** - El área de interés del estudio se determina por su límite exterior conocido como cordón externo. Una vez definido, el área se subdivide en zonas espacialmente desagregada (hogares) sobre los orígenes y destinos de los viajes, de forma que variables como la población y los viajes puedan ser cuantificadas espacialmente. El interior del área de estudio también pueden existir cordones internos y líneas pantalla (es decir, una subdivisión ficticia que siga límites naturales o artificiales en los que existan pocos cruces para atravesarlos, como pueden ser un río o un barranco).

**Encuestas domiciliarias.** - Deben obtenerse los desplazamientos efectuados por todos los miembros de la familia en todos los modos de transporte, tanto dentro del área de estudio como entrando y saliendo de dicha área, durante el período temporal de referencia. Los datos obtenidos de la encuesta de origen y destino (O-D), se utilizan directamente para estimar los flujos de viajes entre todas las zonas en que se divide una ciudad. Estos intercambios de viajes se representan normalmente mediante valores que aparecen en una celda de una matriz de origen y destino; es decir, cada celda de ésta matriz corresponde a una combinación particular de origen y destino de los viajes urbanos.

### **PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE**

La planificación es la fase fundamental del proceso de desarrollo y organización del transporte, pues es la que permite conocer los problemas, diseñar o crear

soluciones y, en definitiva, optimizar y organizar los recursos para enfocarlos a atender la demanda de movilidad.

A principios de los años 50's los estudios se enfocaban en la investigación del desarrollo de nuevas vías y al pronóstico del tránsito en el corto plazo. Los modelos que se enfocaban en la planeación de redes viales, no consideraban rutas individuales e ignoraban el hecho que el tiempo de viaje depende del flujo o volumen del tránsito de las rutas congestionadas y que múltiples vías pueden servir para un par origen - destino determinado (O-D).

**Plan vial de transporte urbano.** - Es una herramienta de gestión que permite mediante diversos medios técnicos, realizar una estructuración del sistema de transporte urbano logrando un equilibrio entre la oferta y la demanda. Es decir que la operatividad de los medios de transporte vaya en proporción a los usuarios de transporte permitiendo reducir los niveles de congestión vehicular, los tiempos de viaje, alcanzando un mejor servicio

## **TEORÍA DE DISTRIBUCIÓN DE TRÁNSITO Y MODELOS DE DISTRIBUCIÓN**

Los modelos de distribución agregados de viajes se usan para predecir flujos entre zonas de origen y de destino en cada celda de la matriz, el cual permite tener una mejor idea acerca del patrón de generación de viajes, desde y hacia donde ocurren los viajes, los modos de transporte escogidos y las rutas tomadas.

El método que predomina en la planeación de transporte urbano es el modelo gravitacional, el proceso puede realizarse de varias maneras: por períodos y propósitos, por categorías socioeconómicas, por viajes motorizados, o combinaciones de ellos, entre otros.

## **PAQUETE DE SIMULACION TRANSMODELER**

Según DE CEA J. (2014) “TransModeler es un potente y versátil paquete de simulación, aplicable a una amplia gama de tareas de planeamiento y modelamiento de tráfico. TransModeler puede simular toda clase de redes de viales, desde autopistas hasta calles de los centros de las ciudades, y puede analizar redes

multimodales de áreas extensas con gran detalle y fidelidad. Usted puede animar el comportamiento de sistemas de tráfico complejos para ilustrar la circulación de tráfico, la operación semafórica, y el funcionamiento conjunto de la red”. (Pág. 110)

“TransModeler marca un hito por su facilidad de uso en la realización de simulaciones complejas, e integrado con TransCAD, el software más popular del pronóstico de la demanda de transporte en los Estados Unidos, permite proporcionar una solución completa para evaluar los impactos del tráfico futuro de diversos escenarios de planeamiento. Por otra parte, las herramientas de cartografía y de simulación de TransModeler permiten presentar los resultados de los estudios de una manera fácilmente comprensible”. (DE CEA J., 2014; Pág. 110)

“TransModeler está basado en la investigación más actualizada y emplea las más modernas técnicas metodológicas y la más eficiente tecnología de software de manera que le permite desarrollar simulaciones de tráfico totalmente innovadoras. TransModeler incorpora ruteo dinámico de viajes basado en tiempos de viaje histórico o simulado. Igualmente está en capacidad de incorporar viajes pre especificado o movimientos de giro en intersecciones. Simula transporte público, así como tráfico de automóviles y camiones y maneja un amplio espectro de ITS (Sistemas de transporte inteligente) como, por ejemplo, recolección electrónica de peajes, guiado en ruta, y detectores de tráfico”. (DE CEA J., 2014; Pág. 111)

“TransModeler trabaja con software de pronóstico de demanda de viajes para suministrar una capacidad integrada para ejecutar análisis operacional de proyectos y planes de transporte. Los resultados de las simulaciones de tráfico pueden ser empleados para retroalimentar pronósticos de demanda de viajes”. (DE CEA J., 2014; Pág. 111)



**Figura N° 06: Vista de modelo mediante el software TRANSMODELER**  
**MODELOS DE SIMULACIÓN**

“TransModeler es un versátil simulador de tráfico con muchas características avanzadas que incluyen el soporte para aspectos claves de los Sistemas de Transporte Inteligente. TransModeler simula una amplia gama de tipos de servicios que incluyen redes urbanas de uso mixto y redes de autopistas, y puede ser adaptado fácilmente para modelar áreas geográficas específicas tales como centros de las ciudades, corredores de autopistas o carreteras de circunvalación”. (DE CEA J., 2014; Pág. 115)

- “Modela autopistas y vías urbanas en la misma red con modelos de comportamiento del conductor que son sensibles a las interacciones complejas entre vehículos en áreas de convergencia de tráfico y en intersecciones”.
- “Modela glorietas con modelos de comportamiento del conductor que captura la interacción exclusiva entre los vehículos que ingresan y los que circulan en la glorieta”.

- “Modela carriles para automóviles de alta ocupación, carriles de buses e instalaciones de peaje para un mejor entendimiento de sus efectos en la dinámica del sistema de tráfico”.
- “Modela planes de evacuación y escenarios para responder a desastres naturales, derrames peligrosos y otro tipo de emergencias”.
- “Modela zonas de trabajo para manejar el tráfico durante la construcción o ejecución de planes de mantenimiento”.

## **ASIGNACIÓN DINÁMICA DE TRÁFICO**

“A diferencia de otros simuladores más antiguos que requieren la incorporación previa de movimientos de giro, TransModeler puede determinar los recorridos de los vehículos aplicando asignación dinámica de tráfico a tablas de origen y destino de viajes”. (FERNÁNDEZ A. G., 2016; Pág. 120)

“Los tiempos de viaje por períodos y por segmento de red pueden corresponder a datos de entrada de información externa o desarrollados ejecutando asignación y simulación de tráfico. La trayectoria de los vehículos también puede corresponder a información externa, incluyendo aquellos generados por TransCAD o creados o editados por el analista”. (FERNÁNDEZ A. G., 2016; Pág. 120)

“Cuando se presentan demoras no esperadas, algunos viajeros cambiarán sus recorridos durante su viaje. Esto puede corresponder a la respuesta a una señal de advertencia o a niveles de congestión muy elevados”. (FERNÁNDEZ A. G., 2016; Pág. 120)

## **CONTROL DE TRÁFICO**

### **SEÑALES DE TRÁFICO**

“TransModeler simula un amplio espectro de señales de control de tráfico”: (MARTÍNEZ, M., 2018; Pág. 115)

- “Simula sistemas semafóricos comunes, incluyendo tiempos fijos o control actuado por la demanda”.
- “Simula sistemas semafóricos más complejos incluyendo sistemas coordinados y sistemas coordinados actuados en relación a la demanda”.

- “Modelo de estrategias de derecho preferente de vía para transporte público o aplicaciones para vehículos de emergencia”.
- “Evalúa requerimientos de señales y genera planes semafóricos actuados basados en tablas de volúmenes de movimientos de giro”.
- “Aplica plantillas adecuadas al usuario para crear controles semafóricos actuados en lugar de conceptos basados en anillos y barreras o diagramas de grupos de fases”.

### **APLICACIONES DE ITS (SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE)**

TransModeler es capaz de simular la respuesta del conductor a una serie de dispositivos de control e información de tráfico para aplicaciones de ITS:

- Modela señales de carriles de uso y mensajes variables y flexibles dirigidos a conductores de camiones, vehículos de transporte público u otra clase de vehículos.
- Simula el impacto de señales de límites variables de velocidades sobre el flujo de tráfico.
- Evalúa el efecto de la medición de rampas en rampas de autopistas y la operación de vías urbanas adyacentes.
- Simula el impacto de la información del tiempo real de tráfico en la reprogramación del itinerario del conductor.

### **2.3. MARCO CONCEPTUAL**

#### **- BONDADES Y DEFICIENCIAS DE LOS MÉTODOS DE ASIGNACIÓN DE TRÁNSITO**

“Para estudiar los problemas de asignación de tránsito en infraestructura vial, normalmente se toman en consideración los tiempos y distancias de recorrido”. (AXHAUSEN Y SMITH, 1984; Pág. 90)

“En algunos procedimientos citados en los tratados de Ingeniería de Tránsito, estos dos factores se traducen en costos. En gran parte de los métodos se considera una igualdad de condiciones en cuanto a la calidad de la superficie de rodamiento de los caminos”. (AXHAUSEN Y SMITH, 1984; Pág. 90)

“Parecería lógico que los itinerarios con menor costo en cuanto tiempo de recorrido fueran los más utilizados por los usuarios, sin embargo, esta aseveración sólo se cumple en el caso de redes urbanas, es decir en donde el nivel de ingresos es más importante y las tolerancias de tiempo de los desplazamientos, son muy cortas, además de estar en función de la distancia de recorrido y del nivel de congestión de las rutas, ya que las condiciones de proyecto son muy similares”. (AXHAUSEN Y SMITH, 1984; Pág. 90)

“Esta situación no se cumple en el caso de redes de transporte interurbano debido a que las características geométricas y condiciones de rodadura entre las rutas que conforman dichas redes son sensiblemente distintas, por lo que es necesario incluir estos atributos en el cálculo de los costos totales de transporte”. (AXHAUSEN Y SMITH, 1984; Pág. 92)

“En la literatura especializada existen una gran variedad de métodos de asignación de tránsito, tanto para el medio urbano como para el interurbano, la mayoría de ellos aplicables a las condiciones de operación de países desarrollados, por lo que cuando se requiere aplicar alguno de ellos a las condiciones particulares de países como el nuestro, se requiere llevar a cabo consideraciones adicionales con objeto de reflejar su realidad”. (AXHAUSEN Y SMITH, 1984; Pág. 92)

“El planificador tiene la responsabilidad de seleccionar entre ellos, el método que se adecue y se ajuste a los problemas de la red vial por analizar, garantizando así el empleo racional y adecuado de los recursos disponibles”. (AXHAUSEN Y SMITH, 1984; Pág. 92)

Siendo un método adecuado para el estudio de análisis de redes regionales de transporte el propuesto por la American Association of State Highway and Transportation Officials (**AASTHO**) y además del método de redes en donde se toma en cuenta los costos del transporte.

“Durante el desarrollo del estudio, al aplicar el método AASHTO se buscó su utilidad en el análisis del flujo vehicular en una pequeña parte de la red de transporte de la ciudad de Trujillo, por lo que se incluyó una ligera variante al momento de realizar las encuestas Origen-Destino (O-D), con objeto de conocer el tránsito potencial susceptible de usar alguna de las rutas alternas que integran la red en observación, obteniendo con ello un estudio de demanda declarada apegado a las condiciones particulares de operación de la red, a esta versión que considera una pregunta adicional sobre el nivel de cuota que estaría dispuesto a pagar el usuario se le denomina método AASTHO modificado”. (AXHAUSEN Y SMITH, 1984; Pág. 92)

#### **MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE TRÁNSITO DE LA AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO)**

“El método de asignación de tránsito de la AASTHO1, originado en los años cincuenta, se basa en la observación estadística del comportamiento de los conductores cuando pueden elegir entre dos itinerarios y se conoce de manera objetiva la relación de tiempos de recorrido entre ellos”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 52)

“El método es utilizado principalmente en los países desarrollados, debido a que en sus redes de carreteras prevalecen características geométricas y condiciones de rodadura semejantes”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 52)

“El tiempo de recorrido constituye la variable más representativa del método, misma que es una función de la distancia por recorrer  $t = f(d)$ , sin embargo, en países en los que la superficie de rodadura y las características geométricas no son equiparables se recurre a otro tipo de métodos, como el que será descrito en capítulos posteriores de este trabajo”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 52)

“Normalmente, cuando los análisis se realizan en países desarrollados, las velocidades de operación en los distintos arcos (rutas) de una red en estudio se determinan en gabinete a partir de los manuales de capacidad con que se cuente. Sin embargo, en países como el Perú, en donde existe una marcada diferencia en las condiciones de operación, resultado del estado físico en que se encuentra la superficie de rodamiento, es recomendable obtener las velocidades de operación promedio a partir de los estudios Origen-Destino, disponibles”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 60)

“El procedimiento que se recomienda utilizar en los estudios, para determinar las velocidades de operación son los de lectura de placas y los de vehículo flotante, los cuales son descritos en el apartado relativo a la estimación del factor de utilización (FU) que interviene en la expresión matemática que se emplea en la estimación de una nueva asignación de tránsito vehicular”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 60)

“Para determinar el tránsito potencial por asignar (situación deseable) a una carretera o una red regional de carreteras con la aplicación del método de la AASHTO, es necesario determinar previamente el factor de utilización, por el cual deberá afectarse el tránsito usuario de la ruta existente (situación actual)”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 60)

“El factor de utilización toma en cuenta la relación entre los tiempos de recorrido de los itinerarios que conforman la red en análisis, es decir el cociente del tiempo de recorrido de la situación deseable y la situación actual”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 61)

## **ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE UTILIZACIÓN**

“El método AASHTO considera la siguiente expresión para el cálculo del factor de utilización (FU). Este factor toma en cuenta los tiempos de recorrido en la ruta a la

que se pretende asignar un volumen de tránsito, la cual para efectos del estudio recibe el nombre de ruta alterna (cuando la red en estudio ya existe) o bien ruta con proyecto (cuando la ruta en estudio no existe y se pretende incorporar a la red que se trata de analizar). Asimismo, se considera el tiempo de recorrido del tránsito en la ruta de aquella que estaría en posibilidades de ceder una parte de su volumen de tránsito, a la que se denominará situación actual”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 75)

$$FU = \frac{1}{1 + \left( \frac{\text{Tiempos de recorrido de la ruta alterna o con proyecto}}{\text{Tiempos de recorrido de la ruta en la situación actual}} \right)^6}$$

Los tiempos de recorrido pueden ser obtenidos de dos formas, en gabinete y en campo.

