

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**Modelación de una red de transporte universitaria
mediante el software VISUM 15**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero civil**, que presenta el bachiller:

María Teresa Ruiz Salinas

ASESOR:

Ing. Félix Israel Cabrera Vega

Lima, julio del 2017

RESUMEN

La alta congestión vehicular, la sobredemanda de rutas motorizadas hacia áreas centralizadas y los largos tiempos de viaje conllevan a cuestionar la metodología de planificación del transporte vigente. La principal paradoja es que esta favorece la creación de infraestructura de transporte, lo que a su vez intrínsecamente implica, viajes de mayores distancias para realizar las actividades diarias, por tanto, el aumento de modos de transporte motorizados.

En el presente trabajo de investigación se presenta la realización de un plan de movilidad simplificado, el cual toma como modelo de aplicación, una red de transporte de pequeña escala. Se busca demostrar la efectividad del uso del transporte público, la bicicleta y la caminata en la mejora de las condiciones de tránsito a fin de promover en los lectores, la creación de ciudades con movilidad sostenible.

Para ello, se comparan dos escenarios mediante uso del software VISUM 15: un modelo base de red de transporte correspondiente a una ciudad universitaria frente a una versión modificada en la que con base en los principios de policentrismo, diversidad y compacidad, se altera la oferta de los servicios, es decir, los lugares de destino de las personas.

El principal resultado obtenido mostró una disminución considerable sobre la dependencia del uso de los medios motorizados privados para el desarrollo de actividades diarias en el periodo de análisis. Se concluyó que para cambiar la jerarquía modal del uso de transporte privado hacia un sistema de transporte sostenible, es importante planificar la red de transporte facilitando la movilidad de las personas dentro de centros de acción moderados. De esa forma, cobran relevancia las ciclovías y caminos peatonales así como buenos sistemas de transporte público.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Modelación de una red de transporte universitaria mediante el software VISUM 15".
Área : Movilidad y Transporte - Investigación
Asesor : Ing. Félix Israel Cabrera Vega
Alumno : MARÍA TERESA RUIZ SALINAS
Código : 2011.4411.412
Tema N° : # 67
Fecha : Lima, 02 de febrero del 2017



INTRODUCCIÓN

La planificación del transporte en las ciudades se ha realizado a través de modelos macroscópicos que a lo largo de la historia se han preocupado por favorecer a la circulación vehicular. Pero en la actualidad, las nuevas políticas de compacidad y polícentrismo, así como los requerimientos de una ciudad sostenible ocasionan una serie de cuestionamientos a estos modelos clásicos o a la forma en la que son utilizados. Por ello, en este proyecto se le emplea para analizar una red universitaria -que comparado con la ciudad puede ser considerado de tamaño pequeño- bajo el escenario actual y otro con una nueva cantidad y distribución de servicios. Al mismo tiempo, se analiza las características del modelo macroscópico en VISUM 15 y se brindan sugerencias para su mejor uso.

OBJETIVOS

Objetivo general

Modelar macroscópicamente una red universitaria de pequeña escala donde se emplean diversos modos de transporte.

Objetivos específicos

Documentar la simbiosis técnico-práctica que implica el diseño de una red de transporte a nivel macroscópico. Además, utilizar un modelo de planificación del transporte, elaborado en el software VISUM 15, para conocer la distribución de viajes de acuerdo a la ubicación y cantidad de servicios. Finalmente, sugerir mejoras a implementar en el software empleado.

HIPÓTESIS

El diseño de una red de transporte básica -que abarca una diversidad de servicios convenientemente ubicados- reduce la sobrecarga de infraestructura, en comparación al enfoque tradicional que privilegia al automóvil, y promueve la interacción e integración de

los ciudadanos. Además los software actuales como el VISUM 15, requieren de nuevos parámetros para planificar la movilidad.

PROGRAMA DE TRABAJO

El desarrollo de la tesis considerará los siguientes temas:

- a) Planteamiento del problema, objetivos e hipótesis de la investigación
- b) Revisión de la literatura - marco teórico: la planificación del transporte, modelos de planificación, nuevo enfoque en el diseño de infraestructura, software de planificación VISUM 15
- c) Resultados.
- d) Conclusiones y recomendaciones.

METODOLOGÍA

La investigación es cuantitativa y se desarrolla básicamente en cuatro etapas: búsqueda de información para construir el capítulo de revisión de literatura, determinación de la información para construir el modelo en VISUM 15 –tanto del escenario actual como del modificado-, construcción de los modelos, y análisis de los resultados.

REVISIONES

Primera Revisión:

- Objetivo general y objetivos específicos.
- Hipótesis de la investigación.
- Marco teórico (revisión de la literatura).

Segunda Revisión

- Metodología del trabajo.
- Recolección de datos de campo.

Tercera Revisión:

- Procesamiento y análisis de la información de campo.
- Conclusiones y recomendaciones.

VB°
Dr. Rafael Aguilar
Director de Investigación

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERÚ
Av. Universitaria 1801, San Miguel
Lima 32 - Perú
T: (51 1) 626 2000 anexo 5501

www.pucp.edu.pe/facultad/ingenieria

DEDICATORIA



Al apoyo incondicional de mi familia y amigos, cuya
confianza depositada en mí me alientan a esforzarme
y perseguir mis sueños.

AGRADECIMIENTOS

Al apoyo del grupo PTV, quienes me proporcionaron el modelo base empleado en mi proyecto de investigación. Al Ing. Félix Cabrera, por su dedicación y disponibilidad en asesorarme, compartiendo los objetivos de mejorar nuestra planificación de transporte y alcanzar una movilidad sostenible.



CONTENIDO

RESUMEN	I
DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos	1
1.1.1. <i>Objetivo general</i>	1
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	2
1.2. Hipótesis	2
1.3. Alcance y limitaciones	2
2.1. La planificación del transporte	3
2.1.1. <i>Perspectiva Histórica</i>	3
2.1.2. <i>Directrices de la planificación del transporte</i>	4
2.1.3. <i>Variables involucradas en la planificación</i>	5
2.2. Modelos de Planificación del transporte	8
2.2.1. <i>Modelo Clásico de transporte</i>	8
2.2.1.1 <i>Generación de viajes</i>	8
2.2.1.2 <i>Distribución</i>	13
2.2.1.2.1 <i>Método de Factor de Crecimiento</i>	14
2.2.1.1.1. <i>Método de Furness</i>	17
2.2.1.1.2. <i>Ley de Gravedad</i>	18
2.2.1.1.3. <i>Ley de Oportunidades Intervinientes</i>	19
2.2.1.3. Partición Modal	20
2.2.1.3.1. <i>Logit Models</i>	21
2.2.1.4. Asignación	23
2.2.1.4.1. <i>Todo o Nada o El camino más corto (Determinístico)</i>	24
2.2.1.4.2. <i>Equilibrio de Wardrop</i>	24
2.2.1.4.3. <i>Modelo Estocástico</i>	25
2.3. Nuevo Enfoque en el diseño de infraestructura de transporte	27
2.3.1. <i>La Movilidad Sostenible</i>	28
2.3.2. <i>Problemas identificados del modelo clásico</i>	28
2.3.3. <i>Principios de la movilidad sostenible</i>	29

2.3.4. <i>Directrices para el diseño de infraestructura de transporte</i>	30
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	32
3.1. Revisión literaria	33
3.2. Estudio de caso: Uso del software VISUM 15.....	33
3.2.1. <i>Software de Planificación: VISUM15</i>	33
3.2.1.1 Antecedentes de VISUM15	34
3.2.1.2. <i>Características del software</i>	35
3.2.2. <i>Investigación de la información de la población a ingresar en el modelo</i>	36
3.3. Comparación y Análisis de resultados	37
3.3.1. <i>Comparación de escenarios</i>	38
3.3.2. <i>Sugerencia de nuevos parámetros</i>	38
CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE CASO: ESCENARIO BASE	39
4.1. Descripción del lugar de estudio.....	39
4.2. Sobre la población	39
4.3. Antecedentes de movilidad	40
4.4. Infraestructura y modos de transporte	41
4.4.1. <i>Modos motorizados.</i>	41
4.4.2. <i>Modos no motorizados.</i>	43
4.5. Modelo Base	44
4.5.1. <i>Generación de Viajes.</i>	44
4.5.2. <i>Distribución.</i>	45
4.5.3. <i>Partición Modal.</i>	46
4.5.4. <i>Asignación.</i>	51
CAPÍTULO 5. ESCENARIO MODIFICADO	53
5.1. Objetivo	53
5.2. Jerarquía Modal	53
5.3. Ubicación de servicios.....	54
5.4. Infraestructura de transporte	58
5.5. Demanda	61
CAPÍTULO 6. COMPARACIÓN DE ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
6.1. Partición Modal	66
6.2. Impedancias por modo de transporte	67
6.3. Accesibilidad	69

6.4. Asignación de rutas	71
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS.....	76



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Círculo vicioso entre el automóvil y transporte público. Fuente: Adaptado y traducido de Ortúzar (1990).....	6
Figura 2. Tarifas de pasajes (USD) según medio de transporte y ciudad metropolitana. Fuente: CAF (2011).	6
Figura 3. Círculo vicioso de aumento de propietarios de vehículos privados y congestión. Fuente: Adaptado de Ortúzar (1990).....	7
Figura 4. Esquema de las 4 etapas del Modelo Clásico de planificación del transporte. Fuente: Elaboración propia.....	8
Figura 5. Producción y Atracción de viajes. Fuente: Elaboración propia.	9
Figura 6. Zonas de Tránsito y Distritos del Área de Estudio. Fuente: SIGMA GP-LOGIT (2010).....	11
Figura 7. Modelo Logit y Nested Logit. Fuente: Ben-Akiva (2008)	22
Figura 8. Caso 4 de posible escenario futuro. Fuente: JICA (2013).	27
Figura 9. Congestión de vehículos motorizados en Hanoi. Fuente: Minh (2016).	29
Figura 10. Conceptos de policentrismo, compacidad y diversidad.....	30
Figura 11. Nivel de detalle de los software de transporte. Fuente: PTV América (n.d.).....	34
Figura 12. Metodología de un Plan de Movilidad. Fuente: Elaboración propia (Imagen: Freepik).	37
Figura 13. Mapa de la Ciudad Universitaria de UNAM. Fuente: Google Maps. (2016)	39
Figura 14. Sector más poblado de la UNAM. Fuente: Google Maps (2016) y Mapas UNAM (2016).....	40
Figura 15. Carreras con mayor población estudiantil. Fuente: Adaptado de Agenda Estadística UNAM (2016).....	40
Figura 16. Mapa de rutas de la línea PumaBús. Fuente: Mapas UNAM (2016)	41
Figura 17. Estaciones Universidad y Ciudad Universitaria dentro de la UNAM. Fuente:	42
Figura 18. Red de ciclovías UNAM. Fuente: Transporte Bicipuma UNAM (2016)	43
Figura 19. Estación de bicicletas y red de ciclovías en UNAM. Fuente: Transporte Bicipuma UNAM (2016).....	43
Figura 20. Modos de transporte creados en el modelo VISUM de la UNAM. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 21. División de los modos de transporte entre los sistemas de transporte privado y público. Fuente: Elaboración propia.	47

Figura 22. Rutas de línea creadas en el modelo VISUM de la UNAM con recorrido en la red de transporte. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 23. Rutas de la línea PumaBús del modelo base. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 24. Zonificación de modelo base. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 25. Vías de transporte del modelo base. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 26. Asignación de demanda en las rutas de transporte público, por el método basado en horarios. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 27. Red de ciclovía del modelo base. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 28. Asignación de rutas en el modelo base. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 29. Centros de actividad para el modelo modificado. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 30. Asistencia a las actividades culturales de la UNAM. Fuente: Agenda Estadística UNAM (2016).	55
Figura 31. Zonificación de modelo modificado. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 32. Vías de transporte del modelo modificado. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 33. Cambio de extensión de la red de ciclovía. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 34. Partición Modal del modelo base por estrato de personas. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 35. Partición Modal del modelo modificado por estrato de personas. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 36. Resumen de partición modal por sistema de transporte. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 37. Comparación de conectores y vías de un sentido en los escenarios. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 38. Comparación de vías de un sentido en los escenarios base y modificado. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 39. Transferencias realizadas por los pasajeros en viajes por transporte público. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 40. Asignación de rutas en el modelo modificado. Fuente: Elaboración propia.	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Número de habitantes por zona	11
Tabla 2. Número de viajes por tamaño de hogar y número de vehículos propios.	12
Tabla 3. Número de viajes por tamaño de hogar e ingresos.	12
Tabla 4. Número de viajes por objetivo y zona.	12
Tabla 5. Elementos Matriz de Demanda	13
Tabla 6. Matriz de Demanda.	14
Tabla 7. Elementos del método Factor de Crecimiento	15
Tabla 8. Matriz de demanda	Tabla 9. Matriz de demanda
15	15
Tabla 10. Matriz de demanda	Tabla 11. Matriz de demanda
16	16
Tabla 12. Matriz de demanda predecesora t	17
Tabla 13. Matriz de demanda estimada T	17
Tabla 14. Variaciones de la Ley de Gravedad	19
Tabla 15. Datos de viaje en horario pico de mañana.	20
Tabla 16. Datos de entrada para software Minitab con datos por grupo de viaje.	22
Tabla 17. Ejemplo Principios de Wardrop.	25
Tabla 18. Rutas de transporte privado consideradas.	26
Tabla 19. Posibles escenarios de rutas que se consideraron en la simulación.	26
Tabla 20. Resumen de los indicadores de infraestructura vial en Lima.	29
Tabla 21. Acciones a tomar para alcanzar una infraestructura bajo el concepto de movilidad sostenible.	31
Tabla 22. Principales características del software VISUM 15.0	35
Tabla 23. Grupos de personas creados para el modelo base.	44
Tabla 24. Total de viajes de producción y atracción para cada zona de modelo base.	45
Tabla 25. Grupos de personas creados para el modelo modificado.	62
Tabla 26. Total de viajes de producción y atracción para cada zona del modelo modificado.	64
Tabla 27. Tiempos de viaje, distancia y velocidad por sistema de transporte público. Fuente: Elaboración propia.	68

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la planificación del transporte se realiza bajo la teoría de modelos clásicos macroscópicos, siendo el Modelo de Cuatro Etapas, el primer referente y más empleado. Este modelo, provee una metodología sistemática de planificación de transporte a partir de características preexistentes de la población. Lo particular, es que su metodología se centra en cómo diseñar vías de transporte, por tanto sigue la premisa de la necesidad de crear infraestructura para los medios motorizados. Por otra parte, entre las características de la población que toma, están el poder adquisitivo y el número de vehículos privados por familia. Aquello, refleja en líneas generales, la prioridad que otorga el Modelo de Cuatro Etapas al uso y diseño de la ciudad para el vehículo privado motorizado y su atención en el diseño del sistema de transporte (McNally, 2007). Sin embargo, la fuente primaria de estudio para planificar un sistema de transporte, debiera partir y concentrarse en las actividades diarias de las personas, para en base a ello analizar distintas alternativas que proporcionen una solución eficiente a nuestra necesidad de viajar, conjugado con el cuidado de nuestro entorno, el medio ambiente. Los viajes cortos que se pueden realizar a pie y en bicicleta contribuyen con este fin y son los pilares de la Movilidad Sostenible.

Por esta razón, en la presente tesis, se describe el Modelo de Cuatro Etapas, para dar a conocer la metodología que sigue con un ejemplo aplicativo a través de modelación macroscópica con el software VISUM 15. Además, en un segundo escenario, se presenta el mismo ejemplo aplicativo de modelación, con modificaciones a partir de algunas consideraciones tomadas del enfoque de Movilidad Sostenible. Así, se comparará la distribución de viajes en base al sistema de transporte (modelo clásico) y en base a la ubicación y cantidad de servicios (movilidad sostenible).

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Modelar macroscópicamente una red universitaria de pequeña escala donde se emplean diversos modos de transporte.

*Se define red de pequeña escala a una contenida en un área de 750 Ha.

1.1.2. Objetivos específicos.

Documentar la simbiosis teórico-práctica que implica el diseño de una red de transporte a nivel macroscópico. Además, utilizar un modelo de planificación del transporte, elaborado en el software VISUM 15, para conocer la distribución de viajes de acuerdo a la ubicación y cantidad de servicios. Finalmente, sugerir mejoras a implementar en el software empleado.

1.2. Hipótesis

El diseño de una red de transporte que abarca diversidad de servicios convenientemente ubicados reduce la sobrecarga de infraestructura en comparación al enfoque tradicional, que privilegia al automóvil, y promueve la interacción e integración de los ciudadanos. Además, los software actuales como el VISUM 15, requerirán de nuevos parámetros para planificar la movilidad.

1.3. Alcance y limitaciones

Debido a la complejidad de la creación de modelos de planificación de transporte se decidió realizar el proyecto de investigación sobre un modelo base, proporcionado por el grupo PTV-Planungsbüro Transport und Verkehr (Oficina de Planificación de Transporte). Este modelo base se trata de una red de pequeña escala de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El modelo base obtenido, contenía la geometría de la red, mas no se contaba con datos de entrada para el software. Por ello, se crearon los datos de entrada, lo cual abarca principalmente la población total y la demanda de viajes entre zonas, además de grupos de personas, velocidades máximas e impedancias (costo de utilizar alguna vía de transporte, expresado monetariamente o en términos de tiempo). Estos datos fueron en gran parte supuestos y completados de diversas fuentes con información estadística sobre la universidad en estudio.

Luego, se elaboró un modelo modificado, donde se alteró la distribución y oferta de servicios ubicados en la red de transporte. Se resalta que la distribución temporal y espacial de los viajes obedece a características complejas, por lo que el caso presentado es una simplificación de la realidad así como del efecto de los factores involucrados.

Finalmente, es importante recalcar que si bien el modelo base es de la ciudad universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, la ubicación geográfica no constituye una limitación al presente proyecto de investigación ya que lo que se busca comparar son los resultados de aplicar distintos modelos de planificación de transporte a dos escenarios de un mismo lugar.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. La planificación del transporte

2.1.1. Perspectiva Histórica

La planificación del transporte se ha ido perfilando como una especialidad con el transcurso de los años en respuesta a los distintos modos de transporte que demandan facilidades para su uso. Por otra parte, a través de la historia, ha sido distintivo de hegemonía y civilización.

En un inicio, en las comunidades primitivas, el único modo de transporte era la caminata. Cuando los primeros pobladores empiezan a ganar dominio sobre los animales e inician la domesticación, usaron a algunos de ellos para reducir el tiempo de viaje que en general tomaba varios días. Luego, cuando las culturas se desarrollaron y ganaron mayor estabilidad, comenzó el proceso de conquista y lucha por la predominancia de unas sobre otras, así como la necesidad de comercio. Esto llevó a buscar nuevas rutas, por tierra y océano.

En América del Sur, como en el caso de Perú, las culturas prehispánicas continuaban realizando sus recorridos a pie, pero sí reconocieron la importancia de una red de caminos que conectara sus centros de origen con los de las nuevas culturas que habían conquistado.

De las grandes civilizaciones del medio oriente, exactamente en Mesopotamia, se inventó la rueda (Islas & Lelis, 2007). Fue en la época moderna, que dicho invento alcanzó su mayor auge ya que con “la introducción de los automóviles como medio predominante de transporte en el Siglo XX, ocurrió un quiebre definitivo de las estructuras urbanas tradicionales basadas en calles y plazas” (Ghel & Svarre, 2013, p. 29).

La capacidad de velocidad de un automóvil cambió la perspectiva acerca de distribución y distancias de los focos de actividades, luego, el aumento de personas con vehículos privados conllevó a prestar gran atención a los profesionales encargados del estudio de tráfico, de infraestructura de transporte y planificación.

2.1.2. Directrices de la planificación del transporte

De la misma forma en que los modos de transporte fueron variando y diversificándose, la perspectiva de su organización también ha ido cambiando. En este proceso se analizan factores como el uso del suelo, las actividades económicas, la capacidad de estimar el tráfico o la demanda de vehículos, de vías, entre otros. Con el avance de las tecnologías y la experiencia ganada con los años, la posibilidad de realizar estudios más detallados o en un menor lapso de tiempo, ha también suscitado la aparición de nuevos métodos de planificación y de diseño de la infraestructura de transporte. El uso de software para la planificación de transporte constituye hoy una herramienta de macrosimulación. Aparte de ello, los “intereses de investigación se han ampliado hacia modelos desagregados y microscópicos que logran capturar comportamientos de viajes diversificadas y la complejidad de los cambios en el uso del suelo de transporte con enfoques innovadores, como a través de modelos de microsimulación y modelos basados en las actividades.” (Kii, Nakanishi, Nakamura, & Doi, 2016, p.149).

Alrededor de mediados del siglo XX, cuando la oferta y adquisición de vehículos empieza a despegar, los modelos de transporte apuntaban al desarrollo de infraestructura vial, lo cual implicó diseñar ciudades con edificaciones más distanciadas entre sí (Ghel & Svarre, 2013). Los primeros enfoques también se caracterizaron por estimaciones imprecisas basadas principalmente en la demanda a futuro en periodos de tiempo relativamente largos, y asumidos como invariables.