“En el primer caso, el cálculo del tiempo de recorrido se realiza normalmente utilizando el Manual de Capacidad Vial, el cual proporciona al analista la metodología para estimar el nivel de servicio a que opera una carretera, un tramo o un subtramo”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 75)

“La estimación del nivel de servicio depende de varias variables, tales como el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), la composición vehicular, el alineamiento vertical y horizontal, el tipo de terreno en que se localiza la carretera, y sus características geométricas, entre otras”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 75)

“En este sentido, al determinar el nivel de servicio al cual está operando un tramo de la carretera, se le asocia una velocidad de operación en función de otras características operativas, tales como la distancia de visibilidad y la distancia a obstáculos laterales. Una vez determinada la velocidad de operación, el tiempo de recorrido es el cociente de la longitud del tramo entre la velocidad de operación determinada”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 75)

“En el segundo caso, el estudio de tiempos de recorrido se realiza en campo empleando el método de placas o el método del vehículo flotante, este tipo de estudios, normalmente se llevan a cabo en forma simultánea a la encuesta Origen Destino (O-D)”. (LAM W., GAO Z. Y YANG N., 2014; Pág. 75)

### **MÉTODOS EMPLEADOS EN CAMPO PARA ESTIMAR LOS TIEMPOS DE RECORRIDO VEHICULAR**

“Dos son los métodos que se emplean normalmente en campo para obtener los tiempos de recorrido vehicular. En ambos casos, al realizar el muestreo, es posible obtener los tiempos de recorrido promedio por tipo de vehículo y de toda la muestra vehicular”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 80)

“A continuación, se describen el método de placas y el de vehículo flotante, exponiéndose las bondades y desventajas de cada uno”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 80)

#### **MÉTODO DE PLACAS**

“El método de placas consiste en colocar dos brigadas por sentido de circulación en cada uno de los tramos en que se realice la medición, integradas por dos personas. Las brigadas deberán ubicarse en lugares estratégicos del tramo, de tal suerte que una persona tome la lectura de la placa y otra con cronómetro en mano la hora de lectura, estos sitios pueden ser la entrada o salida de la estación Origen-Destino, los reductores de velocidad por el paso por poblaciones, topes, puntos de inspección militar o fitosanitaria, etc.” (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 81)

“La realización de la encuesta O-D, no es una condición necesaria para llevar a cabo los estudios de tiempo de recorrido, ya que éstos pueden realizarse por separado. El número de brigadas, dependerá del número de tramos en que se seccione la carretera para realizar los estudios de tiempos de recorrido y velocidades de operación, colocando cuatro brigadas por tramo, dos por sentido de circulación. La información que deberá asentar cada integrante de la brigada en los formatos establecidos para su estudio son: nombre de la carretera, identificación del tramo, fecha, hora de inicio y hora de terminación de la lectura, tipo de vehículo, número

de matrícula (placa) y hora en que pasa por el punto de lectura”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 81)

“Al revisar los números de matrícula, se seleccionan aquellos que coinciden en ambos puntos de lectura del tramo, se clasifican por tipo de vehículo y se obtiene el tiempo de recorrido promedio por sentido de circulación en el tramo, a partir del cual puede ser estimada la velocidad de operación promedio”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 81)

“Para obtener la velocidad de operación y tiempo total de recorrido de la carretera o de toda la ruta, se obtiene la velocidad ponderada por tipo de vehículo y a partir de ella el tiempo total de recorrido”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 81)

### **MÉTODO DEL VEHÍCULO FLOTANTE**

“El método del vehículo flotante, consiste en cronometrar el tiempo de recorrido de cada tipo de vehículo. Los responsables del estudio de campo realizan esta medición por persecución, es decir se da seguimiento al tipo de vehículo que se está muestreando. Cuando se trate de vehículos de pasajeros, los responsables de medir los tiempos de recorrido se incorporan como usuarios en el vehículo objeto de la muestra, cronometrando los recorridos sin considerar los tiempos muertos por paradas continuas (ascenso y descenso de pasajeros, y tiempo para tomar algún refrigerio)”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 83)

“El cálculo del tiempo de recorrido en una red en la que se presenta la situación de ruta con proyecto (situación deseable o futura), se realiza en gabinete con base en la velocidad de proyecto, misma que dependerá de las características geométricas de los tramos que integran la nueva ruta”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 83)

“Cuando se analiza una red con varias alternativas de viaje ya existentes, el análisis se realiza a partir de la comparación de los tiempos de recorrido de las distintas alternativas. La alternativa que acuse menor tiempo de recorrido, será considerada como la ruta con proyecto, y las restantes constituirán en su momento las rutas en la situación actual”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 83)

“Cuando la relación entre tiempos de recorrido de dos alternativas en estudio es igual a 1, la distribución desde el punto de vista teórico sería igual para cada uno de los arcos considerados, es decir se asignaría el 50% a cada una de las rutas en análisis”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 84)

En la Figura N° 07, se muestra la relación teórica de tiempos de recorrido y el porcentaje de asignación de tránsito.

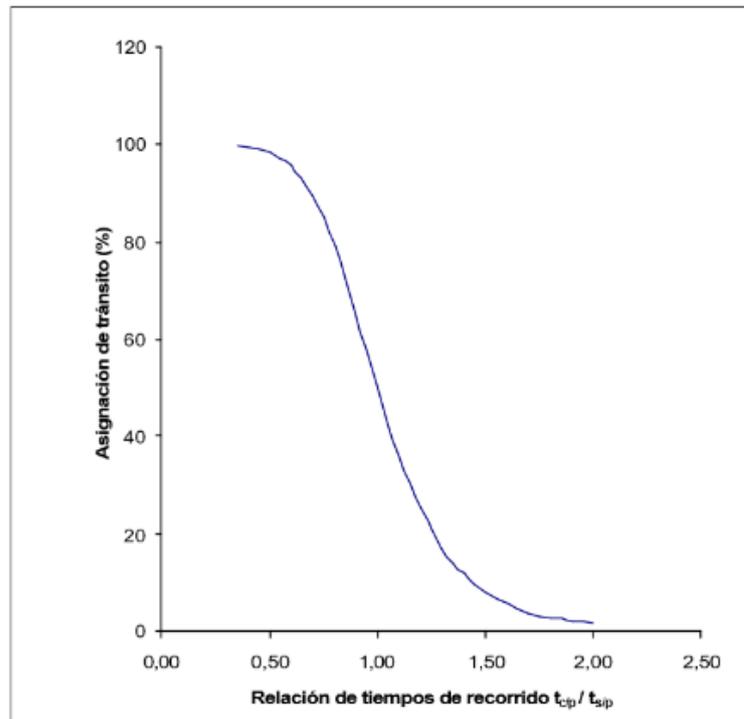
“En estricto sentido, bajo las mismas condiciones de operación y cuando los tiempos de recorrido de dos alternativas son iguales, la distribución del tránsito es de 50% para cada una de ellas”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 84)

### **ESTIMACIÓN DEL TRÁNSITO POTENCIAL**

“La estimación del tránsito potencial usuario en rutas alternas con peaje, se encuentra asociada a un factor de cuota, mismo que a su vez está en función del tipo de itinerario que caracteriza su recorrido”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 86)

“Para obtener mayor precisión en la estimación del tránsito potencial, es recomendable utilizar la composición vehicular en cada uno de los recorridos, ya que dichas composiciones presentan condiciones de operación distintas”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 86)

“Además, si la ruta alterna es de peaje, la composición vehicular del tránsito tiene gran importancia al momento de estimar el factor de utilización, toda vez que el tiempo de recorrido se encuentra en función directa con la velocidad de operación de cada tipo de vehículo (A; B y C)”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 86)



**Figura N° 07 : Curva de la AASHTO para la asignación de tránsito**  
**Fuente : VALDÉS A. "Ingeniería de tráfico", Ed DOSSAT, S.A., Madrid, España .**  
**1971.**

La expresión utilizada para la estimación del tránsito potencial por asignar es la siguiente:

$$TP = \sum_{ij} TDPA_{ij} \times FU_i \times FC_j$$

**Donde:**

- TP = Tránsito potencial por asignar
- TDPA = Tránsito Diario Promedio Anual
- FU = Factor de Utilización
- FC = Factor de Cuota
- i = Tipo de vehículo (A, B y C)
- j = Tipo de itinerario (Corto, mediano y largo)

”Si la ruta alterna forma parte de una red de carreteras libres (sin peaje) el factor de cuota será igual a la unidad, ya que la sensibilidad al pago no se presenta, por lo que el tránsito potencial se verá afectado únicamente por el factor de utilización”.  
 (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 89)

## **TIPO DE ITINERARIO**

“La segmentación del tránsito por tipo de itinerario tiene la finalidad de ponderar el tránsito potencial por asignar a otra ruta, dicha segmentación estará en función de la distancia del recorrido de los vehículos”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 89)

El método AASTHO establece la segmentación del tránsito como se muestra en el tabla 2.1

**Tabla N° 03 : Segmentación del tránsito para estimar el factor de cuota (FC)**

<b>Tipos de recorrido</b>		
<b>Corto</b>	<b>Mediano</b>	<b>Largo</b>
<b>Menos de 50 Km.</b>	<b>Entre 50 y 100 Km.</b>	<b>Mayores a 100 Km.</b>

“La distancia del itinerario tiene una doble función en la estimación de tránsito potencial en un tramo determinado. Por una parte, participa en el cálculo del TDPA ponderado de la ruta actual y por la otra, se convierte en la variable que permite determinar el factor de cuota del usuario, cuando ruta alterna es una carretera de peaje”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 89)

### **FACTOR DE CUOTA**

“El factor de cuota consiste en otorgar un determinado peso específico a los tipos de recorrido, se asume que a menores distancias recorridas, serán menores los usuarios por tomar la vía alterna con peaje y el factor de cuota lo establece de la siguiente manera”: (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 92)

En el Tabla N° 04 se consignan los Factores de Cuota (FC) en función del tipo de itinerario.

**Tabla N° 04 : Factores de cuota (FC) por tipo de itinerario**

<b>Tipos de itinerario</b>		
<b>Corto</b>	<b>Mediano</b>	<b>Largo</b>
<b>0.40</b>	<b>0.65</b>	<b>0.85</b>

## **EL COSTO DE OPERACIÓN VEHICULAR**

“Uno de los principales impactos a la economía nacional es el relativo a los costos de operación vehicular, ya que el transporte afecta las distintas fases del ciclo productivo de bienes de consumo, que participa en el proceso de producción (transporte de los centros de producción de materia prima a los centros de transformación), en el de distribución (transporte del centro de transformación a los centros de distribución o puntos de venta de los bienes) y en el de consumo (transporte de los centros de distribución a l consumidor final)”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 96)

Al abatir los costos de operación, se reduce el costo de transporte, y consecuentemente se mejora el precio final del bien en beneficio del consumidor.

“Además, la productividad del transporte carretero a nivel nacional presenta una mejoría importante, desde las ópticas laboral, económica y operacional. Una reducción en las tarifas de servicio en el servicio público, estimula la demanda dando oportunidad a que se presenten economías de escala, participando activamente en la generación de empleo no sólo en esta rama de la actividad económica sino en ramas y sectores íntimamente relacionados con el mismo”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 96)

“El costo de operación vehicular depende del estado físico de la superficie de rodadura, así como del tipo de terreno en que se encuentre el arco o tramo de la carretera, ya que los consumos directos (combustibles, lubricantes y llantas), y los indirectos (mantenimiento, refacciones, inversión y depreciación) del vehículo dependen de estas variables”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 96)

“El estado físico de la superficie de rodadura condiciona la estimación del Índice Internacional de Rugosidad (IIR).” (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 96)

“La figura 4.1 presenta la escala del IIR. En ella se consigna la información relativa al tipo de superficie de rodadura de aeropistas y caminos, representada mediante el IIR. Este índice constituye un insumo para determinar el factor de corrección del costo de operación vehicular base (Aguerreberre, 1991), el cual es útil en la

determinación del costo de operación por vehículo y por unidad de longitud (\$/Km)”. (REDALAT EGÜES, G., 2017; Pág. 96)

## **LOS 10 PRINCIPIOS DEL TRANSPORTE URBANO SOSTENIBLE**

- **“Planear ciudades densas a escala humana** se sugiere apoyar proyectos que crean viviendas asequibles en los centros de las ciudades, integrar el transporte con el desarrollo urbano, priorizar modos que son a escala humana, crear cuadras con usos mixtos de suelo (donde haya comercio y vivienda, por ejemplo), crear plazas urbanas y calmar el tráfico (reducir velocidades en sectores residenciales, por ejemplo)”. (DE CEA J., 2014; Pág. 56)
- **“Crear ciudades orientadas al transporte público,** esto se puede lograr construyendo viviendas sin espacios para carros, ubicando zonas comerciales y oficinas en las principales estaciones de transporte público, creando cuadras residenciales de alta densidad (con bastantes residentes) alrededor de las estaciones de transporte público y proporcionando estacionamientos para bicicleta en éstas”. (DE CEA J., 2014; Pág. 56)
- **“Optimizar la malla vial y su uso;** señala que es importante proveer información de tráfico (puntualidad, congestión, estacionamientos), hacer cumplir las reglas de tránsito, reducir la velocidad máxima a 30 km/h o menos en zonas residenciales, garantizar la captura de valor alrededor del transporte público, mejorar la conectividad urbana y mejorar intersecciones críticas para peatones, ciclistas, y transporte público, entre otras recomendaciones”. (DE CEA J., 2014; Pág. 56)
- **“Implementar mejoras en el transporte público;** resalta que se debe garantizar un servicio de transporte público de alta calidad basado en indicadores de rendimiento. Además, ello debe complementarse con un sistema justo y simple para la venta de los quetes, estableciendo asociaciones de transporte público para así integrar horarios, tarifas y boletos. Las ciudades también deben tener servicios de taxi fáciles, redes de transporte público de alto rendimiento utilizando BRT (líneas de buses de

tránsito rápido como las de Transmilenio) y transporte férreo, instalaciones de transbordo cómodas y facilitar la integración de carros comparados (carsharing) a los sistemas de transporte público”. (DE CEA J., 2014; Pág. 56)

- **“Promover vehículos limpios;** donde algunos pasos son los programas de chatarrización y retroadaptación, fomentar reembolsos para vehículos eficientes y promover la inspección y los combustibles limpios”. (DE CEA J., 2014; Pág. 57)
- **“Fomentar la caminata y el uso de la bicicleta;** para cumplir con este principio se destaca acciones como crear una red completa de ciclovías, eliminar obstáculos peatonales, hacer autopistas para bicicletas, limitar la expansión de espacio vial para carros implementar sistemas de bicicletas públicas, definir bahías (de semáforos) para bicicletas, mejorar la seguridad para peatones y ciclistas en las intersecciones y tener estándares de diseño vial integral de alta calidad para andenes, ciclovías y calles”. (DE CEA J., 2014; Pág. 57)
- **“Controlar el uso de vehículos motorizados;** Esto puede lograrse con incentivos para viajar en bicicleta o transporte público, eliminando gradualmente los vehículos como beneficio laboral y fomentando el teletrabajo y los horarios flexibles”. (DE CEA J., 2014; Pág. 57)
- **“Gestionar el estacionamiento;** Definir centros urbanos de logística y distribución, establecer tarifas de estacionamiento, controlar y dar seguridad al cumplimiento de las de estacionamiento y determinar reglamentos de estacionamiento (por ejemplo, con límites de parqueaderos máximos en edificios), son algunas claves para avanzar con este principio de movilidad sostenible”. (DE CEA J., 2014; Pág. 57)
- **“Comunicar soluciones;** algunas estrategias son crear premios para empresas amigables con la bicicleta, campañas de marketing para andar en bicicleta, fomentar programas de viajes comparados y proporcionar acceso

a datos para desarrolladores de aplicaciones móviles inteligentes”. (DE CEA J., 2014; Pág. 57)

- **“Abordar los retos de manera exhaustiva;** es vital que se creen instituciones encargadas del transporte urbano sostenible, por ejemplo, con una autoridad integrada de planeación urbana y de transporte y hacer alianzas de transporte público. Además, esto se puede acompañar de tareas como cuantificar emisiones, desarrollar, implementar y comunicar los planes integrales de movilidad urbana sostenible, monitorear el desempeño de las medidas tomadas y creando un proceso de actores clave para evaluar y discutir las medidas”. (DE CEA J., 2014; Pág. 57)

## **IMPACTO AMBIENTAL**

“El Análisis de las Condiciones Ambientales, resulta muy importante la influencia que tiene el medio ambiente en la Asignación de Transito a la Red de Transporte de la Ciudad de Trujillo, por lo que es necesario obtener las características de los fenómenos meteorológicos en el lugar en donde se ubica las vías . La información que es útil corresponde a los aspectos siguientes”: (SECTRA, F., 2018; Pág. 75)

- Congestión
- Clima Predominante
- Precipitación Pluvial
- Temperaturas Máxima y Mínima
- Tipo de suelos y rocas .

“El control de la congestión, implica un trabajo continuo y permanente. Tema complicado que exige una alta capacidad profesional y de liderazgo de parte de las autoridades urbanas y de transporte”. (p.311-312).

Según la COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (2003): “la congestión, es un problema que se agrava con el pasar del tiempo, su principal manifestación es la progresiva reducción de las velocidades de circulación, que se traduce en incrementos de tiempos de viaje, de consumo de

combustibles, de otros costos de operación y de contaminación atmosférica, con respecto a un flujo vehicular”.

“La congestión es causada principalmente por el uso intensivo del automóvil, cuya propiedad se ha masificado debido a la facilidad creciente de adquisición en las últimas décadas en América Latina. Al automóvil se le atribuye la ventaja de facilitar la movilidad personal, y otorgar sensación de seguridad y aún de estatus. Sin embargo, es poco eficiente para el traslado de personas, al punto que cada ocupante produce en las horas pico unas 11 veces la congestión atribuible a cada pasajero de bus”. (SECTRA, F., 2018; Pág. 75)

“El escenario se complica debido a los problemas de diseño y conservación en la vialidad de las ciudades, estilo de conducción que no respeta a los demás, defectuosa información sobre las condiciones del tránsito y gestión inapropiada de las autoridades competentes”. (SECTRA, F., 2018; Pág. 76)

“Los costos de la congestión son elevados. A título de ejemplo puede señalarse que, de acuerdo a cálculos conservadores, aumentar en promedio las velocidades de los viajes en auto en 1 km/h y los de transporte colectivo en 0.5 km/h implicaría una reducción de tiempos de viaje y costos de operación por un valor equivalente a 0.1% del producto interno bruto (PIB)”. (SECTRA, F., 2018; Pág. 76)

“Los efectos perjudiciales de la congestión recaen directamente sobre los vehículos que circulan. Pero además de los automovilistas, sufren su efecto los pasajeros del transporte colectivo, generalmente personas de ingresos menores, que no sólo se ven atrasados en sus desplazamientos, sino que a causa de la congestión ven incrementados los valores de las tarifas que pagan”. (p.13).

### **3.2 ¿Cómo enfrentar la congestión?:**

“Mediante medidas sobre la oferta de transporte; es decir, sobre la disponibilidad y calidad de la infraestructura, los vehículos y la gestión de éstos, pues ello representa un aumento de la capacidad para efectuar desplazamientos” (MOLOCHE G., 2016; Pág 85)

### **3.2.1 Oferta:**

COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (2003) sostiene que: “mejorar la vialidad, significa optimizar el diseño de las intersecciones, demarcar y señalizar apropiadamente las vías y corregir el ciclo de los semáforos”.

“Otra acción posible es la reversibilidad del sentido de tránsito en las horas punta en avenidas principales. Estas medidas pueden traer un importante alivio a la congestión y son en general de bajo costo, siendo el conocimiento de la ingeniería de tránsito el principal requisito”.

“No hay que descartar del todo la construcción o el ensanche de vías, donde sea apropiado y factible, en el contexto de un desarrollo urbanístico armónico, que asegure los espacios destinados a peatones, y preserve el patrimonio arquitectónico”. (MOLOCHE G., 2016; Pág 85)

“Hay que tener presente que construir más vías, pasos a desnivel y autopistas urbanas puede ser contraproducente en el mediano o largo plazo y agravar la congestión, como lamentablemente se ha visto en algunas ciudades que adoptaron esta estrategia”. (MOLOCHE G., 2016; Pág 85)

“Grandes ahorros se logran mediante un sistema de semáforos gestionado desde un computador central. Su costo algo elevado, pero podría ser aconsejable que se aborde por etapas y sectores de la ciudad, comenzando con el progresivo reemplazo de los semáforos obsoletos por otros que soporten la tecnología necesaria”. (MOLOCHE G., 2016; Pág 86)

“Otra necesidad real es organizar un sistema de transporte público que brinde un servicio efectivo. Importantes beneficios, tanto para buses como para automóviles, otorgan los carriles segregados para el transporte colectivo. Posiblemente sea necesario, además, reordenar las líneas en troncales y alimentadoras, establecer determinadas preferencias para su circulación, y mejorar la calidad de los buses y la capacidad empresarial de los operadores”. (MOLOCHE G., 2016; Pág 87)

“El mejoramiento del transporte público es importante para ofrecer un servicio digno y rápido, lo que permitiría mantener la actual proporción de viajes que se realizan en él. En países en vías de desarrollo, más de la mitad de los viajes, proporción que en algunas ciudades llega a 80%, se realiza en transporte colectivo”. (MOLOCHE G., 2016; Pág 87)

“Bien diseñadas y ejecutadas, las medidas sobre la oferta representan un interesante potencial para enfrentar la congestión. Con todo, es preciso incorporar otras medidas, particularmente sobre la demanda”. (MOLOCHE G., 2016; Pág 88)

### **3.2.2 Demanda:**

De acuerdo con la COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (2003): “las medidas bien concebidas sobre la oferta contribuyen a crear mayor capacidad. Sin embargo, a más de las medidas sobre la oferta; es necesario, incorporar medidas sobre la demanda, que permitan resolver los desajustes en el uso de la infraestructura y que apunten al logro de un equilibrio aceptable para la comunidad”.

“Actuar sobre la demanda significa modificar los hábitos de transporte. Estas medidas promueven una conducta más acorde con los elevados niveles de tránsito y la seguridad en los desplazamientos. Así, se procura mejorar las conductas de circulación de vehículos y peatones, modificar en las horas punta el tipo de vehículo usado, prefiriendo el de gran capacidad, y transferir una parte de los viajes a horas de menores niveles de tránsito”.

### III. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO

#### 3.1. POBLACIÓN

799,550 habitantes y el parque automotor de Trujillo es 190,000 vehículos, cuyo crecimiento es 6% al año

Tabla N° 05: Población de Trujillo y tasa de crecimiento

Departamento	Ciudad	Población 2015	Tasa de crecimiento (%)
			2014-2015
<b>Total</b>		<b>17 357 025</b>	<b>1,47</b>
Cajamarca	Cajamarca	226 031	3,32
San Martín	Moyobamba	56 452	3,18
Madre de Dios	Puerto Maldonado	74 494	2,99
Áncash	Huaraz	127 041	2,52
Puno	Juliaca 1/	273 882	2,51
San Martín	Tarapoto 1/	144 186	2,22
Amazonas	Chachapoyas	29 869	2,13
Ayacucho	Ayacucho	180 766	1,89
Cusco	Cusco	427 218	1,69
Lima	Lima Metropolitana 2/	9 886 647	1,57
Huancavelica	Huancavelica	47 866	1,56
Tacna	Tacna	293 116	1,53
Puno	Puno	140 839	1,53
Ica	Chincha Alta 1/	177 219	1,51
Moquegua	Moquegua	60 572	1,49
<b>La Libertad</b>	<b>Trujillo</b>	<b>799 550</b>	<b>1,44</b>
Piura	Piura	436 440	1,42
Moquegua	Ilo 1/	67 428	1,42
Huánuco	Huánuco	175 068	1,24
Tumbes	Tumbes	111 595	1,19
Loreto	Iquitos	437 376	1,13
Ica	Ica	244 390	1,03
Junín	Huancayo	364 725	1,03
Lambayeque	Chiclayo	600 440	0,96
Arequipa	Arequipa	869 351	0,95
Áncash	Chimbote 1/	371 012	0,86
Piura	Sullana 1/	201 302	0,85
Apurímac	Abancay	58 741	0,50
Ica	Pisco 1/	104 656	0,29
Piura	Talara 1/	90 830	0,04
Ucayali	Pucallpa	211 651	0,01
Pasco	Cerro de Pasco	66 272	-0,47

### **3.2. MUESTRA**

- La muestra determinada para nuestra investigación será una parte representativa de la población.
- Siendo la muestra parte del mismo universo en consecuencia posee las mismas características para el estudio.
- La importancia de la muestra es para poder tener conocimiento de las características de una población.
- La muestra para esta investigación es la red de transporte en la ciudad de En consecuencia, la muestra sería la red de Transporte de la Ciudad de Trujillo.

### **3.3. METODO**

Se realizará de la siguiente manera:

- Determinación del número y tipo de vehículos, las líneas de tránsito y las redes de transporte: Esta será de mediana precisión realizada por procesamiento de imágenes satelitales de la zona de estudio realizando softwares disponibles, como el empleado TRANSMODELER (Traffic Simulation Software).
- Determinación de las fases del estudio de investigación del transporte: Generación, distribución, reparto modal y asignación de tránsito a la red de transporte de la Ciudad de Trujillo: Se hará uso de procedimientos matemáticos (algoritmos) y estadísticos.
- Proponer la asignación de tránsito a la Red de Transporte de la Ciudad de Trujillo, como mejora a la Planificación Vial Sostenible.