En cuanto a la dinámica de viajes, inicialmente los Modelos de Ley Gravitacional, explicaban la probabilidad de viaje entre un lugar de origen y uno de destino en función de sus habitantes y la distancia que los separaba. A medida que se incluyeron otros aspectos como el modo de transporte, surgió el *Modelo de cuatro etapas* que se detallará más adelante y que coloca como valores determinantes el costo y tiempo de viaje. Estos modelos forman parte de modelos agregados cuyo foco de estudio son zonas con toda su población incluida y aplicados a la planificación urbana de gran escala.

Naturalmente existían en los modelos más de una deficiencia, Lee (1973) enumera siete: *hypercomprehensiveness, grossness, hungriness, wrongheadedness, complicatedness, mechanicalness, and expensiveness*, criticando sobretudo el hecho de que visaban muchos logros cuando aún las herramientas eran incipientes y se caía en conflictos o contrariedades.

Los siguientes modelos incorporaron teorías económicas para explicar la ubicación y distribución de actividades, “tuvieron éxito al incorporar teorías de comportamiento en la modelación urbana, lo cual no había sido considerado en la generación previa de modelos [...], la estructura flexible de la teoría hizo posible incluir varios factores relativos a actividades

urbanas” (Kii, Nakanishi, Nakamura, & Doi, 2016, p.150). Con el avance de la tecnología y la capacidad de procesamiento de datos, la simulación permite evaluar la eficiencia de varias alternativas de modelos. Incluso, consideraciones de las actividades humanas y cambios en la estructura social pueden ser tomadas en cuenta a nivel microscópico:

Desde un punto de vista técnico, el panorama es excelente. Más computadoras poderosas eliminarán las barreras. Para incrementar la resolución espacial, temporal y material de los modelos. [...] La múltiple representación de los datos espaciales en formato vectorial y SIG combinará las ventajas de desagregación espacial (trama) y algoritmos eficientes de redes (vector). Enfoques probabilísticos agregados (por ejemplo, la entropía maximizada) serán reemplazados por enfoques estocásticos desagregados (microsimulación) (Wegener, 2004, p.10).

Sin embargo, en el caso de la planificación de la infraestructura de transporte, la cual se trata de un modelo a nivel macro, aún no se encuentra muy bien implementada en países en vías de desarrollo. Es importante que una variable determinante sea la interacción social a través de distintos modos de transporte y la sustentabilidad o armonía entre el espacio urbano y la preservación del medio ambiente, que asegura el bienestar y confort básico de una sociedad.

2.1.3. Variables involucradas en la planificación

Desde el momento en que el automóvil cobró un papel protagónico para un número demandante de personas cada vez mayor, el nivel de adquisición de vehículos ha sido uno de los factores cruciales en los modelos de planificación de transporte. Las razones que motivan a la persona a adquirir un automóvil no son fijas, sino mas bien, cambian en el tiempo y dependen de cada contexto cultural. A continuación, se presenta el círculo vicioso entre el uso de automóvil o transporte público, de Ortúzar (1990), el cual muestra los factores que influyen en la adquisición de más automóviles:

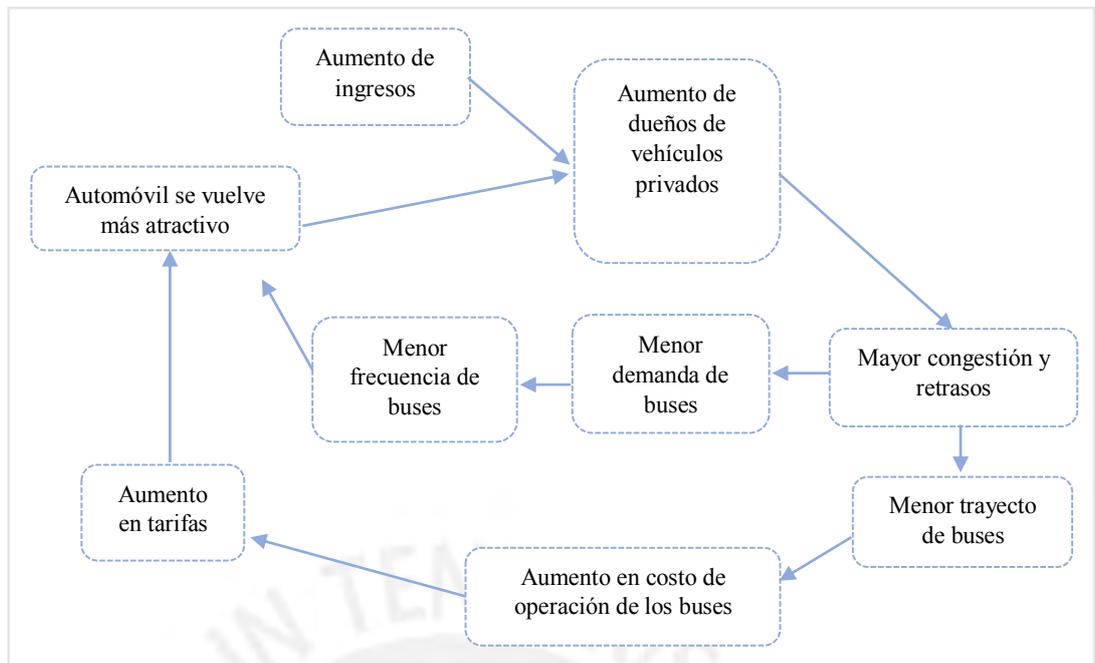


Figura 1. Círculo vicioso entre el automóvil y transporte público. Fuente: Adaptado y traducido de Ortúzar (1990).

El costo de las tarifas, de operación o impuestos no son una variable predominante en países en vías de desarrollo, como Perú, donde existe un sistema de regulación precario, con la mayor diversidad de tarifas en América Latina y con montos mínimos que se encuentran entre los más bajos también.

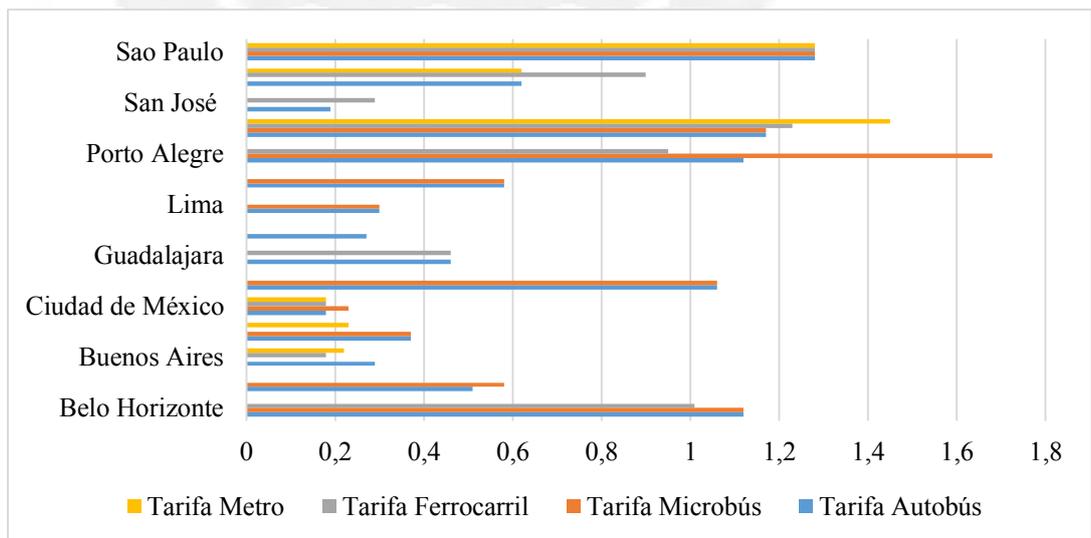


Figura 2. Tarifas de pasajes (USD) según medio de transporte y ciudad metropolitana. Fuente: CAF (2011).

Sin embargo, entre los usuarios (personas que demandan los modos de transporte para realizar sus viajes), se aprecia otros factores que van cobrando relevancia, como el *valor del tiempo*, *el confort y la seguridad*. Las jornadas laborales en aún varios países se caracterizan por ser muy extensas y de alto esfuerzo físico, sobrepasando las ocho horas diarias. Esto, sumado a la característica de ciudades centralizadas, causa que la población mayoritariamente de menores recursos que se movilizan en transporte público llegue hasta en lapsos de 2 a 3 horas a sus hogares, y designen su tiempo a descansar para volver a trabajar al día siguiente.

Por ello, cuando estas personas perciben más ingresos o cuentan con ahorros monetarios, empiezan a preferir el uso de vehículos privados (*taxis*), y en el caso de la clase media emergente, a adquirir su propio vehículo privado con la finalidad de reducir sus tiempos de viaje. En contraposición, se intensifica el problema: “El servicio de transporte público, que es deficiente y de pésima calidad, genera en la población la decisión de transportarse en automóvil particular, lo que a su vez provoca mayor congestión, y retroalimenta el problema tornándolo más grave” (CAF, 2011, p.218). En base a estas consideraciones, se plantea el siguiente esquema cíclico de aumento en la demanda de transporte privado:

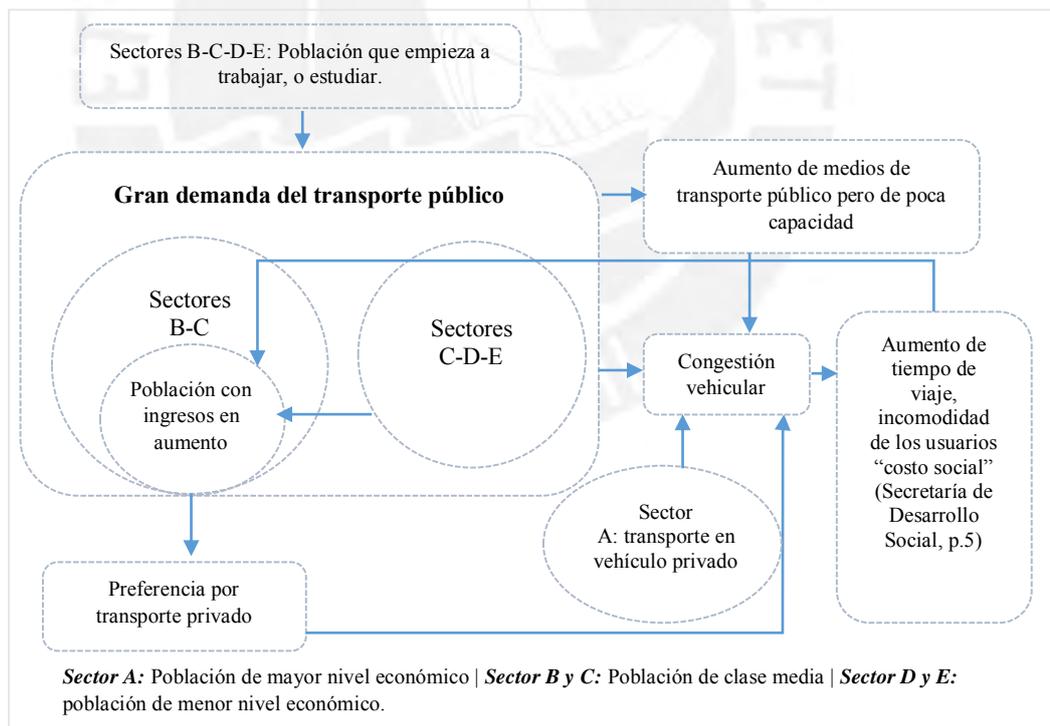


Figura 3. Círculo vicioso de aumento de propietarios de vehículos privados y congestión. Fuente: Adaptado de Ortúzar (1990).

2.2. Modelos de Planificación del transporte

2.2.1. Modelo Clásico de transporte

Conocido también como el *Modelo de 4 Etapas*, es uno de los planteamientos primigenios de cómo organizar o proyectar la estructura del tránsito a través de 4 grandes fases: *generación de viajes*, *distribución*, *partición modal* y *asignación*. Se reconoce su inicio en los años 1960, y permaneció prácticamente inalterado hasta el año 1980.

La compleja dinámica que existe entre la oferta de actividades laborales, económicas y de ocio frente al conjunto de personas que buscan llegar a su destino a través de distintos modos de transporte, llevó a simplificar este proceso a través de etapas claramente identificadas (McNally, 2007).

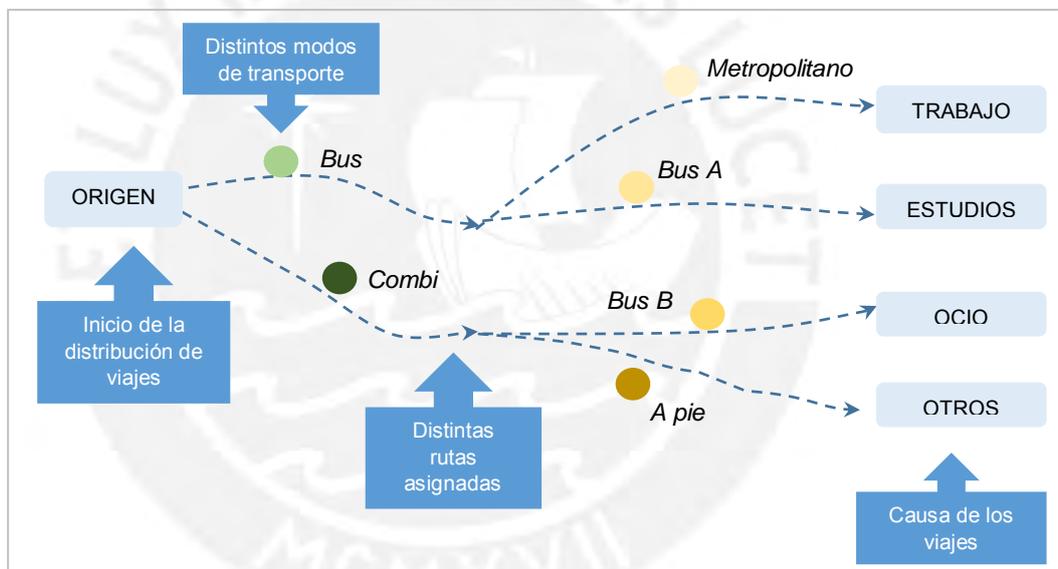


Figura 4. Esquema de las 4 etapas del Modelo Clásico de planificación del transporte. Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.1 Generación de viajes

La primera etapa, generación de viajes, ocurre entre dos entes determinantes: un origen, denotado por la letra O y un destino, denotado por D. Debido a la existencia de múltiples orígenes y destinos, se acostumbra emplear la notación: O_i y D_j ; sin embargo, la palabra clave que define a estos dos entes, son “producción” y “atracción”. Producción hace referencia al lugar desde donde se originan los viajes, y análogamente atracción se refiere al lugar de destino que provocó el viaje. Cabe mencionar que el hogar, siempre es considerado como un lugar de producción.

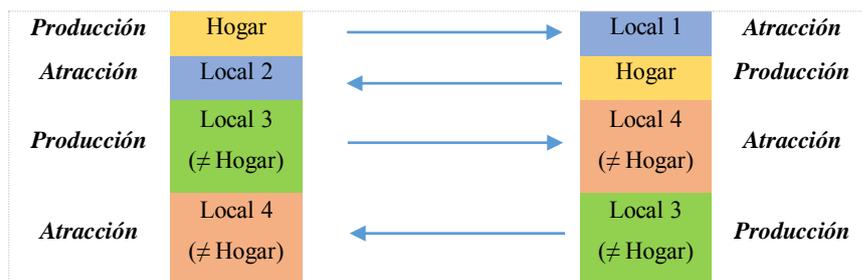


Figura 5. Producción y Atracción de viajes. Fuente: Elaboración propia.

El objetivo en esta etapa se centra en estimar la frecuencia de viajes que suceden entre distintas zonas, lo cual a su vez, permite conocer los principales polos generadores de viajes dentro del área de estudio. Por lo tanto, en esta etapa es importante el muestreo y la toma de datos representativos de la realidad. Cabe mencionar que la simplificación del modelo implica limitar el número de variables y datos a considerar. Como en muchos estudios, que requieren recolección de datos, inicialmente se define el alcance de la muestra a tomar. No incluye solo la forma de cómo se recolectarán los datos, como por medio de entrevistas in situ, sino además, qué parte de la población será considerada. Por ejemplo, los viajes realizados por infantes menores de 5 años, son omitidos, así como también los viajes a pie que son menores a una cierta distancia. (Ortúzar, 1990).

Con el paso de los años, las variables involucradas en la generación de viajes, aumentan, cambian y se acentúan dependiendo del contexto y el tiempo. Si bien los viajes, se generan entre rutas cardinales que incluyen el hogar y el trabajo, existen otras rutas menos frecuentes que cobran relevancia en cada zona de interés como los viajes a restaurantes en hora de almuerzo, viajes a centros comerciales en horario de salida del trabajo o viajes por tramos antes de poca congestión que se vuelven luego muy frecuentados.

Otras dos variables, identificadas como datos de entrada importantes, sobre todo en países en vías de desarrollo, son la accesibilidad y el número de propietarios de vehículo privado. La accesibilidad puede influir drásticamente en el comportamiento de los usuarios, desde los horarios con mayor frecuencia de viaje, las rutas a tomar, el número de conexiones a realizar o inclusive el desistir de dirigirse a determinadas zonas cuando estas son muy poco accesibles (McNally, 2007). En cuanto a la otra variable, esta es exclusiva de cada contexto. Por ejemplo, en Hanoi, capital de Vietnam, la congestión viene colapsando a causa del exceso de motociclistas (Minh, 2016), pero en países como Tailandia y Perú, la atracción por el automóvil es aún predominante. Por ello, incluir datos sobre los usuarios propietarios de

automóviles e inclusive de los otros modos de transporte resulta importante, como indica Sillaparcharn (2007, p.25):

Los modelos propuestos sobre la propiedad de vehículos son útiles en la previsión del nivel de propiedad de vehículos a nivel provincial y nacional lo cual es importante para la infraestructura de caminos, la gestión del tráfico, toma de decisiones estratégicas del transporte, previsión de emisiones, previsión en el uso de energía y cuestiones políticas. También es importante en las decisiones sobre la frecuencia de viajes, la distribución de viajes, la partición modal y la asignación de rutas [...].

De este modo, la recolección de datos en esta etapa, puede proporcionar no solo resultados de viajes por tipo de personas, por propósito, por intervalos del día (Ortúzar, 1990), sino adicionalmente señalar indicadores socio económicos, demográficos o de propiedad vehicular. (McNally, 2007).

La pesquisa de la frecuencia o número de viajes entre un origen y un destino, se cataloga en referencia a zonas de estudio, las cuales cuentan con características concretas según el detalle del modelo. Por ello, es menester haber realizado una zonificación previa del área de estudio. Algunas consideraciones sobre estas áreas de estudios, fueron dadas por Ortúzar (1990):

- El patrón de viajes está ceñido al modelo de zonificación adoptado, por lo tanto, su validez aumentará a medida que las zonas reflejen con justicia el comportamiento de sus viajeros.
- Pueden existir zonas que dependiendo del parámetro de clasificación o evaluación, no aporten con data significativa. En ese caso, resulta conveniente excluir dichas zonas del estudio.
- El modelo puede ser expresado a través de la suma de factores totales de zona, como viajes por zona o se puede expresar como la suma de ratios, como viajes por tipo de hogar por zona, lo cual se obtiene de dividir los totales de zona entre el número de hogares en cada zona y es útil para eliminar la dependencia que tendría el modelo bajo el tamaño de cada zona.

Como ejemplo de la zonificación del área, en el estudio utilizado para el modelado de sistema de tren eléctrico en Lima se definieron 427 zonas de estudio, 401 en Lima y 26 en Callao.

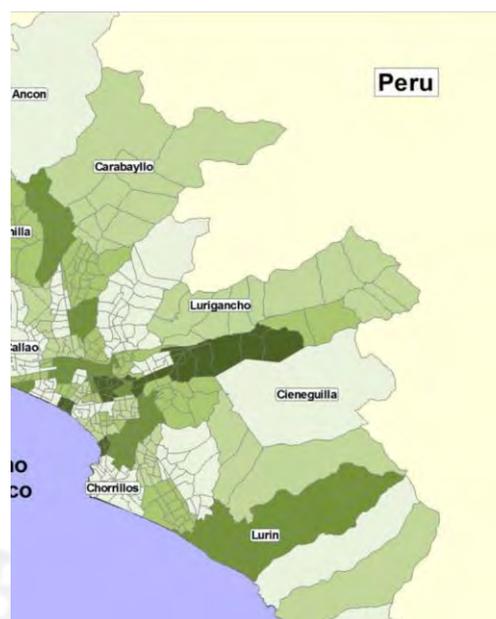


Figura 6. Zonas de Tránsito y Distritos del Área de Estudio. Fuente: SIGMA GP-LOGIT (2010).