### **3.4. TIPO DE INVESTIGACION**

La Investigación es experimental y bibliográfica porque se está sometiendo a evaluación distintas estrategias y algunos ensayos o experimentos y además es transversal porque se está desarrollando la investigación en un determinado tiempo y espacio en el Perú y en especial en la Ciudad de Trujillo. .

Así mismo en la medición de rutas se realizó:

- Calibración de Odómetro, Identificación Inicio de Ruta,
- Punto de Control: “KM. 0”.,
- Medición de Longitudes con Odómetros, con dos vehículos.
- Identificación de Puntos Notables, Toma de Fotos y Videos.

Así mismo en la georreferenciación se realizó:

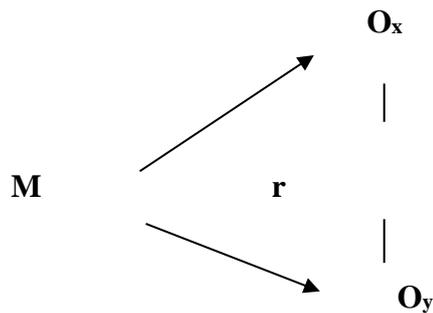
- Medición con GPS Submétrico de Puntos de Control y Puntos Notables.
- Medición con GPS Submétrico de Línea del Trazado de la Ruta.
- Obtener Coordenadas y Trayectoria.

### **3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Para la evaluación del desempeño de la Asignación de tránsito a la Red de transporte de la Ciudad de Trujillo, como mejora a la Planificación Vial Sostenible se realizó de diferentes formas, como son las siguientes: datos de Campo, y Simulaciones Numéricas.

En la toma de datos de campo se realizaron en la Ciudad de Trujillo. La metodología de conteo y propuesta de asignación de tránsito a la red de transporte se evaluó los diferentes métodos y Algoritmos existentes de investigadores para realizar la validación y calibración Correlacional, porque pretende demostrar la existencia de una relación entre dos fenómenos o variables.

El esquema del estudio correlacional es el siguiente:



**Donde:**

- M** = Muestra.
- r** = Relación.
- O<sub>x</sub>** = Estrategias optimas
- O<sub>y</sub>** = Conservación y desarrollo vial de superficies rodadura Asfálticas en carreteras del Perú.

### 3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.7.1. Recolección de datos e Información

Es la acción que realiza el investigador para obtener información que le van a permitir lograr los propósitos planteados en la investigación.

#### 3.7.2. Técnicas e Instrumentos para recolectar datos

##### TÉCNICAS

Es el conjunto de procedimientos realizados por el investigador en concordancia con los objetivos propuestos.

##### INSTRUMENTOS

Son los medios que fortalecen a las técnicas, por ello que a cada técnica le corresponde sus respectivos instrumentos.

TECNICAS	INSTRUMENTOS
Observación	Guía de observación, Lista de Cotejo
Encuesta	Cuestionarios, Test
Entrevista	Guía de entrevista
Análisis de Contenido	Fichas (bibliográficas, textuales, contextuales, etc)

### **3.8. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS**

Los métodos de análisis son:

- La metodología usada será con el apoyo de imágenes satelitales y su procesamiento para la estimación de características como volumen de vehículos, tipo, velocidades, rutas y redes de transporte
- Proceso de los datos obtenidos en campo: distribución, reparto modal, asignación de tránsito en el sector de estudio con procedimientos matemáticos de algoritmos y estimaciones estadísticas.
- Realizar la propuesta de una metodología y un adecuado algoritmo para correcta asignación de tránsito en sector de estudio.

### **3.9. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

#### **2.9.1. Proceso para determinar la Asignación de Tránsito a la Red de Transporte de la Ciudad de Trujillo, como mejora a la Planificación Vial Sostenible fue:**

Dado el problema de optimización de la red tenemos una función objetivo no lineal y un conjunto de restricciones lineales de igualdad junto a las restricciones de no negatividad de las variables.

El número de variables será menor que el número de restricciones activas lo que nos permite utilizar como espacio de búsqueda el espacio nulo.

En este tipo de red, el número de variables es igual al número de arcos, mientras que el número de restricciones activas viene determinado por el número de nodos (Newell, 1980) y el número de variables con flujo cero

### **2.9.2. Análisis estadístico de datos**

En este punto se procesa los datos estadísticos para su procesamiento de la data obtenida.

El procesamiento de los datos depende del tipo de dato obtenido en la recopilación de campo, procesando o tabulando de acuerdo a los factores que se esté estudiando.

## IV. RESULTADOS

En la actualidad se está tomando muy en cuenta desde los países más desarrollados a la planificación del transporte público urbano colectivo (TPUC); apoyándose en herramientas para la toma de decisiones adecuadas con a la realidad de cada ciudad. Siendo gran parte de los viajes en las grandes ciudades se realizan a través del transporte público.

Las herramientas para los profesionales puedan adoptar decisiones acordes a las necesidades de su metrópoli, son la planificación en sus tres estadios corto plazo, mediano plazo y largo plazo con planes maestros que todas las autoridades se comprometen a cumplir.

La correcta planificación para el transporte público urbano colectivo (TPUC) es la determinación de planes de recorridos, horarios adecuados, frecuencias acordes a la necesidad del usuario, flota de transporte adecuado, personal capacitado.

Esta planificación puede apoyarse de la siguiente manera [Ceder y Wilson, 1986]:

- 1) **Diseño de las rutas:** Trazo de recorrido y cantidad de líneas.
- 2) **Determinación de frecuencias:** Tiempo que demora en pasar cada línea en un determinado punto.
- 3) **Determinación de horarios:** Sincronización de horarios para cada línea.
- 4) **Asignación de flota:** Número de unidades al servicio del usuario para los viajes.
- 5) **Asignación de personal y recursos disponibles** viajes programados por línea.



**Fotografía N° 02 : Vista de Autos, Ómnibus en Avda. América Oeste. Trujillo**



**Fotografía N° 03 : Vista de Tesista, en esquina Avda. Mansiche / Avda. América Oeste. Trujillo**

## EL TRANSITO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE TRUJILLO

- La ciudad de Trujillo está planificando el desarrollo de una nueva línea en sistemas de tránsito.
- El sistema debe unir 8 residencias y centros comerciales.
- El distrito metropolitano de tránsito necesita seleccionar un conjunto de líneas que conecten todos los centros a un mínimo costo.
- La red seleccionada debe permitir:
  - Factibilidad de las líneas que deban ser construidas.
  - Factibilidad de las líneas que deban ser construidas.
  - Mínimo costo posible por línea

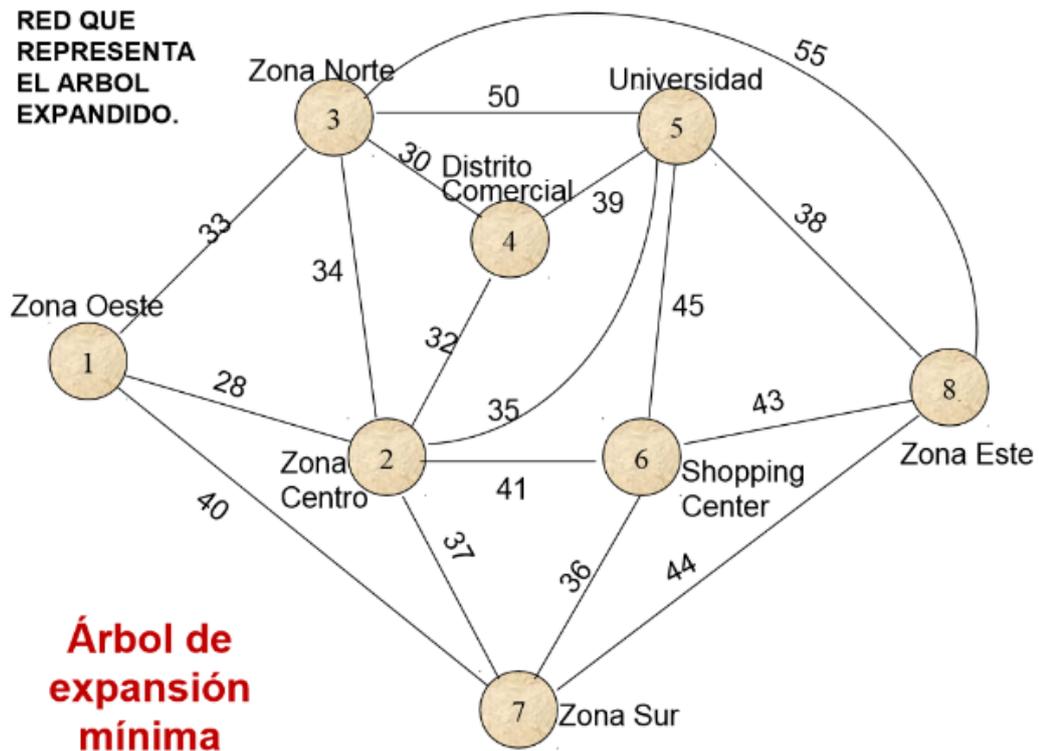


Figura N° 08 : Red que representa el Árbol expandido

**Network Modeling**

File Format Results Utilities Window Help

Minimal Spanning Tree Problem NET Problem

Node1 : Node2 28

From \ To	Node1	Node2	Node3	Node4	Node5	Node6	Node7	Node8
Node1		28	33				40	
Node2	28		34	32	35	41	37	
Node3	33	34		30	50			55
Node4		32	30		39			
Node5		35	50	39		45		38
Node6		41			45		36	43
Node7	40	37				36		44
Node8			55		38	43	44	

**Solution for Minimal Spanning Tree Problem NET Problem**

01-03-2011	From Node	Connect To	Distance/Cost	From Node	Connect To	Distance/Cost	
1	Node1	Node2	28	5	Node7	Node6	36
2	Node4	Node3	30	6	Node2	Node7	37
3	Node2	Node4	32	7	Node5	Node8	38
4	Node2	Node5	35				
	<b>Total</b>	<b>Minimal</b>	<b>Connected</b>	<b>Distance</b>	<b>or Cost</b>	<b>=</b>	<b>236</b>

**Solución óptima mediante WINQSB**

Figura N° 09: Solución Óptima mediante WINQSB

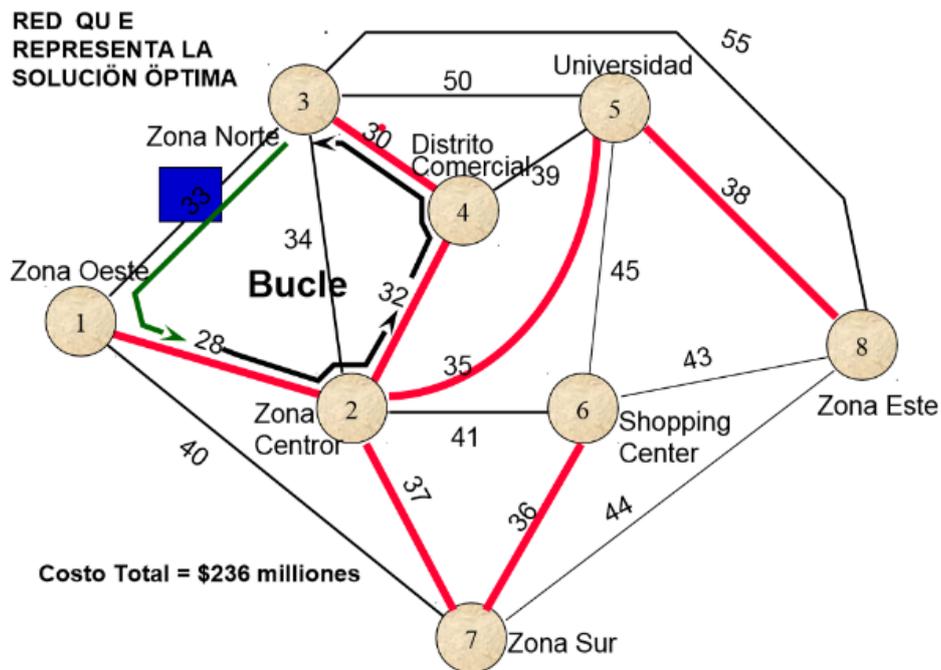


Figura N° 10: Red que representa la solución óptima

## LA CONGESTION Y SU IMPACTO AMBIENTAL

La congestión se debe en gran medida al uso intensivo del automóvil, particularmente en viajes al trabajo. La congestión podría disminuirse en buena medida si se convenciese a un número importante de automovilistas, que circulan en zonas o períodos de alto tránsito, de que utilicen el transporte público o que cambien el horario de su viaje. A continuación, se indican algunas opciones.

- **Educación vial.** Es indispensable mejorar el comportamiento de conductores y peatones. Las normas de tránsito definen derechos y restricciones del uso de las calles y así, se logra la fluidez y evitar accidentes. La conducción indisciplinada o falta de respeto hacia los demás, reduce de hecho la capacidad de la red vial a una fracción de su potencial.
- **Escalonamiento o dispersión de horarios.** Consiste en establecer distintas horas de entrada y salida para las diferentes actividades, tales como trabajo, comercio, colegios, universidades, etc. La entrada a los colegios podría ser anterior a la de la generalidad de los trabajos. La educación superior, el comercio y buena parte de las actividades privadas e incluso, la administración pública, parecen disponer de cierta flexibilidad en el horario de inicio.
- **Control de estacionamiento.** El estacionamiento es una condición indispensable en todo sistema de transporte vial. Sin contar taxis, automóviles que no están destinados al movimiento perpetuo, sino a realizar viajes específicos. Una vez finalizados, el vehículo pasa a una etapa estacionado. Mediante el control de estacionamientos en áreas congestionadas se pueden alcanzar objetivos como el aumento del espacio destinado a la circulación o el desincentivo de ciertos viajes en automóvil, todo lo cual aminora la congestión. Existen diversas modalidades de control, tales como: la prohibición de estacionar en determinados lugares y períodos, especialmente en las vías de altos volúmenes de tránsito; la fijación de cuotas de espacio o tiempo de estacionamiento.

- **Tarificación vial.** La congestión de tránsito se debe en parte a la fuerte propensión a usar el automóvil, reforzada porque el usuario individual no percibe los costos que impone a los demás. La tarificación vial consiste en realizar un cobro, ya sea por transitar en o por ingresar a vías o zonas congestionadas. Sólo circulará la fracción de usuarios dispuesta a pagar, debiendo los demás usar otros modos de transporte o bien efectuar el viaje en automóvil en períodos en los cuales no exista cobro. Una interesante característica es que, en principio, el uso de las vías públicas queda regulado mediante un instrumento de mercado y no por una reglamentación impuesta por las autoridades.
- **Restricción vehicular.** Consiste en prohibir de lunes a viernes la circulación de una parte de los vehículos en zonas y lapsos sujetos a congestión. Evitando la circulación simultánea de muchos automóviles, aunque sin afectar el derecho de comprarlos, es una manera de aminorar la congestión. Si tiene como fin controlar la congestión, la medida sólo tiene sentido en las zonas céntricas durante las horas punta. Resultados apreciables se obtienen aplicándola a una fracción importante del parque vehicular, por ejemplo, a 20% de los automóviles; sería en forma rotativa a lo largo de la semana, en función del último dígito de la placa.

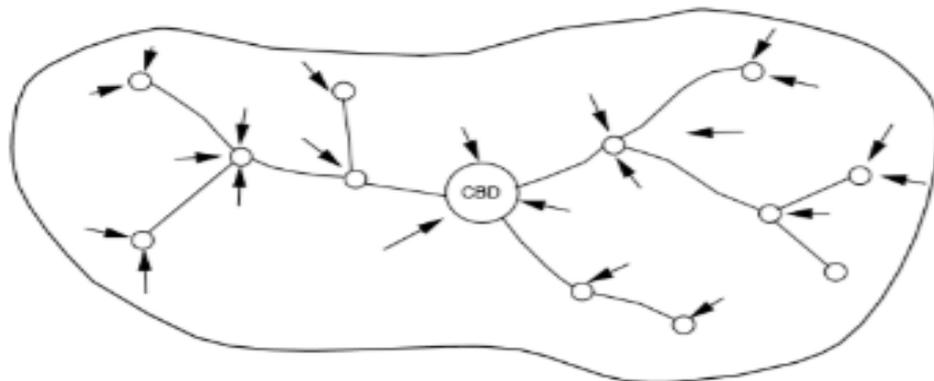
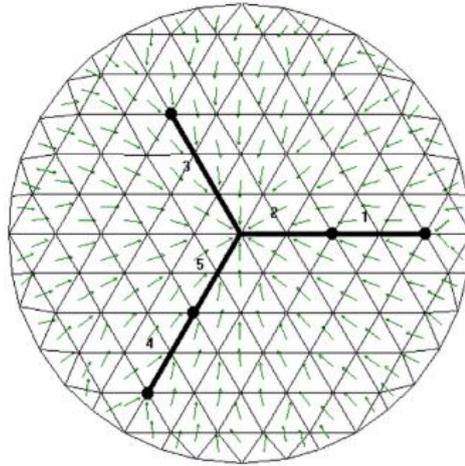


Figura N° 11 : Modelo de Ciudad



**Figura N° 12 : Direcciones del flujo en una ciudad circular**

### **MODELO DE ASIGNACIÓN DE TRANSITO CON RESTRICCIONES DE CAPACIDAD**

El modelo de asignación de tránsito con restricciones de capacidad está basado en el Modelo de Líneas Comunes introducido por Cominetti y Correa en [7]. Este modelo es una generalización de los modelos de equilibrio en redes de tránsito basados en estrategias; toma en cuenta los efectos de la congestión en términos de exceso de volumen de pasajeros, así como la capacidad de las líneas de tránsito y su impacto en los tiempos de tránsito, efectos que representan de forma más realista el comportamiento de los usuarios en una red de tránsito congestionada.

Este modelo y sus resultados teóricos fueron posteriormente extendidos por Cepeda, Cominetti y Florian para obtener una nueva caracterización del equilibrio que permite formular un problema equivalente de optimización en términos de una función de "holgura" (gap function) que se anula en el mínimo global. Finalmente, este enfoque permitió la construcción de un algoritmo que se ha aplicado con éxito en redes de transporte a gran escala, y que consideramos que es apropiado para la red metropolitana de Trujillo.

Afortunadamente el algoritmo está ya integrado a EMME por medio de una macro denominada CAPTRAS.

## EL PROBLEMA DE LÍNEAS COMUNES CON CONGESTIÓN

Considere una red simple que consiste de un nodo origen  $O$  conectado a un nodo destino  $D$  por  $n$  líneas de tránsito  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ , ver Figura 5.1. Cada línea  $a \in A$  se caracteriza por medio de un tiempo de viaje constante  $t_a$  y una función de frecuencia efectiva suave  $f_a$  que satisface:

$$f_a : [0, \bar{v}_a) \mapsto (0, \infty) \text{ con } f_a(v_a) < 0 \text{ y } \lim_{v_a \rightarrow \bar{v}_a} f_a(v_a) = 0$$

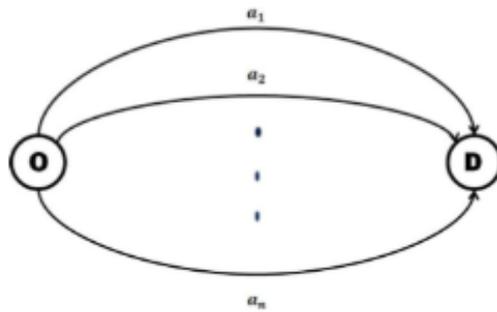


Figura N° 13: Líneas comunes de  $O$  a  $D$ .

Para ir de  $O$  a  $D$ , los pasajeros seleccionan un subconjunto no vacío de líneas  $s \in S$ , llamadas líneas atractivas o estrategia, de entre todas las posibles estrategias  $S$  y toman la primera línea que sea servida con espacio disponible. El flujo total  $x \geq 0$  se divide entre todas las posibles estrategias  $s \in S$  y satisface.

$$x = \sum_{s \in S} h_s$$

donde,  $h_s \geq 0$  denota el flujo de la estrategia  $s \in S$

Dada una estrategia  $s \in S$ , el usuario que utiliza esta estrategia aborda la línea  $\alpha \in s$  con una probabilidad.

$$\pi_\alpha^s = \frac{f_\alpha(v_\alpha)}{\sum_{b \in s} f_b(v_b)}$$

Donde,

$\pi_\alpha^s$  equivale a la probabilidad de que el arco  $\alpha$  sea servido primero  $P_\alpha(\bar{A}_i^+)$

Cada vector de flujos de estrategia  $h=(h_s) s \in S$  induce un unico vector de flujos de linea  $v = v(h)$ ,

y la relación entre ambos se obtiene del sistema de ecuaciones

$$v_\alpha = \sum_{s \in S, \alpha \in s} h_s \frac{f_\alpha(v_\alpha)}{\sum_{b \in s} f_b(v_b)}$$

El vector de flujos de estrategia  $v = v(h)$  permite determinar el tiempo de esperado de tránsito para cada estrategia como la suma del tiempo esperado de esperas mas el tiempo de viaje

$$T_\alpha(v) = \frac{1 + \sum_{\alpha \in s} t_\alpha f_\alpha(v_\alpha)}{\sum_{\alpha \in s} f_\alpha(v_\alpha)}$$

De acuerdo al principio de Wardrop [12], un vector de flujos de estrategia  $h \geq 0$  que satisface  $\sum_{\alpha \in S} h_\alpha = x$  se dice que es un flujo de equilibrio si y solo si todas las estrategias usadas generan tiempos minimos, es decir:

$$h_s > 0 \Rightarrow T_s(v(h)) = r(v(h))$$

Donde  $\tau(v) = \min_{s \in S} T_s(v)$

El conjunto de flujos de equilibrio  $h$  se denota por  $H_x$ , y el correspondiente conjunto inducido de flujo de linea  $v(h)$  se denotara por  $V_x$ . Una caracteristica de este vector de flujos de equilibrio,  $V_x$ , esta dada por el siguiente resultado:

$$\frac{v_\alpha}{f_\alpha(v_\alpha)} \begin{cases} = \delta, si t_\alpha < \tau(v) \\ \leq \delta, si t_\alpha = \tau(v) \\ = 0, si t_\alpha > \tau(v) \end{cases}$$

- ❖ Cada una de las instancias de este resultado se interpretan de la siguiente manera:  
 Todos los arcos con tiempo de viaje estrictamentemenor que  $\tau(v)$  deben transportar una cantidad de flujo que induce el mismo tiempo de espera  $\delta$ , por lo que estos arcos, en algun sentido, se encuentran igualmente congestionados.
- ❖ Los arcos con tiempo de viaje igual a  $\tau(v)$  deben tener tiempos de espera a lo mas de  $\delta$ .
- ❖ Los arcos con tiempo de viaje mayor al de equilibrio no son utilizados.

En lo que resta del capítulo se desarrollara la forma en que el problema de líneas comunes se puede extender, con el objeto de obtener una formulación alternativa

en redes generales de tránsito con múltiples orígenes y destinos. El modelo de red que se obtiene consiste de un conjunto de problemas de líneas comunes (uno por cada par O-D), unidos todos por medio de restricciones de conservación de flujo. Posteriormente se realizará la reformulación del problema general en términos de un problema de optimización de la función de holgura y, finalmente, se presentará el algoritmo de solución.

### ALGORITMO DE SOLUCION.

El hecho de que el valor mínimo de esta función GAP es 0 permite utilizar  $G(v)$  como parte de los criterios de paro en un algoritmo iterativo de minimización. El algoritmo utilizado en EMME para resolver este problema de equilibrio es el método de promedios sucesivos (method of successive averages, MSA). El algoritmo de promedios sucesivos para el modelo de asignación de tránsito con restricciones de capacidad está dado por:

Sea  $\alpha_k \in (0,1)$  con  $\alpha_k \rightarrow 0$  y  $\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k = \infty$

Inicio:

1. Calcular  $v^0 \in V_0$ , resolviendo el problema de asignación de tránsito sin congestión.
2. Definir  $\epsilon > 0$ . Este valor es pequeño y se utiliza como tolerancia para las interacciones.
3. Inicializar el contador  $k=0$ .

Interacciones. Mientras  $G(v^k) > \epsilon$

1. Actualizar  $k = k + 1$ , el tamaño de paso es  $\alpha_k = \frac{1}{k}$ , donde  $k$  es el número de interacciones.
2. Calcular los tiempos  $t_\alpha = t_\alpha(v^k)$  y las frecuencias  $f_\alpha = f_\alpha(v^k)$ .
3. Determinar las estrategias para cada  $d \in D$  y los flujos  $\hat{v}_\alpha^d$  para cada arco  $\alpha \in A^+$  resolviendo el problema de asignación de tránsito sin congestión.
4. Actualizar  $v^{k+1} = (1 - \alpha_k)v^k + \alpha_k \hat{v}^k < \epsilon$  ir a terminación, en caso contrario regresar a 1.

Terminación. El vector  $v^k$  es el vector de flujos de equilibrio.

En cada iteración se calculan los flujos de equilibrio que se obtiene al fijar los tiempos de viaje y las frecuencias con los valores determinados por los flujos calculados en la iteración previa. Después se actualizan estos flujos promediando los de la iteración anterior con los valores actuales. Las trayectorias obtenidas utilizando las estrategias.

Algunas observaciones sobre el algoritmo

Es posible que el flujo inicial sea no factible, y para evitar este problema se supone la existencia de una subred peatonal tal manera que todo  $i \in N$  est conectado con casa destino  $d \in D$ .

Cuando la red de transito está saturada los tiempos de espera puedan ser extremadamente grandes. Entonces, el método revelara cuales son los arcos con capacidad insuficiente para satisfacer la demanda de transporte.

Ventajas del modelo:

Este modelo toma en cuenta que el volumen de pasajeros con destino determinado  $d$  influye en el volumen sobre cada arco de la red. Es decir, la cantidad de pasajeros que utilizaran el arco  $\alpha$  depende del destino  $d$ , pero cuando el volumen excede la capacidad del arco, algunos usuarios prefieren buscar otras opciones en su camino en lugar de sentirse incomodos dentro del vehiculo.

El modelo también toma en cuenta la capacidad limitada de las líneas de transporte. Asimismo, incorpora tiempos de espera crecientes cuando el flujo de pasajeros satura la capacidad de los vehículos. Conforme los segmentos de transito se congestionan, el nivel de comodidad decrece y los tiempos de espera crecen. Este fenómeno es modelado por funciones de costo convexas para modelar la incomodidad y con headways crecientes (frecuencias decrecientes) para modelar los tiempos de espera creciente.