Se muestra a continuación la información que podría ser recolectada y procesada en esta etapa:

La población total del área de estudio luego de ser dividida entre las zonas de estudio, puede ser diferenciada según el número de personas por hogar.

Tabla 1. Número de habitantes por zona

Zona	Tamaño de hogar			Total
	[1-2]	[3-4]	5 o más	
A	1848405	3222854	2132297	7203556
B	1762659	2314036	1988347	6065042
C	1969474	2683190	2056268	6708932
				19977530

Fuente: Elaboración propia.

Con información del tamaño de hogar por zonas, se puede encontrar relación entre el tamaño de hogar con el número de vehículos privados en el área de estudio.

Tabla 2. Número de viajes por tamaño de hogar y número de vehículos propios.

Tamaño de Hogar	Propiedad de vehículos			Total
	0	1	2 o más	
1	1555018	1791971	2263604	5610593
2	2244996	2580145	2959811	7784952
3	1775868	2136277	2669840	6581985
				19977530

Fuente: Elaboración propia.

La información a recolectar también debe describir la dinámica de viajes en el lugar. Se puede asociar la cantidad de viajes con el tamaño de hogar. Además de ello, los viajes por tamaño de hogar pueden diferenciarse según el nivel de ingresos de la población. En la Tabla 3 mostrada, el número de viajes aumenta a mayor tamaño de hogar y a mayor nivel de ingresos.

Tabla 3. Número de viajes por tamaño de hogar e ingresos.

Ingresos (soles)	Tamaño Hogar			Total
	[1-2]	[3-4]	5 o más	
[0-3500]	105380	1157857	1299622	3511288
[3501-5500]	1361773	1412395	1326521	4100689
[5501-7000]	1670050	1768127	1789903	5228080
[7001- [2212601	2343543	2581329	7137473
				19977530

Fuente: Elaboración propia.

Además, los viajes pueden ser agrupados según el motivo que los generó. Esta información es muy importante para un modelo de planificación de transporte.

Tabla 4. Número de viajes por objetivo y zona.

Objetivo	ZONA			Total
	A	B	C	
Trabajo	1824870	1258650	1932171	5015691
Estudios	1752931	1318555	1480073	4551559
Hogar	1343639	1930106	1868684	5142429
Familiar	1737901	1462880	2067070	5267851
				19977530

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.2 Distribución

Identificados los principales polos generadores con sus respectivas frecuencias de viajes, se prosigue a distribuir esta data entre pares de zonas, con un origen y destino específico. Además, es importante identificar las impedancias, es decir el “*costo de viaje*”, el cual puede ser un costo en términos monetarios o de tiempo de viaje. Esta variable es importante para obtener un reflejo más fiel del patrón de viajes, entre cada par origen-destino. Otra variable contribuyente a la impedancia es la accesibilidad, la cual es a veces difícil de reflejar en los modelos de transporte cuando la atención recae solo en la dinámica producción-atracción. (McNally, 2007)

Estos factores que influyen en la distribución de viajes, resulta en la búsqueda de estimar probabilísticamente la ocurrencia de los mismos entre dos lugares, lo cual se conoce como *Ley de Distribución de Viajes*. La ley empleada en el modelo clásico se conoce como *Ley de Gravedad*, pero existen otras teorías como la *Ley de oportunidades intervinientes* (Lenormand, Bassolas, & Ramasco, 2016), *Factor de crecimiento* y *Furness*.

De esta repartición de viajes, se genera una *Matriz de Demanda* llamada también *Matriz Origen-Destino (OD)*, cuya composición es la siguiente:

Tabla 5. Elementos Matriz de Demanda

Elementos	Significado
T	Matriz completa OD
Filas y Columnas	Zonas del área de estudio
O	Celdas de orígenes
D	Celdas de destinos
T _{ij}	Una celda de la matriz, que muestra la cantidad de viajes desde el origen i hacia el destino j
O _i	Número total de viajes partiendo del origen i
D _j	Número total de viajes llegando al destino j

Fuente: Adaptado de Gupta y Shah (2012)

En la matriz, los orígenes se ubican en las filas, mientras que los destinos en las columnas, de allí se desprenden las siguientes relaciones:

$$\sum_j T_{ij} = O_i \quad [1]$$

La sumatoria de celdas, en una misma fila (variando los destinos j), es igual al número de viajes que parten del origen i .

$$\sum_i T_{ij} = D_j \quad [2]$$

La sumatoria de celdas, en una misma columna (variando los orígenes i), es igual al número de viajes que llegan al destino j .

Tabla 6. Matriz de Demanda

Generations	Attractions							$\sum_j T_{ij}$
	1	2	3	...	j	...	J	
1	T_{11}	T_{12}	T_{13}	...	T_{1j}	...	T_{1J}	O_1
2	T_{21}	T_{22}	T_{23}	...	T_{2j}	...	T_{2J}	O_2
3	T_{31}	T_{32}	T_{33}	...	T_{3j}	...	T_{3J}	O_3
:	:	:	:					:
i	T_{i1}	T_{i2}	T_{i3}	...	T_{ij}	...	T_{iJ}	O_i
:	:	:	:					:
I	T_{I1}	T_{I2}	T_{I3}	...	T_{Ij}	...	T_{IJ}	O_I
$\sum_i T_{ij}$	D_1	D_2	D_3	...	D_j	...	D_J	$\sum_i \sum_j T_{ij} = T$

Fuente: Ben-Akiva (2008)

El objetivo en la etapa de distribución se centra en determinar justamente la cantidad de viajes producidos y atraídos en cada una de las zonas del área de estudio, para un periodo futuro. Para ello, se realizan estimaciones a partir de distintos métodos. A continuación se presentan algunos de ellos.

2.2.1.2.1 Método de Factor de Crecimiento.

Mediante una matriz de demanda predecesora, denominada de “ t ”, se obtiene la matriz “ T ”. Esto se realiza al afectar la matriz inicial por un factor de crecimiento, el cual puede ser del tipo uniforme, de restricción simple o de doble restricción.

- **Factor uniforme de crecimiento:** generalmente es empleado para periodos cortos de estudio, entre uno a dos años, en que se ha estimado la razón de crecimiento general del número de viajes.

$$[T] = \lambda * [t] \quad [3]$$

$$T_{ij} = \lambda_i * t_{ij} \quad [4]$$

$$T_{ij} = \lambda_j * t_{ij} \quad [5]$$

Donde:

Tabla 7. Elementos del método Factor de Crecimiento

T_{ij}	Matriz de demanda estimada
λ_i	Factor de crecimiento de viajes con origen
λ_j	i o de los viajes con destino j.
t_{ij}	Matriz de demanda predecesora

Fuente: Adaptado de Ortúzar (1990)

Ejemplo: Si se estima que el crecimiento del tráfico dentro de dos años será de 10%.

Tabla 8. Matriz de demanda predecesora t

	D ₁	D ₂	Σj
O ₁	145	120	265
O ₂	100	210	310
Σi	245	330	575

λ = 10% →

Tabla 9. Matriz de demanda estimada T

	D ₁	D ₂	Σj
O ₁	159.5	132	291.5
O ₂	110	231	341
Σi	269.5	363	632.5

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

- **Factor de restricción simple:** En este caso, se conoce el crecimiento final, en un determinado periodo, de los viajes de origen i o de los viajes con llegada a j, por lo tanto se afecta el total parcial de una de dichas variables, buscando lograr el crecimiento final indicado.

Ejemplo: Se tiene la estimación del crecimiento de números de viaje de origen de la zona 1 y 2, a futuro:

Tabla 10. Matriz de demanda predecesora t

	D ₁	D ₂	Σ _j	Valor futuro estimado
O ₁	100	150	250	300
O ₂	120	200	320	400
Σ _i	220	350	570	700

Tabla 11. Matriz de demanda estimada T

	D ₁	D ₂	Σ _j	Valor final alcanzado
O ₁	120	180	300	300
O ₂	150	250	400	400
Σ _i	270	430	700	700

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Factor}_{O_1} = \frac{300}{250} = 1.2 \quad \text{Factor}_{O_2} = \frac{400}{320} = 1.25$$

El valor estimado futuro de cantidad de viajes que partirán de cada una de las zonas de origen O₁ y O₂, son las restricciones simples o condiciones que se deben alcanzar en la matriz a generar “T”. En la zona de origen O₁, se debe conseguir que la suma de viajes que parten de esta, aumente de 250 a 300, por lo que toda la fila se afecta por el factor 1.2. En el caso de la zona de origen O₂, la cantidad de viajes que parten de esta, en la matriz de demanda estimada debe aumentar de 320 a 400, por lo que, dicha fila se afecta por el factor 1.25.

- **Factor de restricción doble:** Es análogo al factor de restricción simple, pero en este caso se conoce el crecimiento final tanto de los viajes atraídos a cada destino j como los viajes originados de cada zona i. Como se deben cumplir dos condiciones simultáneamente, la matriz final T se logra iterando. Se empieza fijando por ejemplo el valor del número de viajes atraídos a cada destino y se afecta el número de viajes de origen i de modo a alcanzar su crecimiento final. Luego, se fija el valor final del número de viajes con origen i y se satisface la condición del número final de viajes atraídos a los destinos j. Este proceso se repite sucesivamente hasta satisfacer las dos condiciones con un error aceptable, recomendado entre 3-5% (Ortúzar, 1990).

Ejemplo:

Tabla 12. Matriz de demanda predecesora t

	D1	D2	Σ_j	Valor futuro estimado
O1	100	150	250	300
O2	120	200	320	400
Σ_i	220	350	570	
Valor futuro estimado	300	400		700

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Matriz de demanda estimada T

	D ₁	D ₂	Σ_j	Valor final alcanzado
O ₁	133.33	167.44	300.77	300
O ₂	166.66	232.56	399.23	400
Σ_i	300.00	400.00	700.00	
Valor final alcanzado	300.00	400		700

Fuente: Elaboración propia

Se iteró una vez cumpliendo la condición de números de viajes futuros que parten en las zonas de origen y una vez cumpliendo la condición de números de viajes futuros que llegan a las zonas de destino y se logró la matriz T cumpliendo las dos condiciones, con un error aceptable de 0.26%.

Esta corrección iterativa implica hallar constantemente factores de crecimiento de modo a cumplir las dos condiciones dadas. Furness es un método en que estos factores han sido formulados, para resolver el modelo doblemente restringido.

2.2.1.1.1. Método de Furness

Establece una fórmula para la matriz T, en la cual aparte de considerar factores de crecimiento, tanto para las zonas de origen como de destino (doble restricción), incorpora dos factores de balance: A_i y B_j .

$$T_{ij} = t_{ij} * A_i * \frac{O_i}{o_i} * B_j * \frac{D_j}{d_j} \quad [6]$$

Fuente: (Gupta & Shah, 2012)

Donde $\frac{O_i}{o_i}$, $\frac{D_j}{d_j}$ son los factores de crecimiento, denotados como τ_i y Γ_j (Ortúzar, 1990).

Además:

$$A_i = \frac{o_i}{\sum_j \varepsilon D * t_{ij} * B_j * \frac{D_j}{d_j}} \quad [7]$$

$$B_j = \frac{d_j}{\sum_i \varepsilon O * t_{ij} * A_i * \frac{O_i}{o_i}} \quad [8]$$

Fuente: (Gupta & Shah, 2012)

2.2.1.1.2. Ley de Gravedad

Esta ley es la más empleada en el diseño clásico. Se diferencia de los métodos de factor de crecimiento en que además toma en consideración posibles cambios que pueden existir en la red de transporte, a través de una función de “*Costo Generalizado de viaje*” (Ortúzar, 1990), llamado también como impedancia.

Esta ley sufrió más de una modificación. Su nombre hace referencia a su formulación inicial la cual relaciona la cantidad poblacional de las zonas de origen con las zonas de destino con la potencia cuadrada de la distancia que las separa, similar a la ley de gravedad estudiada en el campo de la Física. Luego, se identificó que más representativo era emplear la cantidad de viajes finales en las zonas de origen y destino, en lugar de la población y se insertan las variables O_i y D_j . También, en lugar de introducir el efecto de la separación entre el origen y destino directamente en la fórmula, se cambió por una “*Deterrence Function*” $f(C_{ij})$, que muestra la disminución del deseo de realizar un viaje cuando la distancia hacia el destino y el costo aumentan. Finalmente, para incluir las condiciones de simple y doble restricción cuando se cuenta con la estimación del crecimiento de viajes, se incorporó los factores de balance, vistos en el Método de Furness.

Tabla 14. Variaciones de la Ley de Gravedad

Ley de Gravedad Inicial	Ley de Gravedad con Deterrence Function	Ley de Gravedad con Doble Restricción
$T_{ij} = \frac{\alpha * P_i * P_j}{d_{ij}^2}$ <p> <i>P_i</i>: Población de la zona de origen <i>i</i> <i>P_j</i>: Población de la zona de destino <i>j</i> <i>d_{ij}</i>: Distancia entre zona <i>i</i> y <i>j</i> α: Constante de proporcionalidad </p>	$T_{ij} = \alpha * O_i * D_j * f(C_{ij})$ <p>Variaciones de Deterrence Function</p> $f(C_{ij}) = \begin{cases} e^{-\beta * C_{ij}} \\ C_{ij}^{-n} \\ C_{ij}^n * e^{-\beta * C_{ij}} \end{cases}$ <p> <i>C_{ij}</i>: Costo generalizado del viaje de <i>i</i> a <i>j</i> β y η: Constantes de proporcionalidad </p>	$T_{ij} = A_i * O_i * B_j * D_j * f(C_{ij})$ <p>Factores de Balance</p> $A_i = \frac{1}{\sum_j B_j * D_j * f(C_{ij})}$ $B_j = \frac{1}{\sum_i A_i * O_i * f(C_{ij})}$

Fuente: Adaptado de Ortúzar (1990)

2.2.1.1.3. Ley de Oportunidades Intervinientes

Bajo esta ley se relaciona la probabilidad de viaje entre un punto de origen y uno de destino con la población de la zona de origen y las posibilidades de que ocurra el viaje entre el punto de origen al punto de destino en base a las oportunidades presentes en la zona de destino, lo que antes llamamos de “atracción”, por ejemplo, oportunidades laborales, académicas, comerciales, etc. (Lenormand, Bassolas, & Ramasco, 2016).

A continuación se muestra un ejemplo de resultado a obtener en esta etapa:

Tabla 15. Datos de viaje en horario pico de mañana.

ORIGEN	DESTINO	GRUPO	VIAJE	Tmij	Ln(Tmij)
O-101	D-111	HBW	99	75.81	4.33
O-101	D-112	HBW	91	58.53	4.07
O-101	D-115	HBW	441	28.4	3.35
O-101	D-116	OP	120	37.32	3.62
O-101	D-117	HBS	119	40.55	3.7
O-101	D-118	HBW	91	39.93	3.69
O-101	D-122	HBS	219	85.4	4.45
O-101	D-501	OP	99	52.02	3.95
O-101	D-606	OP	121	152.88	5.03
O-101	D-1301	HBW	109	75.47	4.32
O-101	D-1302	HBS	109	79.35	4.37
O-101	D-1302	HBW	109	79.35	4.37
O-101	D-1711	HBS	148	67.17	4.21
O-101	D-2809	HBW	99	80.28	4.39
O-101	D-3106	HBW	99	91.24	4.51

Fuente: Agencia de Cooperación Internacional del Japón (2013).

Donde:

HBW: Viaje de motivo laboral, con salida o destino en el hogar.

HBS: Viaje de motivo de estudios, con salida o destino en el hogar.

OP: Viaje con distinto motivo a los indicados anteriormente.

Tmij: impedancia promedio entre i y j calculada como el promedio entre el modo público y privado, expresada en tiempo (minutos).

2.2.1.3. Partición Modal

En la tercera etapa, ya definida la frecuencia de viajes y los pares de zonas O-D, se busca asociar esta información a las posibilidades de elección de modos de transportes para realizar el trayecto.

Al igual que en las etapas anteriores, existe más de un factor propio de esta fase, los cuales varían entre sí según el grado de influencia que ejercen sobre la elección modal. Entre los principales modelos de partición modal se encuentran el Modelo de Partición Modal de Final de viaje, el Modelo de Partición Modal de Intercambio de viaje, los Modelos Sintéticos y los Modelos de Demanda Directa.

El Modelo de Fin de viaje, introduce la partición modal luego de la generación de viajes, lo cual permite establecer una relación directa entre la información perteneciente a dicha etapa y la elección de los modos de transporte; sin embargo, el input de información resulta limitado a las características de la población en estudio.

Por otro lado, el Modelo de Intercambio de Viaje, introduce la partición modal luego de la distribución de viajes, lo que a su vez implicó poder incluir las características del viaje en la elección modal; sin embargo, como se mostró anteriormente, para esta etapa, la información proveniente de la generación de viajes ya ha sido procesada, por lo que se pierde la relevancia de las características de la población (Ortúzar, 1990).

El Modelo de Demanda Directa, al igual que los dos descritos anteriormente, es un modelo del tipo agregado. De Jong y Tavasszy (2014, p.119) definen de manera sencilla la diferencia entre un modelo agregado y uno desagregado, indicando que “por desagregado se hace referencia a que la unidad de estudio es individualmente la persona a tomar la decisión del modo de transporte que empleará y por el contrario, los modelos agregados en los que la unidad de estudio son el conjunto de entes a tomar la decisión, usualmente zonas geográficas”. En este modelo se determina simultáneamente las respuestas de las etapas de Generación de Viajes, Distribución de Viajes y Partición Modal, a través de fórmulas más complejas.

A continuación se describirá con mayor detalle los modelos sintéticos, pues son los más empleados para la partición modal. Estos son modelos desagregados y se apoyan en procedimientos estadísticos para prever la probabilidad para un sujeto de estudio de elegir un modo de transporte frente a distintas alternativas y con características que intervienen en su comportamiento y su decisión.

2.2.1.3.1. *Logit Models*

El modelo *estándar logit* puede desprenderse a partir del Teorema de Bayes, el cual define la probabilidad de elección de una alternativa entre una gama de opciones. Como se mencionó anteriormente, un modelo desagregado introduce la influencia que ejercen las características de las personas a realizar el viaje sobre su toma de decisión; sin embargo, es difícil abarcar todas estas características y sobre todo aquellas que no describen a gran parte de la población sino que son personalizadas como en el caso de las preferencias y gustos (Gerken, 1991). Por esta razón, se otorga al modelo flexibilidad por medio de residuos aleatorios que cubren el valor de la utilidad percibida por la persona acerca de un modo de transporte. Al variar indistintamente estos residuos, irán variando la elección modal.

El modelo *Multinomial Logit*, se usa específicamente para alternativas que son independientes, y además los residuos están idénticamente distribuidos, por lo tanto la probabilidad de elegir algún modo de transporte dependerá básicamente del número de opciones, sin alguna ponderación (Postorino, 1993).

El modelo *Hierarchical or Nested Logit*, surge especialmente para los casos en que las preferencias entre personas cambian o cuando las alternativas no son completamente

independientes entre sí, sino mas bien, la probabilidad de elegir entre distintas alternativas de transporte guardan relación o similitudes, de modo que es posible de que sean agrupadas (De Jond & Tavasszy, 2014).

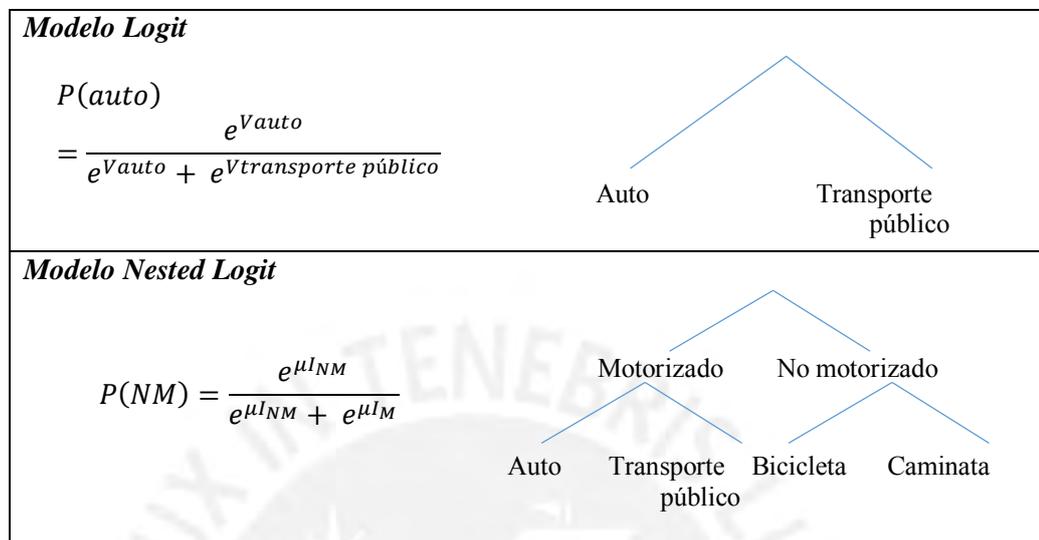


Figura 7. Modelo Logit y Nested Logit. Fuente: Ben-Akiva (2008)

Se presenta un ejemplo de datos a ingresar en el modelo durante la etapa de partición modal:

Tabla 16. Datos de entrada para software Minitab con datos por grupo de viaje.