Este modelo toma como base el modelo lineal básico, en donde a los tiempos de viaje en la función objetivo ahora se le agregan los costos generados por el exceso de vehículos. Además se añade una función de frecuencia efectiva, en la cual se toma en cuenta la capacidad limitada de los vehículos de transporte de tal forma que cuando el volumen de usuarios es cada vez mayor, la frecuencia del servicio de transporte disminuye.

El algoritmo de solución, es un algoritmo iterativo simple, en donde en cada iteración se resuelve del modelo lineal básico. Es decir, en cada iteración se obtiene la estrategia óptima del problema lineal y con ella se asignan los volúmenes sobre los arcos. Estos tiempos o costos generalizados se toman como los tiempos de viaje para la siguiente iteración. También se ven afectada las frecuencias de servicio por medio de la función de frecuencia efectiva.

Desventajas:

Una de las limitaciones de este modelo es suponer que todos los pasajeros que abordan un vehículo sufren el mismo nivel de discomfort, al igual que el modelo de costos generalizados. Además, el modelo no toma en cuenta que los tiempos a bordo de los vehículos en las paradas de transito también puede depender del volumen de pasajeros que ascienden y descienden de los mismos.

El enfoque de esta sección fue calcular el equilibrio, de una red completamente congestionada, por medio de la minimización de la función GAP. Sin embargo, los algoritmos de descenso pueden quedar atrapados en mínimos locales, por lo que sería útil probar que para el presente modelo no hay mínimos locales, o bien que todo mínimo local es global. Esto en realidad no ha sido probado para este modelo y permanece como un problema abierto. Sin embargo, se ha podido probar en casos simplificados, como por ejemplo el problema de líneas comunes con un solo par origen-destino (ver referencia 6)

### **ASIGNACIÓN DE EQUILIBRIO ESTÁTICO DE USUARIO EN REDES**

Se determina la asignación del equilibrio estático de acuerdo con Beckman et al (1956) la formulación del problema es:

$$\text{Min}_{x \in R^a} CT = \sum_i \int_0^{x_i} C_1(w) dw$$

Sujeto a:

$$\sum_p f_p^{od} = q_{\alpha} \nu_{p, P, \in od}$$

Donde la función objetivo CT recoge el coste total de la red, y:  $x_i$  es el flujo que circula a través del arco  $i$ ;  $c_1(w)$  es el coste de atarvesar el arco  $i$  con un flujo  $w$ ;  $f_p^{od}$  es el flujo que circula por el camino  $p$  que conecta el origen  $o$  con el destino  $d$ ;  $q_{od}$  es la demanda de usuarios entre el origen  $o$  y el destino  $d$ ;  $P_{od}$  es el conjunto de caminos entre origen  $o$  y el destino  $d$ .

En la función objetivo la variable a optimizar es el flujo en el arco, en el conjunto de restricciones tenemos como variable el flujo en el camino entre un par origen destino; la siguiente proposición permite establecer una relación entre ambas variables de forma tal que podemos expresar el problema en cualquiera de ellas.

Proposición 1: el flujo de un arco será igual a la suma de los flujos de todas las rutas que utilicen dicho arco.

Sea  $f_p^{od}$  el flujo que circula entre los nodos origen y destino  $o$  y  $d$ , respectivamente, a través de la  $p$ -ésima ruta. Entonces dado el principio de conservación del flujo, podemos escribir el flujo a través del  $i$ -ésimo arco de la  $p$ -ésima, donde  $P$  es el conjunto de índices de los arcos que componen dicha ruta, como:

$$x_i = \begin{cases} \sum_p f_p^{od} & \text{si solo existe un origen y un destino} \\ \sum_o \sum_d \sum_p f_p^{od} & \text{si existen multiples origenes y destinos} \end{cases}$$

Esta proposición permite considerar la solución obtenida mediante la resolución del problema de equilibrio del usuario como solución al problema de equilibrio del sistema. La condición de equilibrio del problema (1) es:

$$C_1(x_i) = 0 \quad \text{en todas las rutas con } x_i > 0$$

$$C_1(0) \geq 0 \quad \text{en todas las rutas con } x_i = 0$$

Bajo esta condición los costes de todas las rutas utilizadas entre el origen y el destino serán iguales. En esta situación y para esta función objetivo, todos los usuarios seguirán la ruta de costes mínimo, y se minimiza el coste total de todos los viajeros.

La función de coste de arco deberá ser no lineal, continua, y creciente; dependiente del flujo que circula por dicho arco ( $X_1$ ) y de la capacidad técnica asignada al mismo ( $k_1$ ). optamos por la función establecida por el Burear of Public Roads de Washinton (USA) en 1964:

$$C = t_f \left( \frac{a}{x} K \right)^b$$

Donde  $t_f$  es el tiempo necesario para atravesar el arco si no existiese ningún grado de congestión,  $x$  es el flujo que circula a través del arco,  $K$  es la capacidad máxima asociada a dicho arco, y  $a=0.15$  y  $b=4$ . Vemos que la función cumple las características deseadas:

- a) Es una función no lineal y continua en todo  $\mathbb{R}$ , si  $K \neq 0$ .
- b) Es una función creciente, para  $x \geq 0$ , y dado que  $t_f$  y  $K$  son siempre valores positivos.
- c) Es una función convexa para  $x \geq 0$ .

Por último, consideramos las siguientes definiciones:

Primera definición:

El flujo de los arcos de entrada a un nodo intermedio de la red de transporte ha de ser igual al flujo de los arcos de salida de dicho nodo.

$$\sum_{i \in E(N)} X_i = \sum_{j \in S(N)} X_j$$

Donde  $E(N)$  es el conjunto de arcos que inciden en el nodo  $N$ , y  $S(N)$  es el conjunto de arcos que parten del nodo  $N$ . Esto supone que los nodos intermedios no generan ni absorben flujo de tráfico.

Segunda definición:

El flujo de arcos de entrada a un nodo desde una red de transporte ha de ser igual a la suma de usuarios que demanda ese nodo como destino de sus viajes.

Tercera definición:

El flujo de arcos de salida de un nodo origen de una red de transporte ha de ser igual a la suma de usuarios que oferta ese nodo como origen de sus viajes.

Cuarta definición:

Los nodos origen solo poseen arcos de salida, y los de destino solo arcos de entrada.

De acuerdo con la proposición 1 y las definiciones reformulamos el problema (1):

De acuerdo con la proposición 1 y estas definiciones reformulamos el problema ( 1 ) :

$$\begin{aligned} \text{Min}_{x \in \mathbb{R}^n} \quad CT &= \sum_1^n \int_0^{x_i} c_1(w) dw \\ \text{sujeto a:} & \\ Ax &= q & (4) \\ x_i &\geq 0, \quad \forall i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

donde A es la matriz de coeficientes de las restricciones de igualdad,  $x \in \mathbb{R}^n$  es el vector de variables (arcos) y q es el vector de coeficientes del lado derecho de cada restricción. Para cada nodo formulamos una restricción de acuerdo las definiciones anteriores.

$$\text{Min}_{x \in \mathbb{R}^n} \quad CT = \sum_1^n \int_0^{x_1} c_1(w) dw$$

Sujeto a:

$$Ax = q$$

$$x_1 \geq 0, \quad \forall = 1, \dots, n$$

Donde A es la matriz de coeficientes de las restricciones de igualdad,  $x \in \mathbb{R}^n$  es el vector de variables (arcos) y q es el vector de coeficientes del lado derecho de cada restricción. Para cada nodo formulamos una restricción de acuerdo las definiciones anteriores.

### ALGORITMO DE FRANK-WOLFE

El algoritmo del Frank-Wolfe es uno de los algoritmos de aproximación en la optimización no lineal. Genera una dirección factible que minimiza la función objetivo no lineal en cada iteración para encontrar la solución, para ello debe satisfacer un criterio pre definido de terminación.

Le Blanc Et Al. (1975) uso inicialmente el algoritmo de Frank-Wolfe para solucionar el problema de asignación de tráfico en su investigación, el algoritmo ha sido usado ampliamente en el campo de transporte, pues determina de manera efectiva el flujo a ser asignada a la red y es un método relativamente efectivo en términos de método fácil y la cantidad moderada de almacenamiento de datos.

El método de Frank-Wolfe es un método que tiene como criterio linealizar la función objetivo, luego esta nueva función puede resolverse por cualquier otro método o criterio de programación lineal

El algoritmo de Frank-Wolfe es una combinación del método del gradiente con un método de optimización lineal, por lo que no es adecuado para la asignación de viajes en redes de transporte ya que estos últimos son un problema de optimización no lineal.

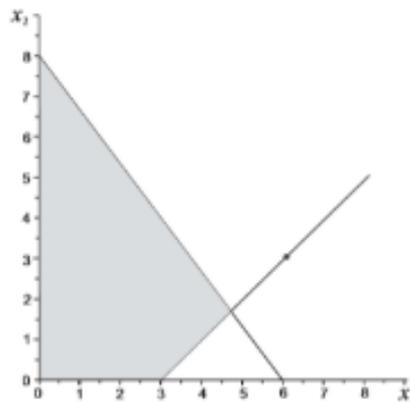


Figura N° 14 : Región factible del problema

### OPTIMIZACIÓN DE LA RED MEDIANTE EL MÉTODO DEL CONJUNTO ACTIVO

Dado el problema de optimización de la red tenemos una función objetivo no lineal y un conjunto de restricciones lineales de igualdad junto a las restricciones de no negatividad de las variables. El número de variables será menor que el número de restricciones activas lo que nos permite utilizar como espacio de búsqueda el espacio nulo. En este tipo de red, el número de variables es igual al número de arcos, mientras que el número de restricciones activas viene determinado por el número de nodos (Newell, 1980) y el número de variables con flujo cero.

Para la función objetivo  $CT(x)$ , donde  $x$  es un vector de  $\mathfrak{R}^n$ , calculamos el gradiente de dicha función  $g(x)$  y una matriz simétrica  $B$ , que será una aproximación a la

Hessiana de  $CT(x)$ . A continuación, hallamos la factorización LQ de la matriz  $A$ , de restricciones activas, que nos permite obtener la matriz ortogonal  $Q$ , a partir de la cual calculamos la matriz del espacio nulo  $Z$ , considerando las  $n-m$  últimas columnas de la misma, donde  $m$  es el  $n^\circ$  de restricciones activas.

0

Consideramos una solución inicial,  $x$ , que establezca un flujo distinto de cero para todos los arcos de la red, de esta forma evitamos que las restricciones de no negatividad de las variables formen parte del conjunto activo inicial.

A continuación, nos dotamos de una dirección de búsqueda descendente para proceder a avanzar a lo largo de ella y alcanzar un menor valor de la función objetivo. Escogemos una aproximación quasi-newton, siendo la dirección de búsqueda  $p$ :

El empleo de una línea de búsqueda quasi-newton requiere una fórmula de adaptación de la matriz  $B$ , para ello utilizamos la adaptación de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) que propone el cálculo de la actualización de la matriz  $B$  en la  $i+1$ -ésima iteración como:

$$B^{i+1} = B^i - \frac{B^i s^i s^{iT} B^i}{s^{iT} B^i s^i} + \frac{s^i s^{iT}}{p^i} \quad (7)$$

donde  $p^i = g^i - g^{i-1}$ , donde  $g^i$  indica el gradiente evaluado en  $x^i$ , y  $s^i = x^i - x^{i-1}$ .

$$y^i = \nabla p^i - \nabla^2 C(x^i) s^i \quad (6)$$

Una vez determinada la dirección de búsqueda es necesario establecer una longitud de paso. Podemos entonces calcular la nueva solución:

$$x^{i+1} = x^i + \alpha^i p^i \quad (8)$$

donde  $\alpha$  es la longitud máxima de paso a dar, y  $p^i$  representa la dirección de búsqueda obtenida en el  $i$ -ésima iteración, siendo  $x^i$  la solución anterior. La longitud de paso se calcula como:

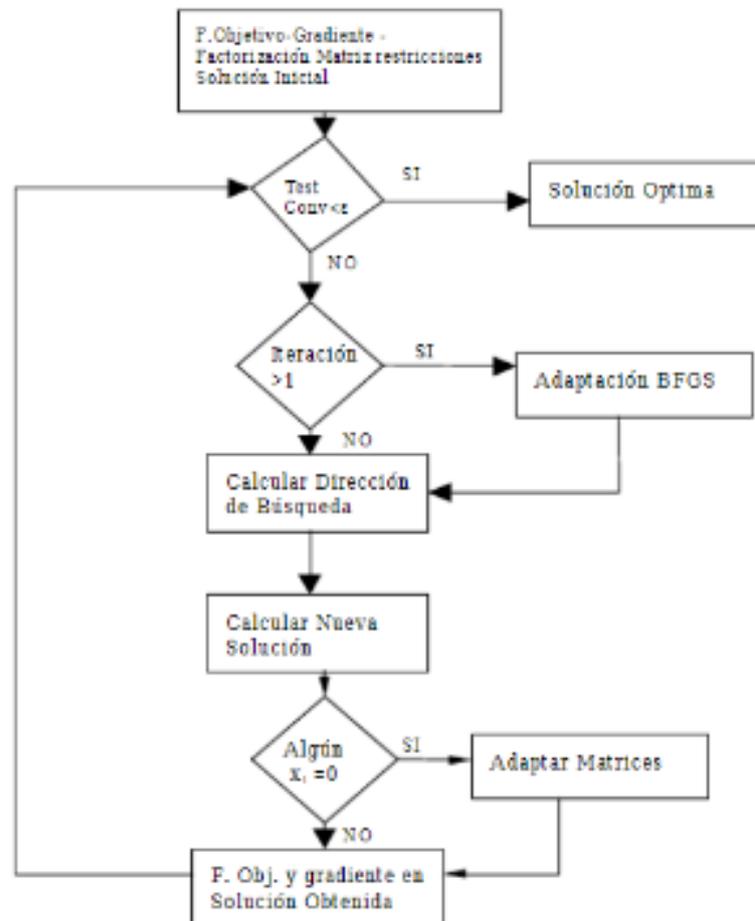
$$\alpha = \min_i \left\{ \frac{X_i}{R_i}, 1 \right\} \quad (9)$$

considerando  $p_i \neq 0$ , para todas las variables de flujo implicadas en el problema cuyo valor sea estrictamente mayor que cero.