Par OD	Grupo	Viajes públicos	Viajes privados	Total	Ttvij	Ttwij	Transf ij	Ttpij	Fij	Cpij	Tpvij	dij	Moti
101-111	HBW	99.00	0.00	99.00	36.68	3.76	0.00	8.00	1.50	4.48	16.67	5.73	76.89
101-112	HBW	91.00	0.00	91.00	15.06	0.68	0.00	8.00	1.50	4.12	15.58	5.22	76.89
101-113	HBW	209.00	0.00	209.00	10.65	0.99	0.00	8.00	1.50	3.00	13.40	3.67	76.89
101-115	HBW	310.00	131.00	441.00	2.59	0.61	0.00	8.00	1.50	1.42	9.29	1.92	76.89
101-118	HBW	91.00	0.00	91.00	5.89	0.68	0.00	8.00	1.50	2.58	11.26	3.09	76.89
101-1301	HBW	219.00	0.00	219.00	29.60	2.60	0.00	8.00	1.50	5.02	17.99	6.48	76.89
101-1302	HBW	109.00	0.00	109.00	28.99	2.60	0.00	8.00	1.50	5.53	17.99	7.19	76.89
101-2505	HBW	134.00	0.00	134.00	37.73	3.30	1.00	8.00	3.00	14.92	25.30	20.69	76.89

Fuente: Agencia de Cooperación Internacional del Japón, JICA (2013).

Donde:

T_{tvij}: Tiempo en un vehículo entre el origen *i* y el destino *j*;

T_{twij}: Tiempo de espera en minutos;

Trans_{fij}: Número de transferencias;

T_{tpij}: Tiempo de acceso a pie en minutos de *i* a *j*;

F_{ij}: Costo del viaje representado por la tarifa de pasaje total pagada para el viaje de *i* a *j*;

C_{pij}: Costo del viaje por modo privado dado por el costo operativo (soles / km) y costo de parqueo;

T_{pvij}: tiempo total de viaje para el modo privado de *i* a *j*;

d_{ij}: distancia en km de *i* a *j*;

Mot_i: número de automóviles por 1,000 habitantes de la zona *i*.

2.2.1.4. Asignación

En esta última etapa, se consolida la información desarrollada en las etapas anteriores. En primer lugar, se delimitó el área de estudio cuyas actividades y localización de las mismas, crearon la necesidad de movilización expresada a través de una frecuencia de viaje variable en el día. Los distintos propósitos de estos viajes conllevaron a puntualizar los principales orígenes y destinos. Luego, para poder satisfacer esta necesidad de viaje, en base a las características del usuario, del viaje y de las facilidades ofrecidas por el transporte, eligen entre una serie de opciones, el modo de transporte que se ajusta a sus preferencias y conveniencias. Finalmente, este contexto implica la elección de una ruta de viaje.

Esta ruta de viaje, no es elegida aleatoriamente. Entre los factores que afectan la elección de una ruta, Ortúzar (1990, p.) menciona “el tiempo de viaje, la distancia, el costo monetario, la congestión, las colas, el tipo de maniobras requeridas, el tipo de vía, el escenario, la confianza en el tiempo de viaje a realizar, la señalización de tránsito y las obras viales”. Sin embargo, indica además que precisar un costo generalizado o impedancia de todas estas variables resulta muy complejo, y por ello, se suele tomar como parámetros relevantes, el *tiempo de viaje* y el *costo monetario*, el cual a su vez, generalmente se expresa en relación a la distancia de viaje.

Como todos los usuarios buscan encontrar la ruta con el menor costo generalizado, el principio que rige esta etapa será el punto de equilibrio, en que “todos los caminos utilizados para un determinado par O-D poseen igual impedancias” (McNally, 2007).

La condición de este equilibrio ha sido desarrollado bajo tres métodos: determinístico, estocástico y dinámico.

En el equilibrio determinístico, un modelo simple de elección de ruta asume irrealmente que los viajeros poseen perfecto conocimiento acerca del costo de las rutas y escogen aquella que minimiza sus costos de viaje. En el equilibrio estocástico, un modelo probabilístico de elección de ruta asume razonablemente que los viajeros poseen información imperfecta acerca del costo de las rutas y escogen aquellas que minimizan la percepción que tienen del costo de viaje dado un conjunto de opciones. En la asignación dinámica de tráfico, un modelo de elección de ruta es determinado o computado mientras el mecanismo de carga de la red opera. (Prato, 2009, p.66)

Los métodos base de esta etapa son los determinísticos y los estocásticos, cuya principal diferencia se centra en que los estocásticos incorporan la variabilidad en percepción del menor costo de viaje que poseen las personas. A continuación se presenta una breve descripción de algunos de los métodos.

2.2.1.4.1. *Todo o Nada o El camino más corto (Determinístico)*

Se asume que todos escogerán aquella ruta con el menor costo generalizado de viaje; sin embargo, todos los usuarios poseen el mismo grado de conocimiento de la red, por lo que todos elegirán como primera elección la misma ruta. Esta suposición implica definitivamente una gran simplificación del comportamiento real de las personas. Si bien los resultados podrán obtenerse más rápido, sus falencias opacan su ventaja. Dial (1971) menciona dos principales, en primer lugar no considera la restricción que confiere la capacidad de cada vía y en segundo lugar, es un método muy irreal que omite la selección de ruta como una variable aleatoria entre las personas.

2.2.1.4.2. *Equilibrio de Wardrop*

Este modelo se encuentra bajo la categoría de determinista; sin embargo, incorpora dentro de sus principios, la restricción generada por la capacidad de las vías. Por lo tanto, las personas cambiarán de ruta a medida que sobrepasan la capacidad de la elegida inicialmente.

Cuando esta situación ocurre, se está viendo afectado el costo generalizado de la ruta. En un principio, la ruta preferida será la de menor impedancia o menor costo en unidades de tiempo o unidades monetarias. En base a esta dinámica, se determina la condición de equilibrio, según los dos principios enunciados por Wardrop (1952):

- **Primer Principio:** Cada conductor se encuentra en aquella ruta que significa su menor costo, por ende, el tiempo de viaje en todas las rutas es el mínimo de modo que a su vez sea el mismo para todos.
- **Segundo Principio:** El costo general promedio en la red de transporte es el mínimo, es decir, el equilibrio ocurrirá cuando la suma de los tiempos empleados por los vehículos en las distintas rutas sea el menor. Por lo tanto, no todas las rutas tendrán el mismo tiempo de viaje.

Ejemplo:

Tabla 17. Ejemplo Principios de Wardrop.

PRIMER PRINCIPIO	SEGUNDO PRINCIPIO
<p> $T_a = 12 + 0.005V_a$ Ruta 1 Ruta 2 $T_b = 18 + 0.004V_b$ $V=3000\text{veh}$ </p>	<p> $T_a = 12 + 0.005V_a$ Ruta 1 Ruta 2 $T_b = 18 + 0.004V_b$ $V=3000\text{veh}$ </p>
$T_a = T_b \wedge V_a + V_b = 3000 \Rightarrow V_a = 2000 \wedge V_b = 1000, T_a = T_b = 22$ minutos	$V_a * T_a + V_b * T_b = \text{MÍN} \wedge V_a + V_b = 3000 \Rightarrow V_a = 1500 \wedge V_b = 1500, T_a = 19.5 \wedge T_b = 24$ minutos
Costo generalizado = $3000 * 22 = 66000\text{veh-min}$	Costo generalizado = $1500 * 19.5 + 1500 * 24 = 65250\text{-min}$ (menor en 750 veh-min)

Fuente: Adaptado de Ortúzar (1990)

2.2.1.4.3. Modelo Estocástico.

Un modelo estocástico incorpora la percepción de las personas frente a la acción de realizar un viaje y convierte al tiempo de viaje en una variable aleatoria distribuida en el grupo de estudio (Sheffi & Powell, 1981). La diferencia de apreciaciones por parte de los viajeros, implica que entre dos puntos de origen y destino no existe una única posibilidad de ruta, sino varias alternativas.

Uno de los primeros modelos es el de Asignación en trayectos múltiples (*Multipath Assignment*). Este modelo presentado por Dial (1971), considera cinco especificaciones prácticas. Primero, que las múltiples posibilidades de rutas deben tener una probabilidad distinta de cero de ser elegidas, es decir, alternativas razonables. Segundo, que rutas iguales tendrán una misma posibilidad de ser elegidas. Tercero, a mayor longitud de ruta se alejará de ser una de las rutas preferidas por las personas. Cuarto, las curvas de desviación pueden ser

controladas por el ingeniero modelando. Por último, no se enumeran las rutas posibles, ya que complicaría el trabajo de procesamiento.

Se presenta un ejemplo de las rutas consideradas para la asignación de tráfico en la ciudad de Lima, correspondiente al estudio del Equipo JICA:

En la Tabla 18 se observan las rutas de sistema de transporte privado existentes en el área de estudio que fueron consideradas para el modelo de JICA en Lima Metropolitana y Callao. En la Tabla 19 se observa las posibilidades de nuevas rutas de transporte público, con las que se pueden construir distintos escenarios para comparar su impacto a futuro. En la Figura 12 se muestra el modelo de uno de los escenarios planteados en la Figura 8.

Tabla 18. Rutas de transporte privado consideradas.

Rubro	Ubicación
1	Túnel Santa Rosa (Intersección Tacna/ Alcázar en el Rímac)
2	Construcción del túnel Rimac / San Martin
3	Construcción del túnel San Francisco (Unirá La Molina y Surco)
4	Línea amarilla
5	Construcción de Av. La Costa Verde Ámbito Callao
6	Construcción de Av. La Costanera
7	Construcción de la ampliación de Av. Paseo de la República Sur
8	Construcción de la Vía Periférica
9	Construcción de la ampliación de la Autopista Ramiro Prialé

Fuente: JICA (2013).

Tabla 19. Posibles escenarios de rutas que se consideraron en la simulación.

Caso	Red	Año
1	Red Vial Actual + Red Publica Actual	2012
2	Red Vial Futura + Red Publica Actual	2020, 2030
3	Red Pública Futura (Líneas 1,2,4 + BRT)	2020, 2030
4	Red Pública Futura (Líneas 1,2,3,4,5 + BRT)	2020, 2030
5	Red Pública Futura (Líneas 1,2,3,4,5 + Monorriel A)	2030
6	Red Pública Futura (Líneas 1,2,3,4,5 + Monorriel B)	2030
7	Red Pública Futura (Líneas 1,2,3,4,5 + Monorriel C)	2030

Fuente: JICA (2013).

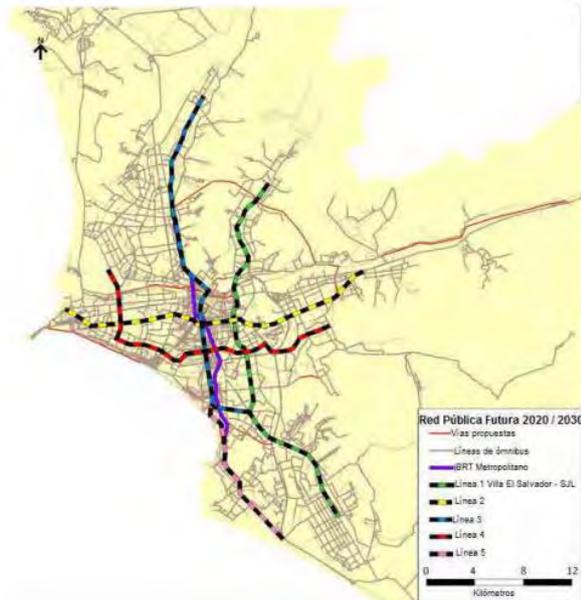


Figura 8. Caso 4 de posible escenario futuro. Fuente: JICA (2013).

2.3. Nuevo Enfoque en el diseño de infraestructura de transporte

Como se mencionó anteriormente, los modelos bajo el enfoque clásico se caracterizan en su mayoría por ser agregados y de planificación urbana a gran escala. Estos dictaminan como valores principales en la dinámica del transporte el tiempo de viaje y el costo monetario involucrado. Sus directrices de diseño son básicamente económicas, en que el viaje de los usuarios y las actividades económicas se confunden, generándose mutuamente entre sí. La inserción de nuevos centros de actividades económicas, producen nuevos viajes a dicha zona, lo cual equivale a mayor demanda de usuarios en las vías e inversión en infraestructura. Estas vías alcanzan una saturación más crítica y en menor periodo de tiempo cuando se trata de una ciudad centralizada, es decir, actividades y servicios concentrados principalmente en las capitales o focos específicos.

El nuevo enfoque de diseño de infraestructura de transporte, consiste en regresar al usuario su papel protagonista en la ciudad. Movilidad sostenible es la actual denominación que lleva este enfoque y que se viene implementando cada vez con mayor fuerza en ciertos países, principalmente, del continente europeo como en ciudades de Londres, Madrid, Copenhague y a nivel de Sudamérica en Curitiba y Bogotá.

2.3.1. La Movilidad Sostenible

Existe más de una acepción de movilidad sostenible, dependiendo del punto de vista en que se vea. Por ejemplo, en sus primeros años Alfonso Sanz (1997) indicó que la movilidad sostenible es aquella que provee medios de transporte capaces de reducir el perjuicio ambiental - social, y del lado de la accesibilidad, aquella que permite llegar al destino recorriendo menores distancias y por tanto requiriendo menos modos de transporte, lo cual reduce la dependencia de los modos motorizados.

Más recientemente, Barnisen (2008, p.73) sostiene que la movilidad sostenible “proporciona un paradigma alternativo para investigar la complejidad de las ciudades, y para fortalecer los vínculos entre el uso del suelo y el transporte”, y que la ciudad debe ser un lugar bueno para habitar, policéntrica que otorgue a los usuarios accesibilidad a medios de transporte público y a sus destinos.

En la presente tesis, se prefiere tomar como idea eje el bienestar del usuario, en su contexto diario: la ciudad. El bienestar significa una movilización más agradable, donde es posible la interacción con el entorno y equidad de facilidad de acceso a servicios privados y públicos. El bienestar también se desprende de habitar en un medio ambiente sano y sostenible, lo cual debe ser respaldado en los medios de transporte, ya que es una de las actividades básicas del ser humano.

2.3.2. Problemas identificados del modelo clásico

La necesidad de un nuevo enfoque de planificación de transporte es identificada cuando las deficiencias del modelo clásico se reflejan en el tránsito diario. Los principales problemas que han alcanzado el nivel de crisis o problemática social son la **congestión**, generada por la demanda de vehículos que exceden la capacidad de las vías en horas pico que actualmente ocupan gran parte del día y no solo fracciones de este. El **tráfico**, que ocurre como consecuencia de la congestión, se observa en las largas colas de vehículos parados y que aumentan el tiempo de viaje. La **informalidad** por su parte, contribuye a acrecentar el número de vehículos circulando por la ciudad sin una adecuada regulación; estos a su vez, aun siendo líneas formales, realizan paradas en paraderos no autorizados, ya que los existentes son insuficientes o han sido mal ubicados; además, se practica la llamada “guerra del centavo”, en que los conductores compiten por captar más pasajeros sobrepasando ampliamente la capacidad de aforo del vehículo, lo cual causa malestar e incomodidad a los usuarios. Por último, el **transporte privado o público de baja capacidad**, aumentan la congestión debido a que saturan rápidamente las vías por el espacio físico que los vehículos ocupan sin transportar la cantidad óptima de pasajeros.



Figura 9. Congestión de vehículos motorizados en Hanoi.
Fuente: Minh (2016).

En la imagen se observa el caos vehicular que atraviesa Hanoi, capital de Vietnam, donde los vehículos motorizados han excedido la capacidad de las vías, entre estos, principalmente motocicletas.

Tabla 20. Resumen de los indicadores de infraestructura vial en Lima

Indicador	Valor
Km de vía	12161
Intersecciones con semáforos	996
Vías con prioridad para peatones	1.7 km
Vías con prioridad para ciclistas	59 km
Vías con prioridad para transporte público	34 km

En esta tabla resumen del año 2009, se puede observar que el transporte de peatones, ciclistas y transporte público no tienen mayor preferencia en la ciudad de Lima.

Fuente: Observatorio de Movilidad Urbana 2009, citado por CAF (2010)

2.3.3. Principios de la movilidad sostenible

El diseño de una **Ciudad policéntrica**, busca eliminar el problema de la centralización, por medio de varios centros que cuenten con los servicios fundamentales para la sociedad (hospitales, escuelas, bancos, etc.), de manera que no exista un único centro que atraiga gran cantidad de viajes y genere congestión vehicular. Dentro de cada uno de estos centros, para lograr reducir la necesidad de viajes motorizados de largas distancias, los servicios se encuentren cercanos, dentro de un diseño de una **Ciudad Compacta**. Así, los viajes serán más cortos y aumenta la factibilidad de otros modos de transporte. En este centro urbano compacto, si los usuarios no encontraran la mayoría de los servicios a los que necesita movilizarse, los diseños mencionados no serían efectivos en contribuir a la movilidad sostenible.

Es necesario además, que se otorgue una buena gama de servicios, es decir, constituir una *Ciudad Diversa* (Dextre & Avellaneda, 2014).



Figura 10. Conceptos de policentrismo, compactidad y diversidad.
Fuente: Elaboración propia. Imágenes: Freepik.

2.3.4. Directrices para el diseño de infraestructura de transporte

Para lograr la implementación de la movilidad sostenible las medidas de acción deberán otorgar facilidades de modo que la población encuentre atractivo el uso de los modos de transporte sostenible. Algunos cambios son graduales y se pueden aplicar rápidamente, por ejemplo, la creación de paraderos y estacionamientos de bicicletas o de calles peatonales. Por otra parte, los cambios importantes son alcanzables a mediano y largo plazo, ya que deben ser implementados desde la etapa de planificación de la ciudad y el transporte, por ejemplo, la creación de ciudades policéntricas y la generación de espacios compactos.

Todas estas medidas, deben agruparse por objetivos claros, y constituir las directrices sobre las que se construye un plan de movilidad.

Tabla 21. Acciones a tomar para alcanzar una infraestructura bajo el concepto de movilidad sostenible.

Reducir la necesidad de viaje	Medidas políticas de transporte	Medidas políticas del uso del suelo	Innovación Tecnológica
SUSTITUCIÓN	CAMBIO MODAL	REDUCCIÓN DE DISTANCIA	AUMENTO DE LA EFICIENCIA
Deriva del principio de ciudad policéntrica. Cuando los usuarios encuentren más servicios cercanos a su zona, no tendrán que verse obligados a realizar viajes largos. Por otra parte, el autor incluye el apoyo de la tecnología para reducir la necesidad de ciertos viajes como son pagos o compras <i>online</i> , lo que se llama como sustitución.	Se deben establecer medidas que favorezcan el uso de los medios de transporte público, como son vías de prioridad y ampliar la disponibilidad del servicio. Promover el uso de otros modos de transporte como son la bicicleta y la caminata. Control del peaje y estacionamiento. Todas estas medidas en busca de disminuir el tráfico y la congestión, causados por el transporte privado.	El paso a la movilidad sostenible no podría lograrse si no se provee de la infraestructura y orden urbano que lo permita. Vías que promuevan el uso de modos de transporte sustentables, control de la localización de las edificaciones de viviendas, políticas como el día libre de automóviles, entre otros.	Esta medida refiere a aprovechar las herramientas tecnológicas que poseemos para generar modos de transporte más sustentables, sean vehículos privados o públicos, con un menor consumo de energía como menor emisión de contaminantes. Se da importancia a combinar el compromiso del usuario con las ofertas brindadas en la ciudad por el Estado y las empresas privadas.

Fuente: Adaptado de Banister (2008).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Es necesario cambiar la perspectiva en las directrices que guían el diseño y la planificación del transporte. La respuesta consiste en relegar el diseño de la ciudad en base al vehículo ya que como sostuvo Jan Gehl (2013) “la conquista de automóviles en la ciudad diverge de los prerrequisitos de un diseño para el peatón”, y adoptar un diseño físico que permita la interacción y el uso del espacio público, la ciudad, bajo un enfoque de movilidad sostenible, que devuelve importancia al trayecto que involucra el desplazamiento de personas y carga, capaz de ser realizado a través de distintos modos de transporte como la caminata y la bicicleta que son beneficiosos para el cuidado y disfrute del medio ambiente .

Frente a este panorama, la metodología del presente proyecto de investigación se enmarca en el sucesivo proceso:

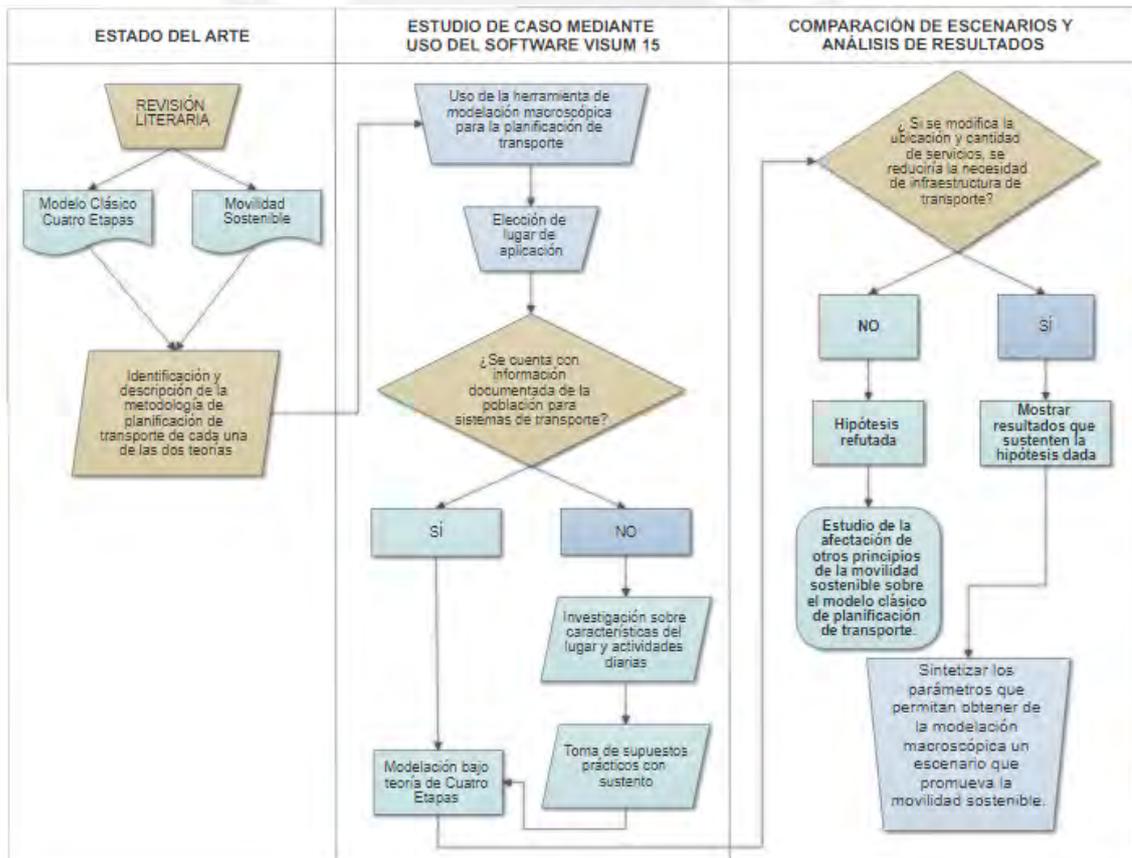


Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Elaboración propia.

3.1. Revisión literaria

En el estado del arte, se describe primero la teoría del Modelo de Cuatro Etapas, detallando cada una de las fases que conllevan al diseño de un sistema de transporte bajo este enfoque. Luego, se presentan los principios y bases del Modelo de Movilidad Sostenible, resaltando los problemas existentes en el transporte que han llevado al cuestionamiento del modelo clásico y la búsqueda de un diseño que provea mayor satisfacción a los usuarios, toda la ciudad aledaña.

3.2. Estudio de caso: Uso del software VISUM 15.

Para la aplicación de teorías o modelos que proveen soluciones a problemáticas que involucran a ciudades, es importante el análisis previo de los resultados que se obtendría de la aplicación de dichas soluciones, antes de su instauración física.

En este fin, los modelos de simulación son de gran importancia, ya que permiten comparar distintos escenarios muy cercanos a la realidad, dependiendo del nivel de calibración y la información de entrada que se ingresa que permitan caracterizar bien la ciudad y las características de la misma.

Para el presente proyecto de investigación, se empleará el software VISUM 15 de planificación de transporte y que permite modelar un sistema macroscópico de transporte bajo la teoría del Modelo de Cuatro Etapas.

3.2.1. Software de Planificación: VISUM15

VISUM es un software de planificación de transporte basado en el Modelo de cuatro etapas. Este permite ingresar información de tráfico, distribuir la demanda de viajes, repartir dicha demanda a través de distintos modos de transporte, y asignar el flujo en una red de transporte. La diferencia entre los distintos software de transporte que existen, se encuentra en el nivel de detalle. Como se mencionó a lo largo del estado del arte, la planificación del transporte y diseño de infraestructura de transporte responde a un nivel de detalle macroscópico, puesto que es una tarea realizada a nivel metropolitano, regional, estatal y nacional (PTV Vision,2009).

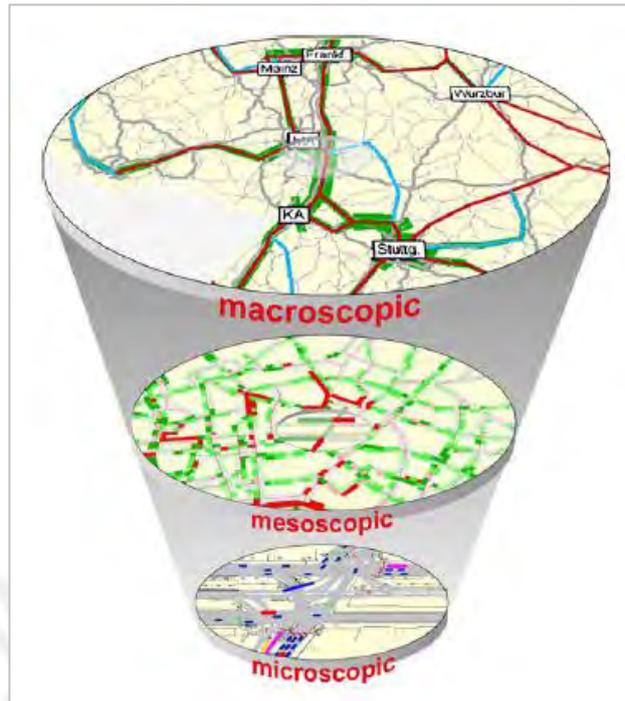


Figura 112. Nivel de detalle de los software de transporte. Fuente: PTV América (n.d.)

3.2.1.1 Antecedentes de VISUM15

El primer antecedente de este software aparece alrededor del año 1986, cuando se realizó la modelación de una autopista. Más adelante, en el año 1995, pasaron del lenguaje de programación Pascal a C y del sistema operativo DOS a Windows. Un año después, el software VISUM como tal, sale al mercado con el nombre VISUM 6.0 que permitía la modelación de redes multimodales. La versión VISUM 7.5 incorporó la funcionalidad del software VISSIM, software de simulación microscópica del tráfico, por tanto el alcance del software aumentaba. A partir del año 2004, en la versión VISUM 9.2, se logra una fuerte asociación con ESRI que permitió integrar la plataforma de información geográfica de ArcGIS™ sobre la red de simulación de transporte de VISUM (PTV America, n.d.). Actualmente se cuenta con la versión VISUM 16, pero en el presente proyecto se utilizará la versión VISUM15.

3.2.1.2. Características del software

Tabla 22. Principales características del software VISUM 15.0

Interfaz	Lista de menús y comandos en formato del sistema operativo Windows.
Redes de transporte	<p>La creación de una red de transporte implica la creación de varios subniveles de modelación: los nudos y conexiones de la red, las zonas del área de análisis, los centroides, las rutas del transporte público, los puntos de parada del transporte público, movimientos en las intersecciones y otros objetos definidos por el usuario.</p> <p>Además, la red se crea para un flujo multimodal, por lo cual deben definirse los modos de transporte privado y público que existirán en el modelo.</p>
Integración del sistema de información GIS	El sistema de información geográfica y mapeamiento provisto por el software ArcGis constituye una poderosa herramienta que puede utilizarse para el trazo de la red y/o fondo de la misma (PTV Vision,2009). Otorga mayor precisión al modelo desde que las rutas son constantemente actualizadas y la forma y dimensiones de las rutas serán las reales.
Script based use	VISUM provee una interfaz de programación en los lenguajes C, C++, VB, VBS, lo que da la posibilidad al usuario de insertar su propio código, no solo de aplicaciones del VISUM, sino también de los otros softwares integrados como el ArcGIS.
Asignación	<p>La asignación del tráfico a través de la red vial sigue los diversos principios de equilibrio vistos en el modelo de cuatro etapas, como es el método determinístico, el equilibrio de Wardrop, métodos estocástico y hasta métodos dinámicos.</p> <p>El software es muy flexible en la asignación del transporte público. Permite crear flujos variables en el día, por hora, por programación y progreso del tráfico.</p>
Análisis Post-asignación	Luego de haber asignado la cantidad de viajes de la zona en las distintas rutas, permite obtener variados análisis como el volumen de tráfico a través de gráficos estadísticos .
Integración con el estudio de tráfico	VISUM15 permite a sus clientes realizar un modelo con mayor detalle a nivel de las intersecciones. Para ello, incorpora la simulación microscópica de VISSIM. La información a ingresar puede ser la determinada con los resultados de VISUM, o puede emplearse para mejores resultados visuales.

Fuente: Adaptado de VISUM – State-of-the-Art Travel Demand Modeling (PTV Vision, 2009) y VISUM Overview (PTV America, n.d.).

Una etapa crítica en la creación de todo modelo que represente la realidad, es la toma de datos y el ingreso de la información al software en cuestión. Debido a la limitación de tiempo y la gran complejidad que implica el muestreo de la población para un modelo de sistema de transporte a nivel macroscópico, se decidió, en primer lugar, tomar como base un modelo de VISUM 15 trabajado por el grupo PTV - Planungsbüro Transport und Verkehr (Oficina de Planificación de Transporte) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Sin embargo, este modelo, contaba con la geometría base del sistema de transporte de la UNAM, mas no con información de la población de la universidad, es por ello que se realizó un trabajo de investigación y adopción de las características de la población a ingresar en el modelo.

3.2.2. Investigación de la información de la población a ingresar en el modelo

Como el primer modelo a crear, del cual se contaba con la geometría, debía representar el actual sistema de transporte de la UNAM, la información necesaria a ingresar en el software VSUM 15 era la siguiente:

- Servicios existentes: cantidad, ubicación y demanda por parte de la población.
- Actividades: relacionadas directamente a los servicios ofrecidos por la universidad. Se define en el software, las principales causas de los viajes realizados. La principal clasificación son los viajes Home-Based (basados en el hogar) y viajes Non Home-Based (que no implican el paso por el hogar en la ruta de viaje). Como el modelo representará la dinámica interna a la UNAM, se definió todos los viajes como Non Home-Based.
- A partir del estudio de las actividades y servicios del lugar, se crea en el software la Matriz de Distribución de Viajes, la cual muestra la cantidad de personas que se dirigen hacia o regresan de cada uno de los puntos de destino de la red de transporte modelada.
- Modos de Transporte: sistemas de transporte público/privado que transitan dentro de la UNAM.
- Rutas: trayectos que siguen los sistemas de transporte existentes en la UNAM.
- Características geométricas de la infraestructura de transporte: como son ancho de carril, número de líneas por carril y velocidades máximas.

En el capítulo siguiente, se muestra la información encontrada acerca de la UNAM, relacionada a cada uno de estos inputs para la modelación a través del software VISUM 15, y también se detalla aquella información que debió ser supuesta debido a la dificultad para conseguirla.

3.3. Comparación y Análisis de resultados

Terminado el modelo base de la UNAM bajo el enfoque de la teoría de Cuatro Etapas, se procedió a crear un nuevo escenario del mismo lugar, modificando la ubicación de los servicios y la cantidad de ellos, lo cual es conocido como Uso del Suelo, bajo el enfoque de Movilidad Sostenible.

A partir de estos cambios, se encontró una nueva distribución, partición y asignación de viajes en la red de transporte. La ubicación de estos servicios busca, de forma muy simplificada, determinar nuevos posibles patrones de desplazamiento que sean sostenibles en la ciudad, es decir, requieran menor uso de modos motorizados y por ende se contribuya con el cuidado de la ciudad como espacio público

La Figura 13 muestra criterios de modelación que promueven la Movilidad Sostenible, los cuales han servido de base para la creación del segundo escenario de la UNAM.



Figura 12. Metodología de un Plan de Movilidad. Fuente: Elaboración propia (Imagen: Freepik).

3.3.1. Comparación de escenarios

Para comparar el escenario base frente al escenario modificado, se analizaron los principales resultados obtenidos del modelo en el software VISUM 15, como son la cantidad de viajes realizados por modo de transporte, los tiempos de viaje, distancias de recorrido y número de intercambio entre modos de transporte. Los cuales son algunas de las características que permiten clasificar la eficiencia del sistema de transporte.

3.3.2. Sugerencia de nuevos parámetros

Finalmente, a partir del análisis de ambas alternativas de diseño, se sintetizaron los aspectos o parámetros que podrían ser considerados como puntos de partida para mejorar los métodos actuales de modelación. En lugar de partir con el presupuesto de la necesidad de crear infraestructura de transporte, que se prepondere el estudio del uso del suelo y nuevas soluciones que permitan la creación de ciudades con menor congestión de medios motorizados y con espacios públicos donde la interacción social sea posible y saludable.



CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE CASO: ESCENARIO BASE

4.1. Descripción del lugar de estudio

La red de transporte a analizar, corresponde al del campus de la Universidad Nacional Autónoma de México, el cual se diseñó bajo el Modelo Clásico o de Cuatro Etapas. El área abarcada por el proyecto es de aproximadamente 730 hectáreas, dentro de las cuales, alrededor del 30% corresponde a la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, s.f.).

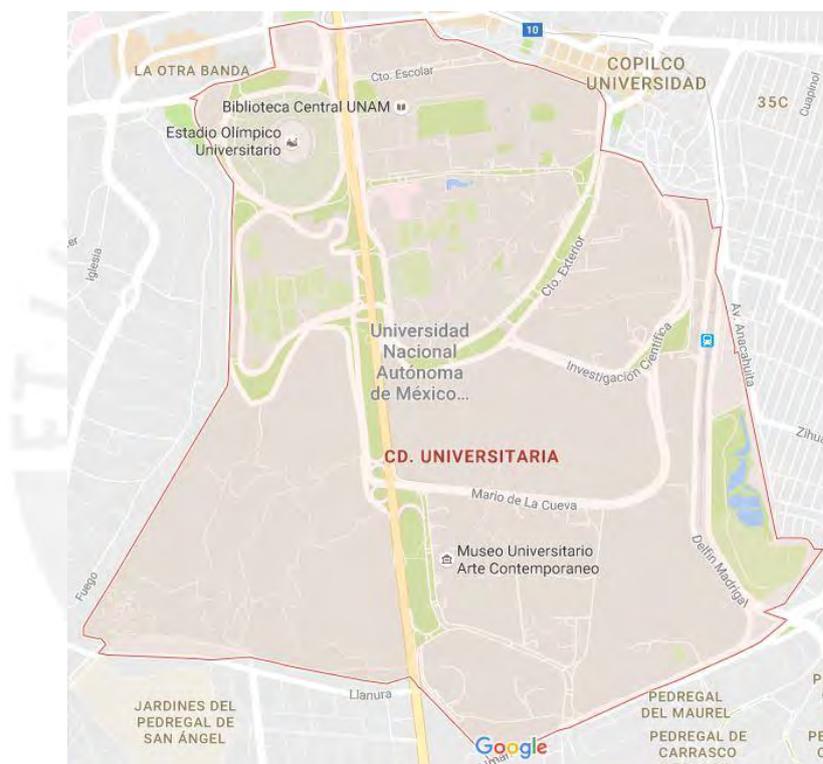


Figura 13. Mapa de la Ciudad Universitaria de UNAM. Fuente: Google Maps. (2016)

4.2. Sobre la población

La población estudiantil entre los años 2015 y 2016 fue de 137353, la población de docentes de 27611 y la población estudiantil con las modalidades de Sistema Universidad Abierta y Educación a Distancia es de 204940 (UNAM). Según la Agenda Estadística UNAM 2016, entre las carreras más demandadas por la población estudiantil, se encuentran las especialidades de Derecho, Psicología, Contaduría y Administración, Arquitectura, Economía y Odontología. Varias de éstas se encuentran ubicadas con relativa proximidad en una misma periferia, la cual se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Sector más poblado de la UNAM. Fuente: Google Maps (2016) y Mapas UNAM (2016)

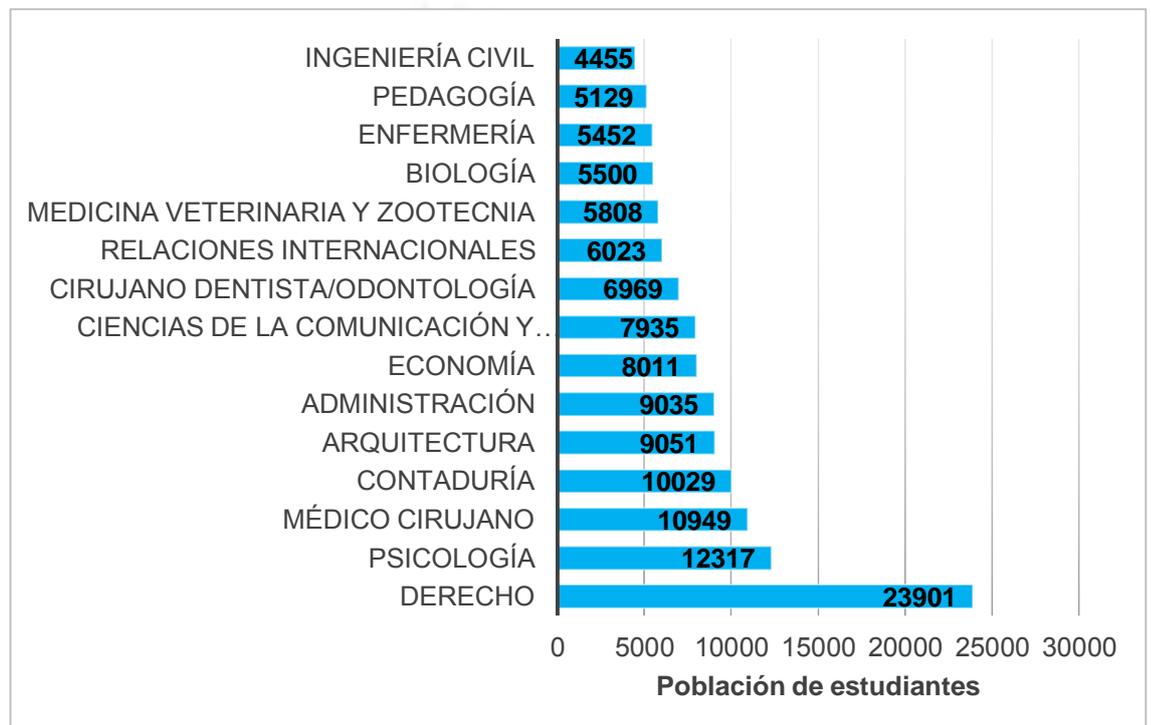


Figura 15. Carreras con mayor población estudiantil. Fuente: Adaptado de Agenda Estadística UNAM (2016)

4.3. Antecedentes de movilidad

La Universidad Autónoma de México no posee actualmente un plan de movilidad, por lo que se puede concluir que para la fecha en que se realizó el modelo en VISUM tampoco se contaba con uno. Sin embargo, al estar ubicada dentro de una de las ciudades con mayor población y consecuentes problemas de transporte, la UNAM adquirió la misma problemática. Ello condujo a adoptar medidas mitigadoras como son el incremento del transporte público y la promoción de la interacción social y con su medio ambiente que permiten observar un campus predispuesto y consciente del concepto de movilidad sostenible.

En el presente proyecto de investigación, se tomarán las acciones ya iniciadas por la UNAM, las cuales ayudarán a complementar un ejemplo aplicativo de planificación de infraestructura de transporte bajo los estándares de movilidad sostenible.

4.4. Infraestructura y modos de transporte

4.4.1. Modos motorizados.

- PumaBús: la UNAM cuenta con un servicio gratuito de buses con una flota de más de 60 camiones que circulan a través de sus doce rutas. Estos buses, circulan a través de carriles exclusivos. De estas doce rutas, las primeras cinco parten de la estación “Universidad” de la línea de metro de la ciudad de México, las rutas 9, 10, 11 y 12 inician su recorrido en la estación “Ciudad Universitaria” de la línea de BRT Metrobús. Las rutas 6, 7 y 8, parten de la estación 1 del Estadio Olímpico de la universidad. De esta forma, se beneficia el intercambio entre modos de transporte públicos externos e internos de la universidad.