Si alguna de las variables de flujo se anula entonces incorporamos al conjunto activo la restricción de no negatividad correspondiente.

El proceso de adaptación de Z se basa en calcular una matriz householder H que anule las t+2 componentes de L, donde t es el número de restricciones de dicho conjunto antes de incorporar la nueva restricción.

Al añadir restricciones de no negatividad al conjunto activo, si  $m=n$  se calculan los valores de los multiplicadores de Lagrange  $\lambda$  y eliminamos la que corresponda al menor valor de  $\lambda$ , tal que  $\lambda < 0$ .



**Figura N° 15 : Algoritmo del conjunto Activo en Redes**

El algoritmo finaliza en el momento en que se alcanza el óptimo, o se está lo suficientemente cerca de él. Consideramos como test de convergencia el criterio del gradiente proyectado.

$$Z^t g(\bar{x}^i) \rightarrow 0 \quad (10)$$

Cuando el valor de este criterio disminuya por debajo de un  $\varepsilon > 0$ , pequeño, entonces detendremos nuestro algoritmo.

## **IMPLEMENTACIÓN EN MATEMATICA**

El algoritmo propuesto se ha implementado dentro de los procedimientos del programa de cálculo simbólico Mathematica, versión 2.1 para ello, se han creado una serie de funciones dentro del entorno de Mathematica que permiten obtener los resultados de los diversos pasos del algoritmo para las diferentes iteraciones. Todas ellas se han agrupado en el paquete “activo.m”.

### **1. Funciones Propias del Método del Conjunto Activo.**

- a) BFGS[Matriz, Vector1, Vector2]: Actualización BFGS de Matriz.
- b) Dir Bus [Matriz1, Matriz2, Vector]: Calcula la dirección de búsqueda, utilizando la matriz del espacio nulo Z, la de estimación de la Hessiana, siguiendo un método quasi-newton, y el vector gradiente evaluado en la solución anterior.
- c) Cota [Vector1, Vector2]: Establece la longitud máxima del paso.
- d) Test Co[Vector1, Vector2, Vector3]: Realiza el test de convergencia con el criterio del gradiente proyectado
- e) Iter1[Vector1, Vector2, Vector3]: Primera iteración en el método C.A. en redes.
- f) Iteracion CA[Vector1, Vector2, Vector3, Vector4]: Segunda y sucesivas iteraciones.
- g) Red CA [Vector1, Matriz, Expresión, Vector2]: Ejecuta el algoritmo del conjunto activo para un problema de redes dado. Vector1 es el vector de variables del problema, Matriz es la matriz de restricciones activa, Expresión es la función objetivo, Vector2 es la solución inicial. El resultado es una lista que contiene el número de iteraciones, la solución óptima encontrada y el resultado del gradiente proyectado en dicha solución.

## 2) Funciones de Utilidad Creadas:

**h) Factor LQ[Matriz]:** Realiza la factorización LQ, donde Matriz será una matriz  $m \times n$ ;  $m > n$ .

**i) Espacio Nulo [Matriz, Entero1, Entero2]:** Calcula la matriz del espacio nulo de restricciones.

**j) Gradiente [Expresión, Vector]:** Mediante esta función se calcula el gradiente de la Expresión.

**k) Evaluador [Expresión, Vector1, Vector2]:** Calcula el valor de la Expresión en Vector2.

**l) Adapta EN [Matriz1, Matriz2, Matriz3, Entero1, Entero2]:** A través de este procedimiento se obtiene la nueva matriz del espacio nulo al añadir una restricción al conjunto activo.

Para calcular la solución del algoritmo procedemos:

### a) Preliminares.

- Construir un vector con las variables del problema ( $x$ ).
- Calcular la función objetivo ( $F$ ), a partir de las funciones de costes.
- Establecer la matriz de restricciones del conjunto activo ( $A$ ).
- Determinar una solución inicial ( $Sol0$ ).

### b) Función Red CA

A través de la ejecución de dicha función se obtiene la solución al problema para los datos establecidos en el apartado anterior. Ejemplo: Red CA[ $x, A, F, Sol0$ ]. El resultado final es la solución óptima y el vector gradiente proyectado en dicha solución; así como el número de iteraciones necesarias para la obtención de la misma. Asimismo, obtenemos los siguientes resultados:  $Q$ , matriz de factorización LQ de  $A$ ;  $Z$ , matriz del espacio nulo;  $Sol$ , vector con solución final;  $Solant$ , vector con solución anterior;  $B$ , matriz de aproximación de la Hessian;  $Conv$ , vector gradiente proyectado en solución final.

## OPTIMIZACIÓN DE LA RED

El problema de optimización estática del tráfico de una red consiste en la minimización del costo total asociado a la asignación de tráfico de la red, de forma tal que todos los usuarios alcancen sus destinos desde sus respectivos orígenes.

La asignación óptima resultante se denomina asignación de equilibrio del usuario, cuando ningún usuario puede mejorar el coste de su viaje mediante un cambio unilateral en su ruta.

Representamos la red como un grafo dirigido  $G(N,A)$ , donde  $N$  es el conjunto de nodos y  $A$  es el conjunto de arcos, que interconectan dichos nodos. No existen arcos con entrada y salida en el mismo nodo (lazos).

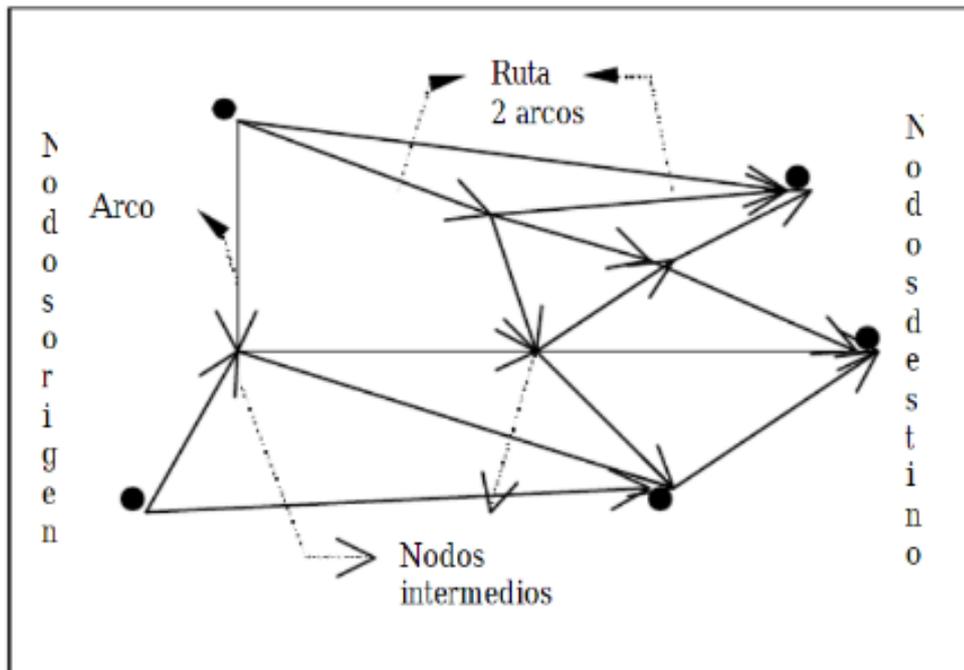
Dentro del conjunto de nodos podemos distinguir tres tipos:

**a) Nodos origen:** Son aquéllos de donde parten los usuarios para dirigirse a un destino. Son los únicos nodos de la red que pueden generar tráfico.

**b) Nodos destino:** Serán los nodos hacia donde se dirige el flujo de tráfico que existe en la red. Son receptores de tráfico.

**c) Nodos intermedios:** Se ubican dentro de la red entre los nodos origen y destino. Actúan como distribuidores del tráfico existente, posibilitando la existencia de diversos caminos alternativos entre los nodos origen y los nodos destino.

El grafo ha de ser conexo con respecto a los nodos origen y destino, de tal forma que se garantiza que existan rutas que los conecten. En la Figura N° 1 se muestra un ejemplo de red de tráfico.



**Figura N° 16 : Red de Tráfico**

La variable de optimización es el flujo de usuarios que circula por la red. A la hora de hablar de flujo en una red podemos considerar dos visiones: en un arco y en una ruta.

Arco es simplemente un nexo directo entre dos nodos, por lo tanto, el flujo que sale del nodo cabecera del arco será el mismo que el que llega al nodo objetivo de dicho arco; este principio se conoce como principio de conservación del flujo de arco.

Ruta es un nexo entre un nodo origen y un nodo destino, y está constituida por un conjunto de arcos, y un conjunto de nodos intermedios.

Definimos el flujo  $x$  como el total de usuarios que circulan a través de un arco  $i$ . En base al principio de conservación del flujo podemos enunciar la siguiente proposición que establece una relación entre el flujo de ruta y el flujo de arco, permitiéndonos expresar el problema en cualquiera de las dos variables.

El **problema de asignación** es una variación del problema original de transporte, variación en la cual las variables de decisión  $X(i,j)$  solo pueden tomar valores binarios, es decir ser cero (0) o uno (1), en la solución óptima, lo que supone que la oferta y la demanda están perfectamente alineadas, de hecho ambas son iguales a uno (1).

Múltiples son los casos en los que como ingenieros industriales podemos hacer uso del problema de asignación para resolver diversas situaciones, entre los que cabe mencionar se encuentran la asignación de personal a maquinas, herramientas a puestos de trabajos, horarios a maestros, candidatos a vacantes, huéspedes a habitaciones, comensales a mesas, vendedores a zonas territoriales etc.

En el **modelo de asignación**, la idea fundamental de resolución es *¿qué fuente satisface mejor el destino?*, y dado que hemos asociado el modelo a una gran diversidad de circunstancias esta pregunta puede plantearse en múltiples contextos, como *¿qué candidato es el idóneo para la vacante?*, o *¿qué personal es el indicado para la línea productiva?*, o *¿qué personal es el mejor para ejecutar determinada tarea?*. Una característica particular del modelo de asignación es que para su resolución no se hace necesario que el número de fuentes sea igual al número de destinos, lo cual es muy común en la vida real, teniendo en cuenta su aplicación, pues generalmente la cantidad de aspirantes es superior al número de vacantes (lógicamente haciendo referencia a la aplicación del modelo al contexto de oferta y demanda laboral).



**Fotografía N° 04 : Vista de vehículos en circulación, en la calle de la Ciudad de Trujillo.  
Congestión Vehicular.**



**Fotografía N° 05 : Vista de Congestión Vehicular en Avda. España. Trujillo**

## V. DISCUSIÓN

El Tránsito urbano es uno de los problemas que más influyen en la calidad de vida de los residentes en las ciudades y áreas metropolitanas de los países desarrollados, así como también en los países en desarrollo y es un problema que se ha acentuado, en las últimas décadas, por el desarrollo de dos fenómenos simultáneos.

El primer fenómeno, una creciente movilidad que ha potenciado el uso del automóvil privado en detrimento del transporte público. El segundo, la generalización del modelo de ciudad difusa, una tipología urbana genuinamente norteamericana, pero imitada en Europa por las grandes ciudades y las ciudades de tamaño medio, que han alcanzado su desarrollo actual tras un proceso descentralizador (Según and Martínez (2004)).

Este nuevo y generalizado modelo urbano acentúa la relocalización de la población, el comercio y los servicios hacia la periferia próxima, en tanto que relega la actividad industrial al espacio exterior de la urbe y en la que el centro tradicional queda reducido a una función simbólica.

Una ciudad que, como sostiene Rueda (1997), "tiene de todo y mucho pero disperso, separado funcionalmente" y, por tanto, presenta ciertos retos en términos de accesibilidad solo superables por una movilidad motorizada, capaz de abarcar progresivamente mayores distancias.

Asistimos, pues, a un proceso expansivo en lo urbano y en la movilidad sobre la base de un creciente número de desplazamientos y el incremento de la amplitud de éstos. Ambos extremos redundan, necesariamente, en la propia expansión de las infraestructuras viarias. Se cierra así un círculo vicioso en el que la persona ha ido perdiendo protagonismo frente al automóvil.

Las elevadas tasas de motorización en los desplazamientos urbanos y la distribución modal de los desplazamientos motorizados, son buenos indicadores de la situación descrita.

En lo que se refiere a las externalidades medioambientales, la situación es asimismo preocupante. El transporte es, en este ámbito, el responsable de más del sesenta por ciento de las emisiones de monóxido de carbono, del cincuenta por ciento de los óxidos de nitrógeno y del treinta y tres por ciento de los hidrocarburos, emisiones que no sólo inciden en el ámbito local -provocando que entre un setenta y un ochenta por ciento de las ciudades europeas con una población superior a los 500.000 habitantes no reúnan hoy las condiciones mínimas de calidad atmosférica estipuladas por la Organización Mundial de la Salud-, sino que contribuyen también a la polución a escala regional y al efecto invernadero.