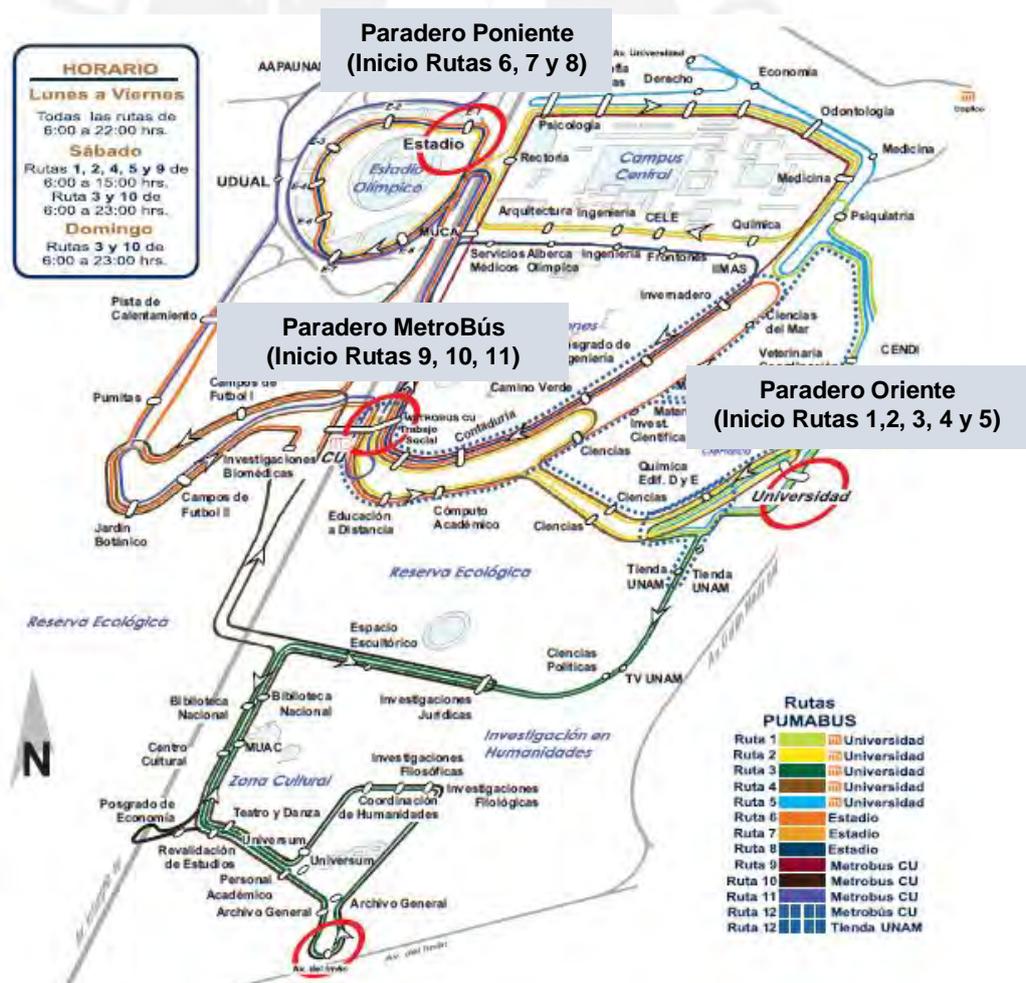


Figura 16. Mapa de rutas de la línea PumaBús. Fuente: Mapas UNAM (2016)

Como se mencionó anteriormente, la universidad es atravesada por dos modos de transporte masivo importantes. La línea 1 del servicio MetroBús, modo de transporte BRT, que recorre por la avenida Insurgentes Sur por medio de un carril exclusivo central y cuyas estaciones Ciudad Universitaria y Centro Cultural universitario se ubican dentro de la UNAM. Por otro lado, La Línea 3 del Metro de Ciudad de México, realiza su recorrido por el medio de la avenida Delfín Madrigal y cuya estación de partida se encuentra frente a una de las puertas de ingreso a la UNAM, por lo que es llamada “Universidad”. En esta misma estación, pero dentro de la UNAM, se permite la interconexión con líneas del PumaBús, así como también, se encuentra la estación principal de bicicletas “Bicicentro”.



Figura 17. Estaciones Universidad y Ciudad Universitaria dentro de la UNAM. Fuente: Google Maps (2016)

- **Buses entre distintas sedes de la UNAM:** servicio gratuito para conectar estudiantes de Ciudad Universitaria con otros campus de la UNAM.
- **Buses desde estaciones de metro a la UNAM:** la red de transporte, no se queda en el perímetro del campus principal, sino además ofrece la oportunidad de tomar buses que recogen a los estudiantes en diferentes estaciones del metro de la ciudad, y asimismo,

llevarlos de vuelta del campus hacia las estaciones de metro correspondientes. Existen horarios determinados de salida, de modo a mantener un orden con los usuarios y brindar un servicio de seguridad ante todo.

4.4.2. Modos no motorizados.

- **Bicipuma:** Actualmente existe una red de ciclovía que cuenta con alrededor de 6000 metros y doce estaciones ubicados en: Anexo de Ingeniería, Arquitectura, Bicicentro, Ciencias, Ciencias Políticas, Derecho, Estadio Olímpico, Estadio Tapatio Méndez, Filosofía y Letras, Ingeniería, Medicina y Química. Este servicio es gratuito y fue implementado en el año 2005.

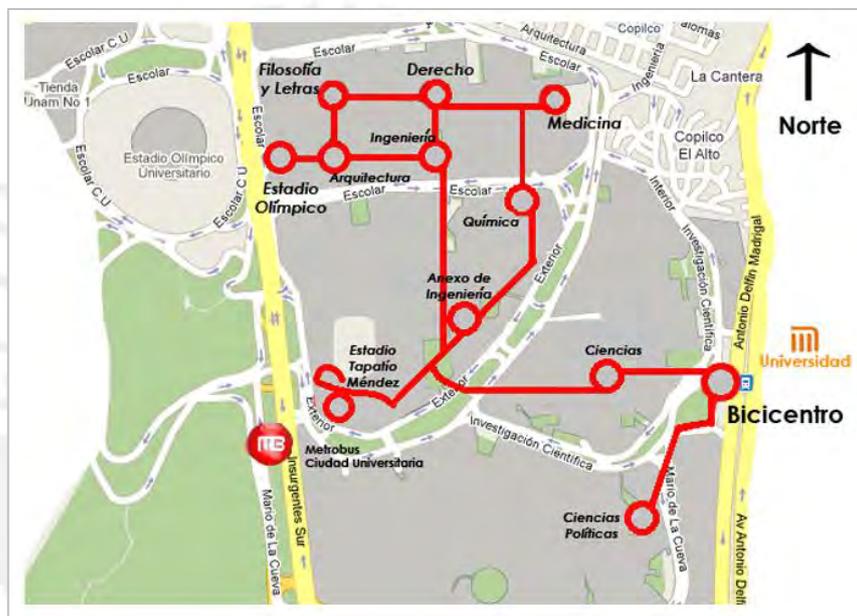


Figura 18. Red de ciclovías UNAM. Fuente: Transporte Bicipuma UNAM (2016)

La estación principal, “Bicicentro” se ubica cerca a la estación de metro Universidad, como se aprecia en el mapa. Este sistema de transporte, atiende alrededor de 4000 personas por día, de los cuales el 90% se trata de estudiantes (Hernández).



Figura 19. Estación de bicicletas y red de ciclovías en UNAM. Fuente: Transporte Bicipuma UNAM (2016)

4.5. Modelo Base

Se detalla a continuación las características del modelo en VISUM obtenido de la Ciudad Universitaria de la UNAM, de acuerdo a cada una de las cuatro etapas del Modelo Clásico.

4.5.1. Generación de Viajes.

Se consideró prácticamente a cada edificio como una zona, es decir, centro de origen y destino de viajes. Esta elección de zonas es posible dependiendo de la dimensión o envergadura de la red de transporte. Así, se obtuvieron 63 zonas, las que no contemplan en su totalidad todos los edificios de la universidad, por tanto, hay varios lugares omitidos en el modelo actual. Las zonas están constituidas por edificios académicos como pabellones de cada facultad, áreas de investigación, laboratorios, centros de esparcimiento y culturales como teatros, museos, canchas deportivas, estadios y oficinas administrativas principalmente.

Se adoptó como población del modelo, el valor de 160000 estudiantes, como un valor intermedio entre dos valores obtenidos: la población de estudiantes de bachillerato en conjunto con los estudiantes del Sistema Universidad Abierta y Educación a Distancia entre los años 2015 y 2016 que fue de 204940 (como se sabe, el Sistema Universidad Abierta y Educación a Distancia no se han considerado en el modelo), y la población estudiantil de la Ciudad Universitaria de UNAM entre 2015 y 2016 que fue de 137353; pero cuya cantidad proviene de un menor número de zonas en comparación al presente modelo.

En el software, se estableció como periodo de análisis un día completo de 24 horas, debido a que se ingresó un valor de población total que podría movilizarse a lo largo del día en la ciudad universitaria. Por otra parte, la población total de estudiantes fue dividida en los siguientes grupos o estratos: estudiantes sin ningún modo de transporte privado, estudiantes con solo bicicleta, estudiantes con solo automóvil y estudiantes con bicicleta y automóvil.

Tabla 23. Grupos de personas creados para el modelo base.

Grupos de personas *Estudiantes	Porcentaje de la Población Total
Con automóvil y bicicleta	10%
Sin transporte propio	40%
Con solo bicicleta	25%
Con solo automóvil	25%

Fuente: Elaboración propia.

*Población del tipo *Non Home Based*: viajes cuyo origen y destino no incluyen el hogar en su ruta.

4.5.2. Distribución.

Tal como se detalló en la segunda etapa del modelo clásico, para organizar la cantidad de viajes que se realizan entre las 63 zonas se elaboró una matriz de demanda $[T_{ij}]$ de tamaño 63×63 , por la cantidad de zonas existentes en el modelo base. Esta matriz se muestra en el Anexo II.

En la siguiente Tabla 22 se muestra el resumen de viajes de Producción y Atracción en todas las zonas del modelo base.

Tabla 24. Total de viajes de producción y atracción para cada zona de modelo base.

	ZONA	Producción - Atracción	
		Oi	Di
1	Metro CU	58940	3258
2	METRO BUS CU	25549	2435
3	TRABAJO SOCIAL	1140	1399
4	FACULTAD DE CONTADURIA	2000	5329
5	ANEXO INGENIERIA	200	1021
6	INSTITUTO DE INGENIERIA	320	5450
7	EDIFICIO DE POS GRADOS	430	4776
8	FACULTAD DE INGENIERÍA	5570	5928
9	CELE	100	1145
10	FACULTAD DE QUÍMICA	1160	4030
11	FACULTAD DE MEDICINA	1740	3995
12	FACULTAD DE ODONTOLOGÍA	1864	4852
13	BIOMEDICA	681	3102
14	ECONOMÍA	1570	5344
15	FACULTAD DE DERECHO	8420	10166
16	FILOSOFÍA Y LETRAS	3360	6179
17	RECTORÍA	380	782
18	BIBLIOTECA CENTRAL	2840	13628
19	MUCA	1430	4584
20	FACULTAD DE ARQUITECTURA	1190	4488
21	SERVICIOS MÉDICOS	2375	2357
22	ALBERCA OLÍMPICA	645	1359
23	TORRES DE INGENIERÍA	1420	1394
24	IMAS	94	684
25	ESTADIO DE PRÁCTICAS	478	1401
26	EDUCACIÓN A DISTANCIA	351	1469
27	CÓMPUTO ACADÉMICO	192	2056
28	POS GRADOS CONTADURIA	650	3079
29	FACULTAD DE CIENCIAS	2610	5428
30	EDIFICIO TIAHUIZCALPAN	255	1402
31	INSTITUTO DE FÍSICA	230	1123
32	EDIFICIO DE PROGRAMAS UNIVERSITARIOS	640	1330
33	INSTITUTO DE GEOFÍSICA	160	894

34	CENDI	476	776
35	INST. CIENCIAS DEL MAR	98	767
36	INS. FISIOLÓGIA CELULAR	94	770
37	INS. INVESTIGACIÓN EN MATERIALES	112	1011
38	INS. CIENCIAS NUCLEARES UNAM	147	933
39	BIBLIOTECA CIENCIAS DE LA TIERRA	652	6740
40	INST. QUÍMICA	483	1296
41	INST. GEOLOGÍA	395	790
42	INST. GEOGRAFÍA	135	960
43	INSTITUTO DE ECOLOGIA	370	991
44	DIRECCIÓN CCH	245	442
45	HEMEROTECA NACIONAL DE MÉXICO	319	3903
46	MUSEO UNIVERSITARIO DE ARTE CONTEMPORÁNEO	892	3179
47	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES	364	1205
48	TEATRO JUAN RUÍZ	245	3124
49	SALA MIGUEL COVARRUBIAS	224	1539
50	POSGRADOS ECONOMIA	495	1058
51	DIRECCIÓN GENERAL DE INCORPORACIONES	394	714
52	UNIVERSIUM	744	2145
53	PROGRAMA VINCULACIÓN EXALUMNOS	248	811
54	FACULTAD CIENCIAS SOCIALES	2789	5139
55	DEPORTE I	115	381
56	DEPORTE II	132	520
57	DEPORTE III	98	556
58	DEPORTE IV	76	363
59	DEPORTE V	109	466
60	DEPORTE VI	43	498
61	DEPORTE VII	35	513
62	DEPORTE VIII	67	619
63	METRO BUS COPILCO	20420	1924
		160000	160000

Fuente: Elaboración propia.

4.5.3. Partición Modal.

En el modelo se ingresaron cuatro tipos de transporte, clasificados y asignados a la red como transporte privado (PrT) o transporte público (PuT).

Dentro del modo de transporte privado se incluyó solo la opción CAR y para transporte público, las rutas de la línea de buses PUMA BUS y la línea de bicicletas BICI PUMA. Aparte, el software permite ingresar el modo PUTW para los desplazamientos a pie, pero fue creado para asignarse en los trayectos de interconexión modal, es decir, entre paradas.

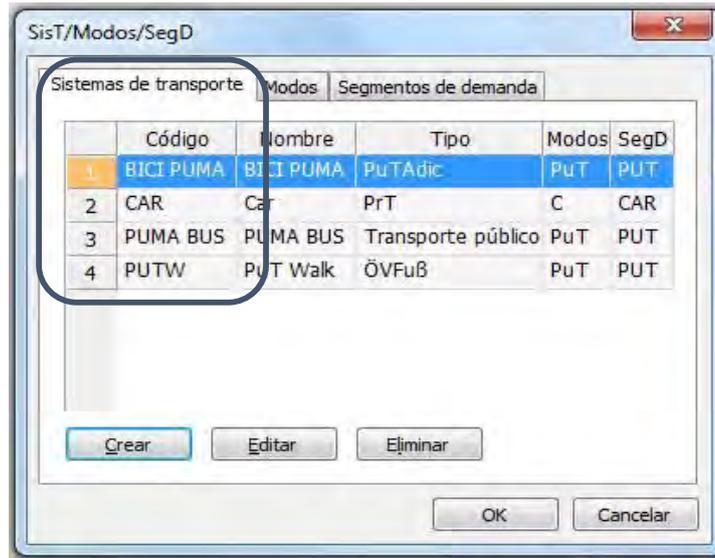


Figura 20. Modos de transporte creados en el modelo VISUM de la UNAM. Fuente: Elaboración propia.

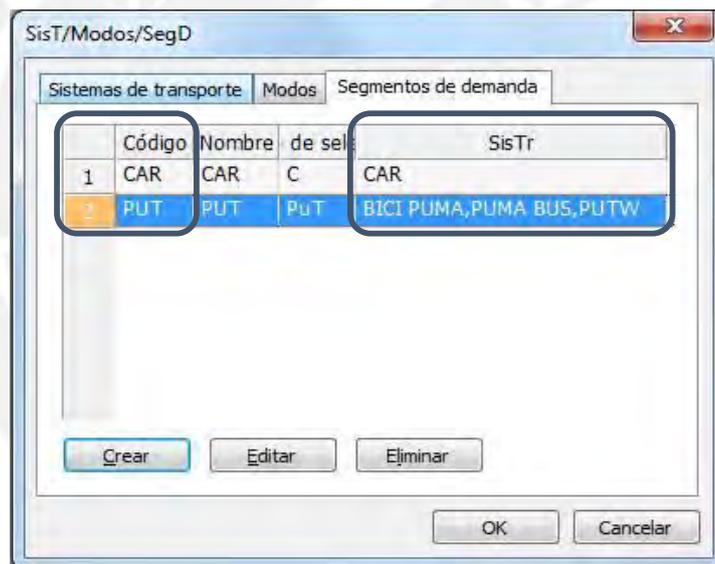


Figura 21. División de los modos de transporte entre los sistemas de transporte privado y público. Fuente: Elaboración propia.

El sistema PumaBús dispone de 12 rutas. Si bien todas fueron creadas en el modelo, solo 9 de ellas poseen recorrido en la red de transporte.

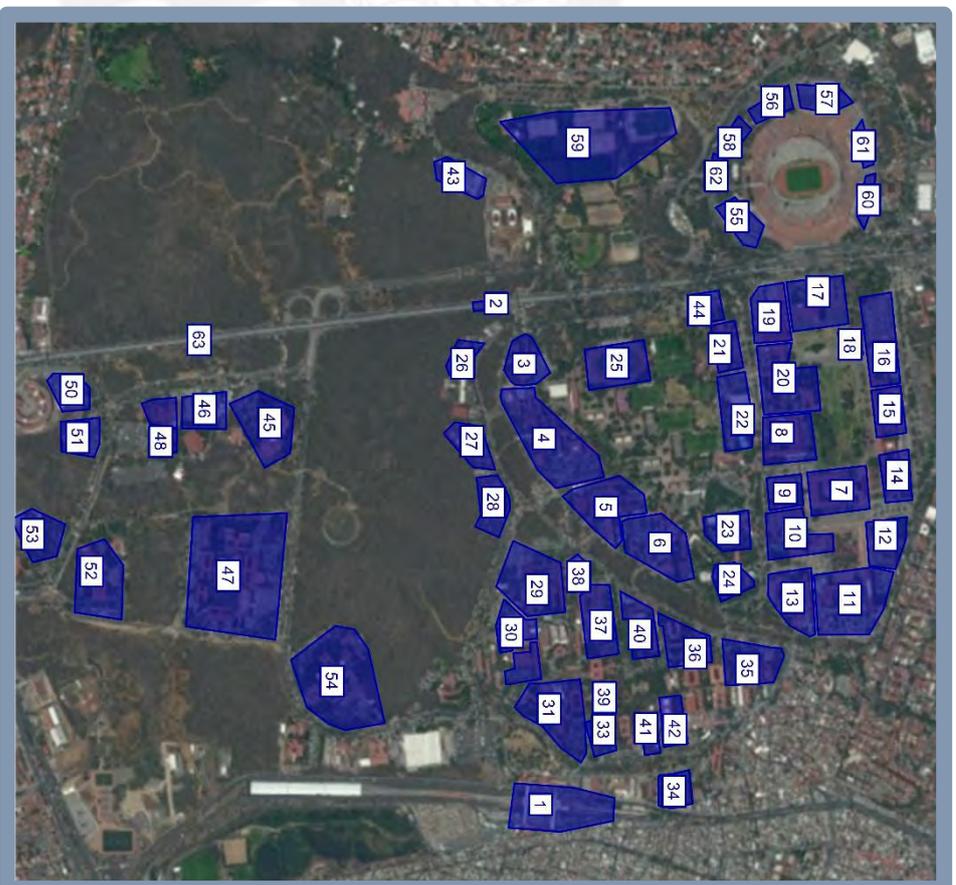
Route course - Display		
Aggregation level	Lines	
Draw	Name	Display
<input checked="" type="checkbox"/>	RUTA 1	
<input type="checkbox"/>	RUTA 10	
<input type="checkbox"/>	RUTA 11	
<input type="checkbox"/>	RUTA 12	
<input type="checkbox"/>	RUTA 12 TIENDA UNAM	
<input type="checkbox"/>	RUTA 2	
<input type="checkbox"/>	RUTA 3	
<input type="checkbox"/>	RUTA 4	
<input type="checkbox"/>	RUTA 5	
<input type="checkbox"/>	RUTA 6	
<input type="checkbox"/>	RUTA 7	
<input type="checkbox"/>	RUTA 8	
<input type="checkbox"/>	RUTA 9	

Figura 22. Rutas de línea creadas en el modelo VISUM de la UNAM con recorrido en la red de transporte. Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Rutas de la línea PumaBús del modelo base. Fuente: Elaboración propia.

1	METRO CU	32	EDIFICIO DE PROGRAMAS UNIVERSITARIOS
2	METRO BUS CU	33	INSTITUTO DE GEOFISICA
3	TRABAJO SOCIAL	34	CENDI
4	FACULTAD DE CONTADURIA	35	INST. CIENCIAS DEL MAR
5	ANEXO INGENIERIA	36	INS. FISIOLOGIA CELULAR
6	INSTITUTO DE INGENIERIA	37	INS. INVESTIGACION EN MATERIALES
7	EDIFICIO DE POS GRADOS	38	INS. CIENCIAS NUCLEARES UNAM
8	FACULTAD DE INGENIERIA	39	BIBLIOTECA CIENCIAS DE LA TIERRA
9	CELE	40	INST. QUIMICA
10	FACULTAD DE QUIMICA	41	INST. GEOLOGIA
11	FACULTAD DE MEDICINA	42	INST. GEOGRAFIA
12	FACULTAD DE ODONTOLOGIA	43	INSTITUTO DE ECOLOGIA
13	BIOMEDICA	44	DIRECCION CCH
14	ECONOMIA	45	HEMEROTECA NACIONAL DE MEXICO
15	FACULTAD DE DERECHO	46	MUSEO UNIVERSITARIO DE ARTE CONTEMPORANEO
16	FILOSOFIA Y LETRAS	47	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
17	RECTORIA	48	TEATRO JUAN RUIZ
18	BIBLIOTECA CENTRAL	49	SALA MIGUEL COVARRUBIAS
19	MUCA	50	POSGRADOS ECONOMIA
20	FACULTAD DE ARQUITECTURA	51	DIRECCION GENERAL DE INCORPORACIONES
21	SERVICIOS MEDICOS	52	UNIVERSIUM
22	ALBERCA OLIMPICA	53	PROGRAMA VINCULACION EXALUMNOS
23	TORRES DE INGENIERIA	54	FACULTAD CIENCIAS SOCIALES
24	IMAS	55	DEPORTE I
25	ESTADIO DE PRACTICAS	56	DEPORTE II
26	EDUCACION A DISTANCIA	57	DEPORTE III
27	COMPUTO ACADÉMICO	58	DEPORTE IV
28	POS GRADOS CONTADURIA	59	DEPORTE V
29	FACULTAD DE CIENCIAS	60	DEPORTE VI
30	EDIFICIO TAHUIZCALPAN	61	DEPORTE VII
31	INSTITUTO DE FISICA	62	DEPORTE VIII
		63	METRO BÚS COPILCO



Zonas de modelo base

Figura 24. Zonificación de modelo base. Fuente: Elaboración propia



	Vías de automóvil y Pumabús
	Vías de Pumabús

Figura 25. Vías de transporte del modelo base. Fuente: Elaboración propia.

4.5.4. Asignación.

La asignación de las rutas a tomar frente a la demanda existente en la red de transporte, es calculado por el software bajo los distintos principios mencionados anteriormente. Por tanto, es necesario elegir el método de asignación a usar para el transporte privado y el transporte público. En el caso del transporte público, la asignación se realizó en base a horarios o programación, método que incluye el efecto de la programación que tiene la línea de buses en sus paraderos en la decisión del usuario a qué ruta tomar o decidir entre usar una ruta directa entre su origen y destino o una combinación de rutas (transferencias), por la ventaja de reducir el tiempo de viaje. Todas estas condiciones son consideradas dentro de un “*algoritmo del camino más corto*”.

En el caso de transporte privado, la asignación se realizó por el procedimiento de Equilibrio (Wardrop), con iteraciones de incrementos de demanda, ya que cuando se trata de vehículos privados, estos no tienen restricciones en cuanto a programaciones y pueden recorrer la ruta que consideran la mejor para llegar al destino requerido, todos buscando la ruta de menor costo (monetario o de tiempo). La restricción recién ocurren cuando algún camino alcanza su capacidad máxima, así todas las rutas se van ocupando hasta alcanzar el punto de equilibrio.

Cantidad: 1	Ejecución	Activo	Procedimiento	Objeto(s)/referencia	Variante/archivo	Comentario	ComputeNode	Success	StartTime	EndTime	Duratio
1		<input checked="" type="checkbox"/>	Asignación Pu T	PUT PUT	basado en horari			<input type="checkbox"/>			

Figura 26. Asignación de demanda en las rutas de transporte público, por el método basado en horarios. Fuente: Elaboración propia.

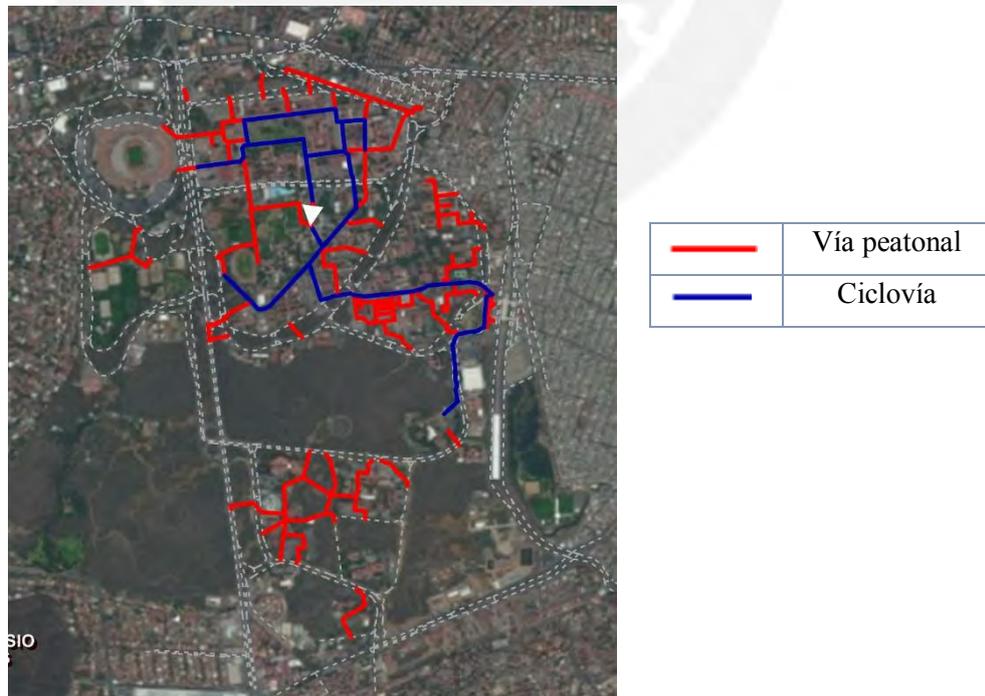
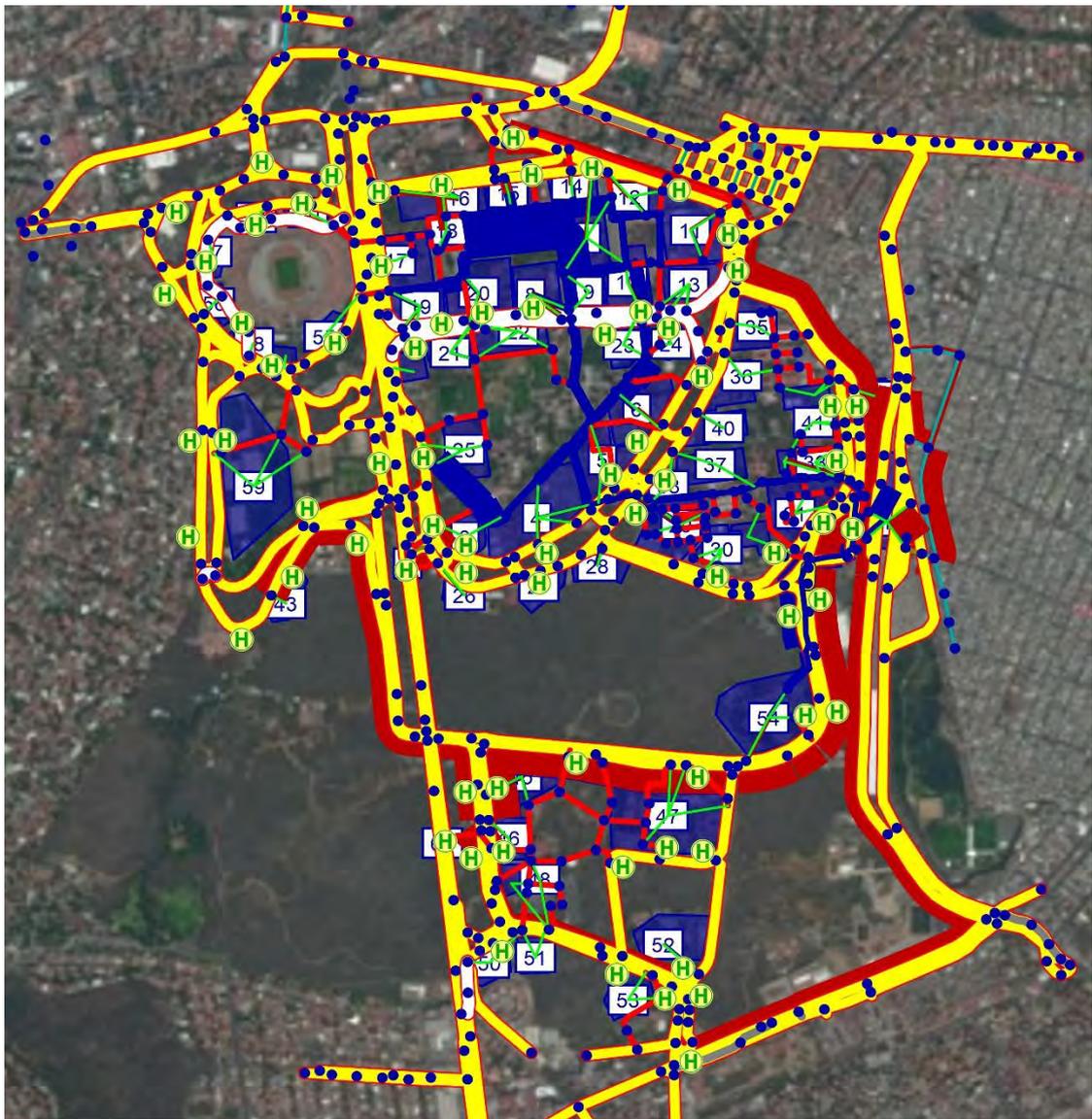


Figura 27. Red de ciclovía del modelo base. Fuente: Elaboración propia.



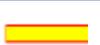
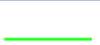
	Zonas		Vías Peatonales
	Nodos		Ciclovías
	Vías de transporte privado		Conectores
	Vías de Pumabús		Punto de parada

Figura 28. Asignación de rutas en el modelo base. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5. ESCENARIO MODIFICADO

5.1. Objetivo

El presente escenario considera que la ciudad universitaria de la Universidad Autónoma Nacional de México presenta mayor cantidad de servicios para sus estudiantes. El objetivo es observar la variación de los desplazamientos dentro de la universidad y si se producirá una menor congestión vehicular y un mayor uso de modos sostenibles, de acuerdo a la jerarquía modal que se presenta a continuación.

5.2. Jerarquía Modal

El nivel de jerarquía de un modo de transporte sobre otro se entiende como la preferencia que existe cuando estos se encuentran en un mismo espacio de tránsito, a fin de asegurar un flujo libre y con pocas paradas. Esta preferencia se gana por las ventajas que ofrece, al bienestar del espacio público, como los que se citan a continuación:

Desplazamiento a pie: permite la interacción social, el ejercicio físico, la apreciación del entorno, además, por los caminos peatonales puede circular muchas personas en conjunto antes de alcanzar la congestión.

Bicicleta: permite la interacción social, el ejercicio físico, la apreciación del entorno, con mayor velocidad para llegar al destino en comparación al desplazamiento a pie. Pueden circular varias personas por las ciclovías antes de alcanzar la saturación de su flujo. Se recomienda para distancias intermedias

Transporte masivo BRT: Permite viajar a grandes velocidades, transportando a un gran número de personas a través de una sola vía de infraestructura, por tanto, se preservan más los espacios públicos, además de contribuir a la disminución de la congestión vehicular.

Transporte público: Permite viajar a mayores velocidades que los primeros dos modos mencionados, transportando a varias personas.

Transporte privado: Se transporta a pocas personas en cada vehículo privado, incluso, la mayoría de veces, por debajo de su capacidad. Por lo cual, al final resulta en un modo de transporte que aumenta la congestión por el espacio físico que ocupa transportando menor cantidad de personas que los otros modos.

5.3. Ubicación de servicios

La distribución de viajes responde a la etapa de generación de viajes estudiada en el Modelo de Cuatro Etapas. El patrón de desplazamientos, como se mencionó, tiene una relación directa y primordial, con la ubicación de los servicios hacia donde las personas se quieren dirigir. Cuando los servicios se encuentran alejados de las zonas de residencia de la población, esta se ve obligada a realizar viajes largos a través de modos de transporte motorizados. Es así, que la congestión vehicular en la ciudad aumenta y en consecuencia también, el uso del modo privado, cuando la población pretende evitar las demoras y colas generadas en el tráfico de la ciudad. Sin embargo, contraproducentemente, el mayor uso de vehículos privados de capacidad máxima de cinco personas, conduce a la saturación de las vías de infraestructura de transporte.

Por ello, en el modelo modificado, se analizará bien la ubicación existente de los servicios en el modelo base y se reajustará de acuerdo a la demanda de servicios identificada en la revisión de la zona de estudio.

En primer lugar, aprovechando la distribución de las vías existentes en el modelo y la ubicación de servicios, se decidió definir claramente cinco centros de actividad con radios de aproximadamente 500 metros. Estos deben representar áreas de la ciudad donde el usuario es capaz de desarrollar la mayoría de sus actividades diarias principales sin tener que recurrir a otros lugares fuera de su centro de actividad.

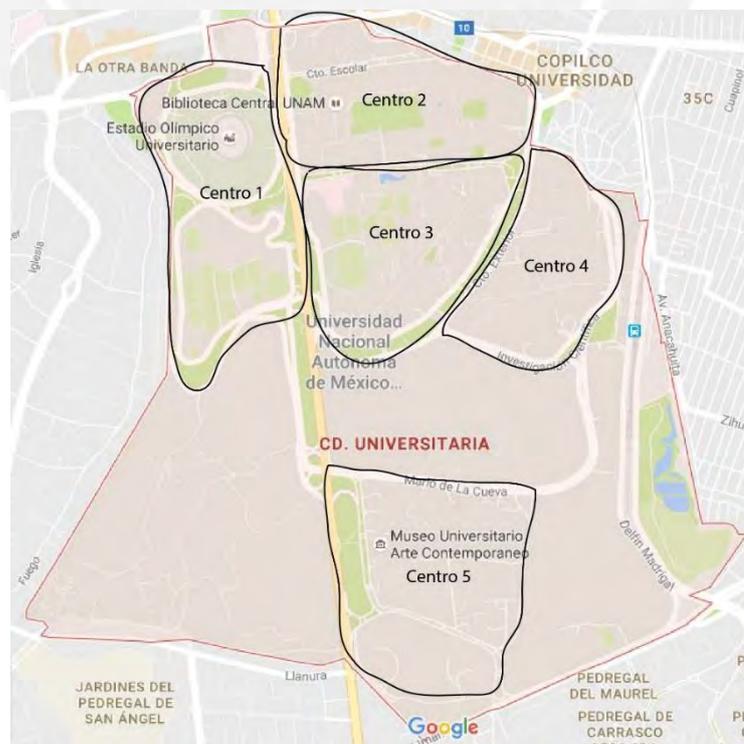


Figura 29. Centros de actividad para el modelo modificado. Fuente: Elaboración propia.

Cabe recordar, que en el modelo base, cada lugar de servicio, pabellones, facultades, bibliotecas, entre otros, han sido considerados como una zona del modelo. Se observó del mapa de la ciudad universitaria que se muestra en el Anexo I, que la mayor cantidad de zonas corresponde a facultades, por lo que la principal atención para la mejora de oferta de servicios, se enfocó en los recintos de actividades culturales.

En la Figura 29. se muestra la asistencia de la población total de la Universidad Autónoma de México a actividades culturales entre los años 2011 y 2015, información recolectada por la Dirección General de Planeación en la Agenda Estadística UNAM 2016. La mayor afluencia de personas corresponde a exposiciones, conciertos y de manera casi uniforme en actividades artísticas.

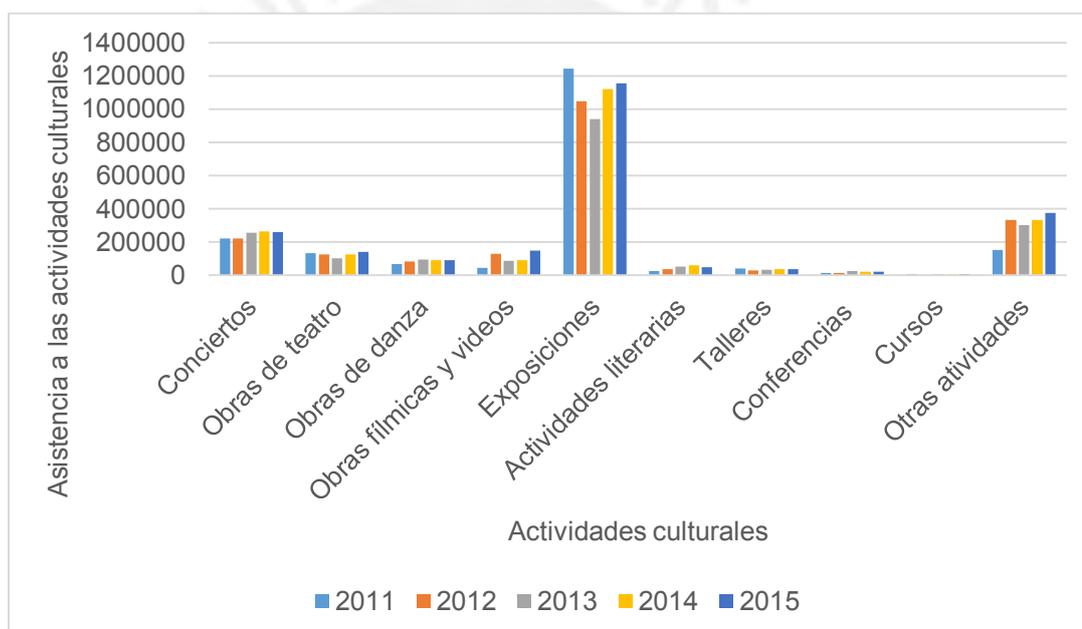


Figura 30. Asistencia a las actividades culturales de la UNAM. Fuente: Agenda Estadística UNAM (2016).

De esta forma, se decidió que cada centro incluiría por lo menos una zona de bibliotecas, comedores, salas de exposiciones y arte.

Analizando los servicios existentes, se reubicaron las zonas, de modo que lugares afines se encontraran ubicados dentro del mismo centro de actividad, como es el caso de todos los servicios relacionados a la especialidad de medicina: facultad de medicina, facultad de odontología, facultad de medicina veterinaria y zootecnia y facultad de biomédica. Se retiraron

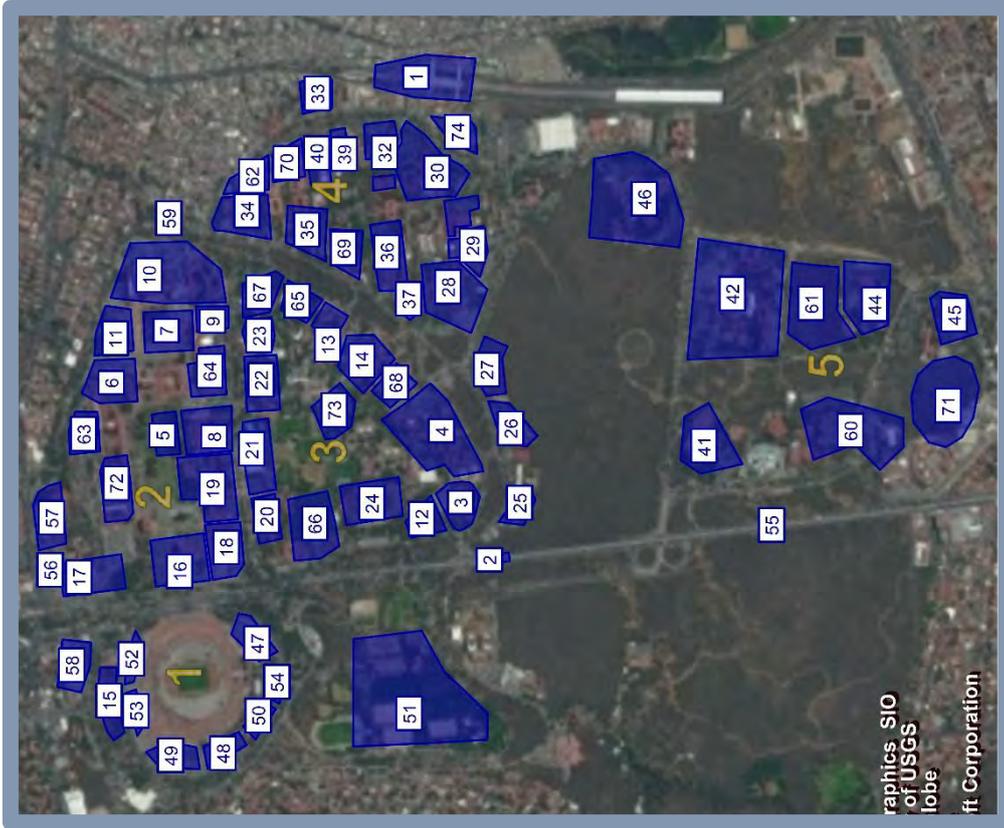
ocho servicios que podían ser incluidos dentro de zonas homólogas mayores y se añadieron veinte zonas nuevas.