Todos estos problemas aconsejan el desarrollo de nuevas estrategias globales para un transporte urbano sostenible. Estrategias que contemplen no sólo una amplia gama de medidas paliativas, sino, también, el uso de tecnologías e infraestructuras innovadoras, aspecto éste que constituye una de las características más relevantes de los transportes.

El concepto de un transporte eficiente, eficaz y seguro se impone hoy en las nuevas políticas de transporte. Entre las medidas paliativas, destacan la potenciación del transporte público, políticas de aparcamiento, peatonalización de centros urbanos, imposición de peajes de entrada en determinadas áreas urbanas, etc. Entre las tecnologías e infraestructuras innovadoras, hay que señalar todo un conjunto de recursos que posibilitan rutas y modos de transporte que contribuyen a reducir el tiempo y el recorrido de los desplazamientos al tiempo que procuran mayor fluidez de tráfico, mejor nivel de servicio de las vías y la racionalización del consumo y de las emisiones. Se trata, pues, de una serie de cambios en la concepción del desarrollo del transporte, de carácter tecnológico y que, al no implicar restricciones en la movilidad de la población, son generalmente bien aceptados por ésta.

Es en este contexto donde adquiere relevancia la planificación del transporte cuyo objetivo es responder adecuadamente a las necesidades de movilidad de la población, por medio del dimensionamiento de la infraestructura y de la utilización de los medios de transporte, estableciendo los costes de la solución adoptada, las fuentes de los recursos necesarios, y los plazos respectivos de las etapas propuestas.

En general, el transporte es una actividad derivada de otras actividades que tienen lugar en un área geográfica determinada, sea esta un país, una región, una ciudad, un distrito o un barrio (Manheim (1984)).

El conjunto de actividades de residencia, producción, consumo, ocio, etc. que se produce en un lugar, denominado sistema de actividades, es el que genera ciertas necesidades de viajes o demanda por transporte. Esta demanda es satisfecha por el conjunto de vías, vehículos, terminales y por la forma como funcionan estos elementos; es decir, por el sistema de transporte.

Todo ello se traduce en una interacción entre ambos sistemas (actividades y transporte) que produce un patrón de flujos, constituido por viajes entre diversos orígenes y destinos, en diferentes medios o modos de transporte, por variadas rutas y en distintos periodos que, finalmente, produce un equilibrio entre la demanda y oferta de transporte. Su manifestación más evidente es el transporte urbano, es decir, la circulación de personas y vehículos por los espacios públicos de la ciudad (calles, autopistas, líneas de metro, etc.).

La complejidad de los sistemas de transporte actuales ha mostrado la conveniencia de contar con herramientas analíticas que permitan al planificador disponer de un adecuado conocimiento del sistema y poder hacer predicciones.

El uso de modelos matemáticos, ha sido de gran utilidad en la identificación de soluciones o políticas orientadas a lograr los objetivos propuestos para el sistema, constituyéndose en una gran ayuda para los procesos de planificación y de toma de decisiones, ya que el objetivo de los análisis, en la planificación del tráfico urbano, es la obtención de descripciones macroscópicas de los flujos de tráfico a partir del comportamiento de los conductores o usuarios.

Las aproximaciones alternativas han seguido diversos criterios a la hora de establecer la optimización. Wu (1993) propone un algoritmo de descomposición y la utilización del método del conjunto activo para su aplicación a redes grandes, Larsson & Patriksson (1992) proponen una descomposición simplicial; otros autores proponen los denominados algoritmos de relajación fundamentados en la

desigualdad variacional (Patriksson ,1991). Jayakrishnan et al. (1994) sugiere la aplicación de un método del gradiente proyectado. La aplicación del método clásico del conjunto activo, por su parte también ha sido objeto de aplicación por autores como Toint & Tuytens (1990) y Heredia & Nabona (1992) entre otros.

Nuestra aproximación se basa en las implementaciones de Gill, et al. (1981) y Fletcher (1987) buscando el beneficiarse de ciertas propiedades que facilitan su aplicación a redes de tráfico estáticas.

El análisis de la aplicación del método del conjunto activo pone de manifiesto dos hechos:

1°. El método del conjunto activo en redes converge a una solución óptima, proporcionando un valor de la función objetivo inferior al obtenido mediante el método de Frank –Wolfe (F-W ). Este método se muestra más lento a la hora de aproximarse a la solución óptima en las primeras etapas, propiciado por el empleo de una línea de búsqueda quasi-newton; no obstante, F-W tiende a sufrir una ralentización según avanzan las iteraciones propiciada por la propiedad descendente de la longitud de paso, siendo superado en velocidad por el método del conjunto activo.

2ª Desde el punto de vista operativo hay que significar la mayor eficiencia del método del conjunto activo, puesto que tan sólo requiere una asignación inicial, frente al método de Frank –Wolfe (F-W) que implica la necesidad de realizar una asignación “todo-o-nada” en cada una de las iteraciones. Por su parte, el algoritmo del conjunto activo obliga a trabajar con matrices grandes, aunque no densas, lo que supone que se necesitará un cierto espacio de memoria para su almacenamiento.

En general, la comparación entre ambos algoritmos favorece al método del conjunto activo, puesto que obtiene mejores soluciones, y de una forma más rápida



**Fotografía N° 06 : Vista de Tesista, tomando datos vehiculares en avda. Costa Rica / Real Plaza. Trujillo**

## VI. CONCLUSIONES

- Este modelo de asignación constituye una herramienta alternativa al método clásico de asignación en ciudades.
- Plantearse la asignación utilizando un grafo de transporte que, además de representar las autopistas represente las redes de calles, es un método que requiere un trabajo largo cuyo tiempo de ejecución crece no linealmente con el tamaño del grafo.
- Las jerarquizaciones de las vías se determinaron teniendo presente los flujos optimizados en los arcos de las vías propuestas para tal fin.
- En cualquier caso, supone más trabajo que realizar una malla de elementos finitos en la que cada elemento represente una zona de transporte con características homogéneas.
- Los nodos corresponden a líderes del proyecto y a clientes y los arcos representan asignaciones posibles de líder del proyecto a cliente.
- La función objetivo y las restricciones deben ser lineales.
- El total de unidades que salen del origen debe ser igual al total de unidades que entran en destino, es decir se exige que toda la producción sea distribuida a los centros de ventas en las cantidades que precisa cada uno; por tanto, no pueden generarse inventario del producto ni en las fábricas ni en los centros de ventas.
- Este trabajo es una actualización para determinar modelos y algoritmos para la optimización de rutas y frecuencias de buses, necesario en el marco del desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones para el diseño de sistemas de transporte público urbano colectivo.

- Se percibe una evolución hacia la utilización de algoritmos genéticos, similar a la ocurrida en otras áreas de la optimización combinatoria.
- Los métodos que aparentan ser más aplicables son aquellos que permiten interactividad.
- La calidad de las soluciones solo puede probarse luego de su implantación.
- La eficiencia en cuanto a tiempo de procesamiento de los algoritmos es un aspecto que no está claramente reflejado, y los casos de prueba consisten en redes de a lo máximo 140 nodos, por lo que no podemos afirmar que puedan ser aplicables a la ciudad de Trujillo.
- El problema de la determinación de frecuencias variables en el tiempo (a partir de requerimientos de demanda también variables en el tiempo) está también abierto.
- En general, la comparación entre algoritmos de Frank – Wolfe y el de Conjunto Activo, favorece al método del conjunto activo, puesto que obtiene mejores soluciones, y de una forma más rápida.
- La solución al problema de la congestión vehicular difícilmente puede basarse en la ampliación de la capacidad de las redes viales, como se ha visto en la práctica, ya que, aparte de la dificultad de construir en el ambiente urbano, donde muchas veces ya no hay espacio disponible, estas construcciones implican costos de enormes magnitudes.

## VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda, para mejorar la rapidez de convergencia de un método, se debe de probar con algoritmos de punto interior en vez de un método simple ya que este tiene una convergencia exponencial en el peor de los casos.
- Se debe de hacer estudios sobre las funciones BPR en cada arco de la red de manera que consideren sentidos de subida, bajada ya que con esto se tendrían resultados más aproximados a nuestro medio.
- Se recomienda un estudio variaciones de la formulación del problema ya que de esta manera se puede aproximar mejor las soluciones.
- Se debe probar mejoras del método Frank-Wolfe con combinaciones del gradiente conjugado con métodos de punto interior como los de Merotra.
- Se recomienda que esta propuesta del plan vial, sea tomada como base para los futuros estudios definitivos.
- Se recomienda la construcción de las diferentes vías propuestas en el plan vial.
- Se recomienda la construcción de los diferentes puentes propuestos en el plan vial.
- Se recomienda la construcción de los diferentes óvalos y la instalación de semáforos para permitir una intersección a nivel en las diferentes vías planteadas.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREZKI, Y. & VAN VLIET, D. (1990): A Full Analytical Implementation of the PARTAN/Frank-Wolfe Algorithm for Equilibrium Assignment, en *Transportation Science*, 24, pp. 58-62

AXHAUSEN, K. W. Y SMITH, R. L. (1984) Evaluation of Heuristic Transit Network Optimization Algorithms. *Transportation Research Record*, Vol 976, 7-20

BAAJ, M. H. Y MAHMASSANI, H. S. (1995) Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research* , Vol 3C(1), 31-50.

BARRA, A. Y KAWAMOTO, E. (2000) . Roteirização de ônibus urbano: escolha de um método apropriado às cidades brasileiras. *Engenharia de Tráfego e Transportes 2000: Avanços para uma era de mudanças*. Río de Janeiro: ANPET, 729-742

BELTRÁN P., GSCHWENDER A., MUNIZAGA M., PALMA C. Y ZUÑIGA M. (2016) Desarrollo de indicadores de nivel de servicio de Transantiago utilizando datos pasivos. Presentado en: XVII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito Transporte y Logística. Santiago, Chile.

CEPEDA, M. (2017) Un Nuevo Modelo para la Estimación del Tiempo de Espera en Paraderos de Transporte Público. *Revista Obras y Proyectos N°2*, 34-42. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.

CEPEDA M., COMINETTI R. Y FLORIAN F. (2016) A frequency-based assignment model for congested transit networks with strict capacity constraints: characterization and computation of equilibria *Transportation Research B* 40(6), pp. 437-459.

CHEN, Y. (2016) Bilevel programming problems: analysis, algorithms and applications. Publication 984, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montreal.

DE CEA J. (2014) Análisis de los distintos tipos de modelos de asignación a redes de transporte público. Presentado en: 1er Congreso Chileno de Ingeniería en Transporte. Santiago, Chile.

FERNÁNDEZ OLIVARES A. G. (2016). Modelos matemáticos de asignación de tránsito aplicado a la Red Metropolitana de México. Universidad Autónoma de Metropolitana.

FISK, C. AND S. NGUYEN, S. ( 2017). Solution algorithms for network equilibrium models with asymmetric user costs. *Transportation Science*, 16:361-381.

FLORIÁN M. (2018). An algorithm for transit assignment with capacity considerations. CIRRELT, University of Montreal. Mexico, Septiembre 2011.

LAM W., GAO Z. Y YANG N. (2014) A Stochastic User Equilibrium Assignment Model for Congested Transit Networks. *Transportation Research*, 33B, 351-68.

LUPI, M. (1985): Convergence of the Frank-Wolfe Algorithm in Transportation Networks, en *Civil Engineering Systems*, 19, pp. 7-15.

MARTÍNEZ, M. (2018). Semáforos Inteligentes. Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción-Facultad de Ciencias y Tecnologías. Asunción, Paragua

MANCILLA HERRERA, ALFONSO, EBRATT GOMEZ, ROBERTO Y CAPACHO PORTILLA JOSE. (2015). Diseño y Construcción de Algoritmos. Editorial Universidad del Norte. Colombia.

MOLOCHE GUILLERMO (2016). Un Problema con solución ¿Deberíamos aplicar tarifas de Congestión?

NEWELL, G. (1990): Traffic Flow on Transportation Networks. Cambridge: MIT Press

ORTUZAR, J. y WILLUMSEN, L. (2016). Modelling Transport. Second Edition. Jhon Wiley & Sons. U.K

ORTÚZAR, JUAN DE DIOS. (2017). Modelos de Demanda de Transporte. 2ª Edición. Ediciones Universidad Católica de Chile. Alfaomega. México.

REDALAT EGÜES, G. (2017). “Manual de Ingeniería de Tránsito”, Talleres Gráficos Mundial, SRL, Buenos Aires, Argentina.

SECTRA, F. (2018) Análisis y Calibración de Modelos de Asignación de Transporte Público con Restricción de Capacidad, Ministerio de Planificación y Cooperación, Chile.

TORRES VARGAS, G. y PÉREZ SÁNCHEZ, J.A. (2016). Métodos de asignación de tránsito en redes regionales de carreteras: dos alternativas de solución

Zhu, D. L. AND P. MARCOTTE. (2015). TRANSIT EQUILIBRIUM ASSIGNMENT: A model and solution algorithms. Coupling the auxiliary problem principle with descent methods of pseudoconvex programming, 83:670-685.

WU J. H., FLORIAN M. Y MARCOTTE P. (2014) Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms. Transpn. Sci. 28, 193-203.