Se eliminó las zonas del Museo Universitario de Arte Contemporáneo, el Teatro Juan Ruíz y la Sala Miguel Covarrubias para pasar a formar una sola zona del Centro Cultural Universitario. Se eliminó también la Dirección General de Incorporaciones por no haberse encontrado registro de demanda considerable en esta zona, al igual que la Dirección CCH (Escuela de Ciencia y Humanidades). El Instituto de Ecología también fue reemplazado por una zona de mayor área de Medicina Veterinaria y Zootecnia.

Las zonas añadidas fueron, la facultad de Psicología, que presentaba la segunda demanda más alta de población estudiantil según la Agenda Estadística 2016 (UNAM) y no había sido colocada en el modelo base. También, la facultad Torre de Humanidades II, ya que del mapa de la ciudad universitaria, se identificaron varios edificios anexos a la facultad de Filosofía y Letras, así como centros de investigación relacionados, no consideradas en el modelo base también.

Adicionalmente, se añadió la zona del Centro de Psiquiatría y Salud Mental. Por último, se colocaron, zonas de bibliotecas, comedores y centros de exposición en arte, en cada uno de los centros definidos, ya que son áreas comunes a donde todos los estudiantes asisten. No se encontró información acerca de la distribución de comedores en el modelo base ni en el mapa de la ciudad universitaria, por lo que se colocaron dos zonas de comedores en el centro 2 y 3 donde se encuentran las zonas de mayor demanda y solo una zona de comedor en los centros 4 y 5. De igual forma, se realizó con las zonas de biblioteca, con la diferencia que en el centro 2, solo se añadió una zona de biblioteca más, ya que esta ya contaba con la Biblioteca Central. Respecto a las zonas de Exposiciones y Arte, se añadió una zona de estas en cada centro, a excepción de en el centro 5, donde se ubica el Centro Cultural Universitario, que congrega a un conjunto de salas de actividades culturales. A continuación, se muestran las zonas finales, agrupadas por centro:

Zona	CENTRO 1	Zona	
15	FILOSOFÍA - LETRAS - HUMANIDADES	43	POSGRADOS ECONOMÍA
47	DEPORTE I	65	BIBLIOTECA ZONA 3 - I
48	DEPORTE II	66	COMEDOR ZONA 3 - I
49	DEPORTE III	67	COMEDOR ZONA 3 - II
50	DEPORTE IV	68	BIBLIOTECA ZONA 3 - II
51	DEPORTE V	73	CENTRO DE EXPOSICIONES Y ARTE ZONA 3
52	DEPORTE VI	Zona	CENTRO 4
53	DEPORTE VII	1	Metro CU
54	DEPORTE VIII	28	FACULTAD DE QUÍMICA
58	TORRE II HUMANIDADES	29	EDIFICIO TIAHUICZALPAN
Zona	CENTRO 2	30	INSTITUTO DE FÍSICA
5	ANEXO INGENIERÍA	31	EDIFICIO DE PROGRAMAS UNIVERSITARIOS
6	POSGRADO DE INGENIERÍA	32	INSTITUTO DE GEOFÍSICA+ LAB. ANÁLISIS
7	EDIFICIO DE POS GRADOS	33	NUCLEOS PERFORACIÓN
8	FACULTAD DE INGENIERÍA	34	CENDI
9	CELE	35	INST. CIENCIAS DEL MAR
10	FACULTAD DE MEDICINA	36	INS. FISIOLÓGIA CELULAR
11	FACULTAD DE ODONTOLOGÍA	37	INS. INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
16	RECTORÍA	38	INS. CIENCIAS NUCLEARES UNAM
17	BIBLIOTECA CENTRAL	39	BIBLIOTECA CIENCIAS DE LA TIERRA
18	MUCA	40	INST. GEOLOGÍA
19	FACULTAD DE ARQUITECTURA	42	FACULTAD MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA
56	PSICOLOGÍA	62	COMEDOR ZONA 4 - I
57	CENTRO DE PSIQUIATRÍA Y SALUD MENTAL	69	COMEDOR ZONA 4 - I
59	MENTAL	70	BIBLIOTECA ZONA 4 - I
63	BIBLIOTECA (ZONA 2) I	74	CENTRO DE EXPOSICIONES Y ARTE ZONA 4
64	COMEDOR ZONA 2 II	Zona	CENTRO 5
72	CENTRO DE EXPOSICIONES Y ARTE ZONA 2	41	HEMEROTECA NACIONAL DE MÉXICO
Zona	CENTRO 3	42	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
3	TRABAJO SOCIAL	44	UNIVERSUM: MUSEO DE LAS CIENCIAS
4	FACULTAD DE CONTADURÍA	45	PROGRAMA VINCULACIÓN EXALUMNOS
12	BIOMEDICA	46	FACULTAD CIENCIAS SOCIALES
13	ECONOMÍA	60	CENTRO CULTURAL UNIVERSITARIO
14	FACULTAD DE DERECHO	61	FACULTAD DE CIENCIAS
20	SERVICIOS MÉDICOS	71	COMEDOR ZONA 5 - I
21	ALBERCA OLÍMPICA	Zona	Extras
22	INSTITUTO INGENIERÍA Y MESA VIBRATORIA	2	METRO BUS CU
23	IMAS	25	EDUCACIÓN A DISTANCIA
24	ESTADIO DE PRÁCTICAS	26	CÓMPUTO ACADÉMICO
		27	POS GRADOS CONTADURIA
		55	METRO BUS COPILCO



	Zonas de modelo modificado
	Centros del modelo modificado

Figura 31. Zonificación de modelo modificado. Fuente: Elaboración propia.

5.4. Infraestructura de transporte

Bajo los lineamientos del uso del suelo y la jerarquía modal definidos, la infraestructura de transporte debe redefinirse, acomodarse o implementarse.

Infraestructura viaria de conexión

Redes de modos motorizados

Solo se realizó una pequeña modificación en los centros 1, 2 y 5, retirando algunas de las vías como se muestra en la Figura 32, lo cual resulta en unos cambios menores en el recorrido de las rutas del PumaBús. Se decidió suprimir aquellas vías por encontrarse dentro de los centros en donde se busca promover el uso de otros modos de transporte sostenibles, como la bicicleta y la caminata. Además, por no representar un cambio radical en que se puede asumir razonablemente que la demanda de personas no ha cambiado con gran significancia, premisa del presente modelo.

Lo esperado tras retirar estas vías, es el reacomodo de la demanda por las vías que bordean a los centros, pero principalmente, el incentivo del uso de las ciclovías y caminos peatonales internamente en los centros.

Las vías de transporte van básicamente paralelas a las vías del PumaBús, pero para reducir la demanda sobre los modos de transporte privado, se aumentará la impedancia sobre éstas, a través de: restricción en la velocidad máxima, lo cual significa un aumento en el costo de tiempo, sumado a la restricción de movimientos, otorgando preferencia al transporte público.

El modelo inicial contiene un tipo de vía único para el sistema privado y público, mostrado en la Figura 26 (vía de color amarillo). Si bien en la UNAM, dichos sistemas de transporte circulan por las mismas vías, para el rediseño se está tomando en consideración el hecho de que las líneas de BRT PumaBús, contendrán un carril segregado, lo cual significa un flujo libre. Para ello, se ha colocado una vía única (vía de color blanco) para la línea PumaBús y paralelamente, se colocó las vías de los demás tipos de transporte motorizados privados (vía de color amarillo).

Por otra parte, se creó otro tipo de vía especial para el servicio MetroBús que atraviesa verticalmente la Ciudad Universitaria (vía de color celeste), esta nueva disposición se observa en la Figura 33.

Desde la etapa de planificación también es importante diferenciar la prioridad del sistema público sobre el privado, lo cual se puede lograr por medio de carriles segregados o exclusivos para el sistema público de transporte. Estos suprimen la posibilidad de congestión vehicular

además de permitir el transcurso a velocidades adecuadas. Principalmente son colocados para líneas de metro y BRT, ya que estos modos de transporte permiten movilizar grandes números de personas. Por otra parte, se optó por aumentar la impedancia en el sistema de transporte privado, por medio de un límite de velocidad máximo de 60km/h. Ello aumenta el tiempo de viaje de los pasajeros y se traduce en un mayor costo de transporte, por tanto, se reduciría la atracción de su uso.





	Vías de automóvil y Pumabús
	Vías de Pumabús
	Vía de MetroBús

Figura 32. Vías de transporte del modelo modificado. Fuente: Elaboración propia.

Infraestructura viaria interior

Redes de modos no motorizados

Ciclovías

Se completó la red que se encontraba implementada solo en los centros 2, 3 y parte del 4, extendiéndola a través de todas las zonas, a excepción de aquellas donde se encuentran las reservas ecológicas (Figura 34.) . Esta red ciclovitaria se implementó no solo a nivel intrazonal sino en toda la periferia, incluyendo las vías del BRT, vehículos y metro. También se aumentaron las estaciones, cercanas en puntos de paradas donde se favorece el intercambio modal con los modos de transporte motorizados, para su uso en recorridos de mayores distancias.

Peatonal

Para estimular la caminata, se amplió los caminos peatonales, los cuales en la planificación real deberían acompañarse de paisajismo, atractivos intermedios en el camino y distracciones que estimulen a los usuarios.

5.5. Demanda

Habiendo diseñado la infraestructura de transporte, para realizar la comparación de resultados entre el modelo base y el modelo actualizado con los principios de la movilidad sostenible, se debe ingresar la información de volúmenes de demanda, distribuida previamente acorde a la zonificación del lugar de estudio.

Se tomó como supuesto, un modelo de infraestructura de transporte con proyección de corto plazo, en que se mantuvo, para simplificación de modelo, la misma cantidad de volumen de demanda. Como se añadieron zonas nuevas, en la mayoría de las zonas preexistentes se redujo su demanda aproximadamente al 90%, en otras zonas, se aumentó su demanda al existir mayor número de zonas que se dirigirían a ellas y la diferencia que completa los 160000 estudiantes, se destinó a la demanda de las zonas añadidas.

Los grupos o estratos de personas fueron los mismos a los definidos para el modelo base: Estudiantes sin ningún modo de transporte privado, estudiantes que tienen solo bicicleta, estudiantes que tienen solo automóvil y estudiantes que tienen tanto bicicleta y automóvil.

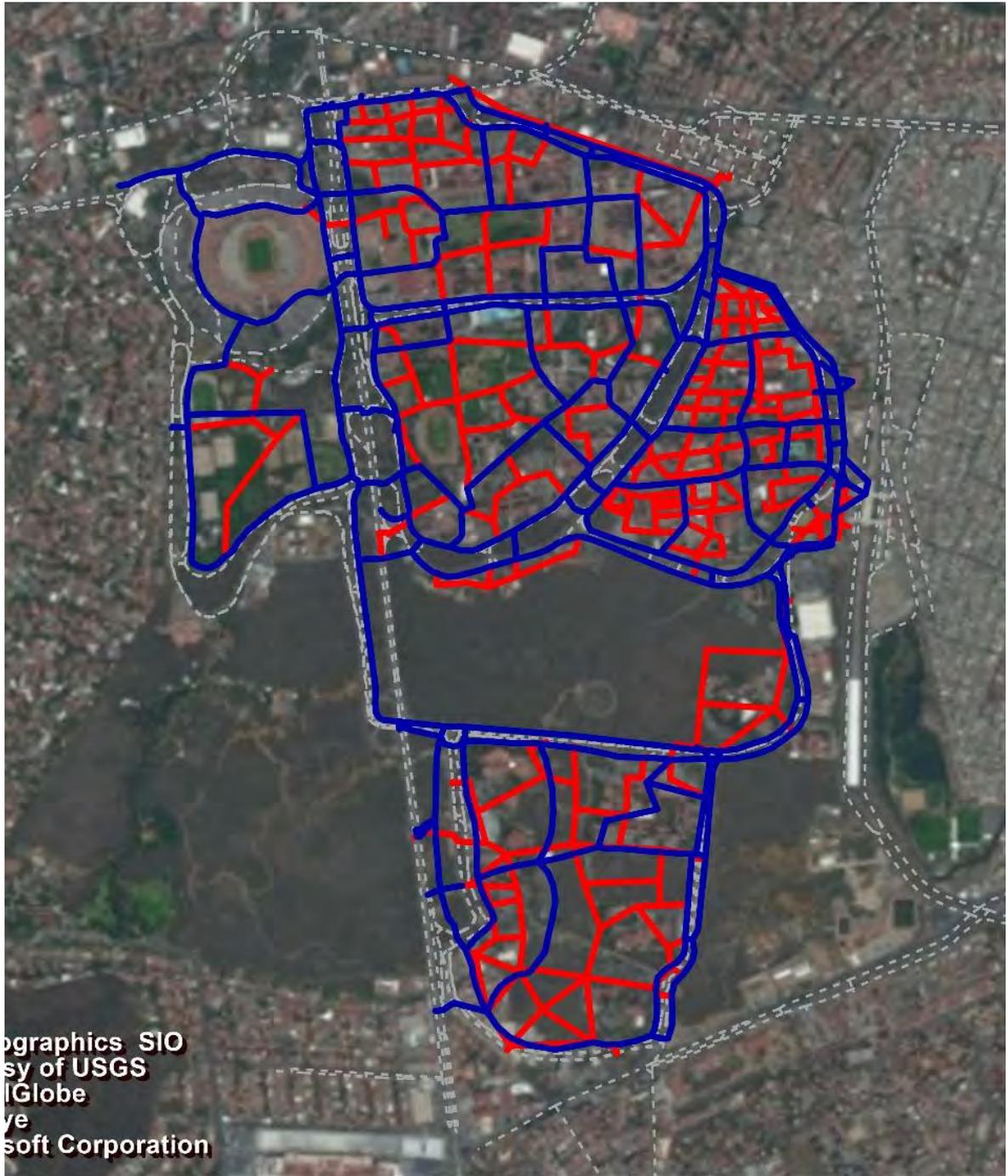
Tabla 25. Grupos de personas creados para el modelo modificado.

Grupos de personas *Estudiantes	Porcentaje de la Población Total
Con automóvil y bicicleta	10%
Sin transporte propio	40%
Con solo bicicleta	25%
Con solo automóvil	25%

Fuente: Elaboración propia.

Con todo ello, se creó la matriz de demanda estudiada en la etapa de generación de viajes del Modelo clásico de Cuatro Etapas, de tamaño 74x74, la cual se aprecia en el Anexo III. Finalmente, se ingresó una tabla resumen de viajes de producción y atracción total de cada una de las zonas creadas, las cuales se pueden apreciar en la Tabla 24.





ographics SIO
 sy of USGS
 IGlobe
 ye
 soft Corporation

	Vía peatonal
	Ciclovía

Figura 33. Cambio de extensión de la red de ciclovía. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Total de viajes de producción y atracción para cada zona del modelo modificado.

	ZONA	Producción - Atracción	
		Oi	Di
1	Metro CU	53010	4715
2	METRO BUS CU	22954	3853
3	TRABAJO SOCIAL	986	1268
4	FACULTAD DE CONTADURIA	2116	4020
5	ANEXO INGENIERIA	240	953
6	POSGRADO DE INGENIERÍA	902	4196
7	EDIFICIO DE POS GRADOS	347	3941
8	FACULTAD DE INGENIERÍA	3590	4746
9	CELE	440	1044
10	FACULTAD DE MEDICINA	2630	3863
11	FACULTAD DE ODONTOLOGÍA	1638	4128
12	BIOMEDICA	573	2827
13	ECONOMÍA	1705	4152
14	FACULTAD DE DERECHO	4208	8164
15	FILOSOFÍA - LETRAS - HUMANIDADES	1774	5130
16	RECTORÍA	302	753
17	BIBLIOTECA CENTRAL	1354	9570
18	MUCA	370	3290
19	FACULTAD DE ARQUITECTURA	1856	3525
20	SERVICIOS MÉDICOS	2098	2139
21	ALBERCA OLÍMPICA	541	1370
22	INSTITUTO INGENIERÍA Y MESA VIBRATORIA	1238	1173
23	IMAS	206	706
24	ESTADIO DE PRÁCTICAS	422	1483
25	EDUCACIÓN A DISTANCIA	280	1594
26	CÓMPUTO ACADÉMICO	503	2251
27	POS GRADOS CONTADURIA	860	3219
28	FACULTAD DE QUÍMICA	992	3131
29	EDIFICIO TIAHUZCALPAN	340	1594
30	INSTITUTO DE FÍSICA	351	936
31	EDIFICIO DE PROGRAMAS UNIVERSITARIOS	523	1512
32	Instituto de Geofísica + Lab. Análisis Núcleos Perforación	467	1013
33	CENDI	389	733
34	INST. CIENCIAS DEL MAR	163	674
35	INS. FISILOGÍA CELULAR	258	677
36	INS. INVESTIGACIÓN EN MATERIALES	273	843
37	INS. CIENCIAS NUCLEARES UNAM	150	686
38	BIBLIOTECA CIENCIAS DE LA TIERRA	564	4834
39	INST. GEOLOGÍA	330	736
40	INST. GEOGRAFÍA	330	914
41	Hemeroteca Nacional de México	543	3824
42	Instituto de Investigaciones	378	1606
43	POSGRADOS ECONOMIA	660	1544

44	UNIVERSUM: Museo de las ciencias	361	2255
45	PROGRAMA VINCULACIÓN EXALUMNOS	217	1094
46	FACULTAD CIENCIAS SOCIALES	2436	4924
47	DEPORTE I	127	725
48	DEPORTE II	173	782
49	DEPORTE III	124	824
50	DEPORTE IV	65	690
51	DEPORTE V	127	785
52	DEPORTE VI	47	741
53	DEPORTE VII	35	739
54	DEPORTE VIII	53	874
55	Metro bus copilco	18047	1749
56	PSICOLOGÍA	3094	1228
57	Comedor Zona 2 - I	1642	1752
58	TORRE II HUMANIDADES	1153	635
59	CENTRO DE PSIQUIATRÍA Y SALUD MENTAL	2264	857
60	CENTRO CULTURAL UNIVERSITARIO	616	5641
61	FACULTAD DE CIENCIAS	2276	5383
62	FACULTAD MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA	1626	808
63	Biblioteca (Zona 2) I	979	1505
64	Comedor Zona 2 II	1085	1541
65	Biblioteca Zona 3 - I	979	1299
66	Comedor Zona 3 - I	950	1203
67	Comedor Zona 3 - II	681	1169
68	Biblioteca Zona 3 - II	988	1322
69	Comedor Zona 4 - I	515	1165
70	Biblioteca Zona 4 - I	1238	987
71	Comedor Zona 7 - I	1388	1099
72	Centro de exposiciones y Arte Zona 2	439	1150
73	Centro de exposiciones y Arte Zona 3	1560	854
74	Centro de Exposiciones y Arte Zona 4	861	890
		160000	160000

Fuente: *Elaboración propia*

CAPÍTULO 6. COMPARACIÓN DE ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos luego de haber corrido el modelo base y el modelo actualizado bajo los criterios de la movilidad sostenible y que llamaremos a continuación como los escenarios.

6.1. Partición Modal

Indica la cantidad de personas de la población, en este caso comprendida por estudiantes, clasificadas según el sistema de transporte que emplean, privado o público.

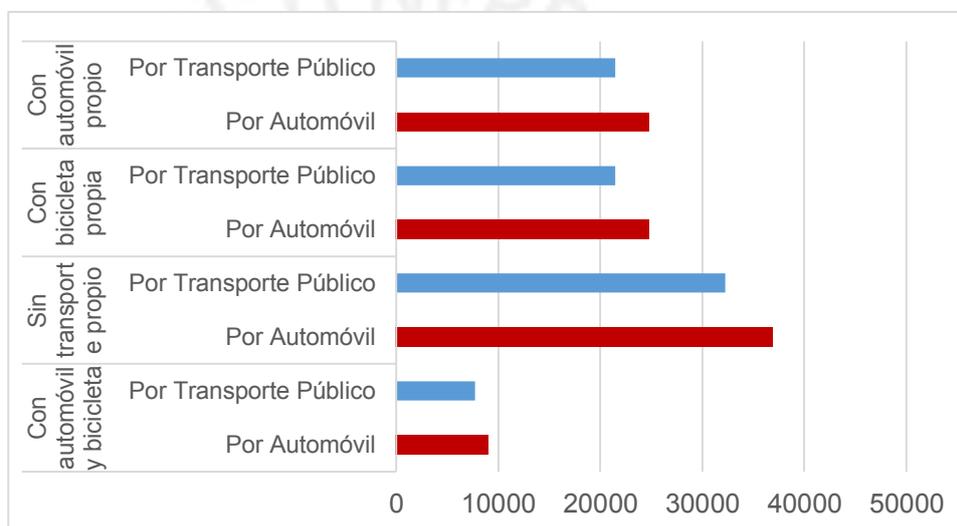


Figura 34. Partición Modal del modelo base por estrato de personas. Fuente: Elaboración propia.

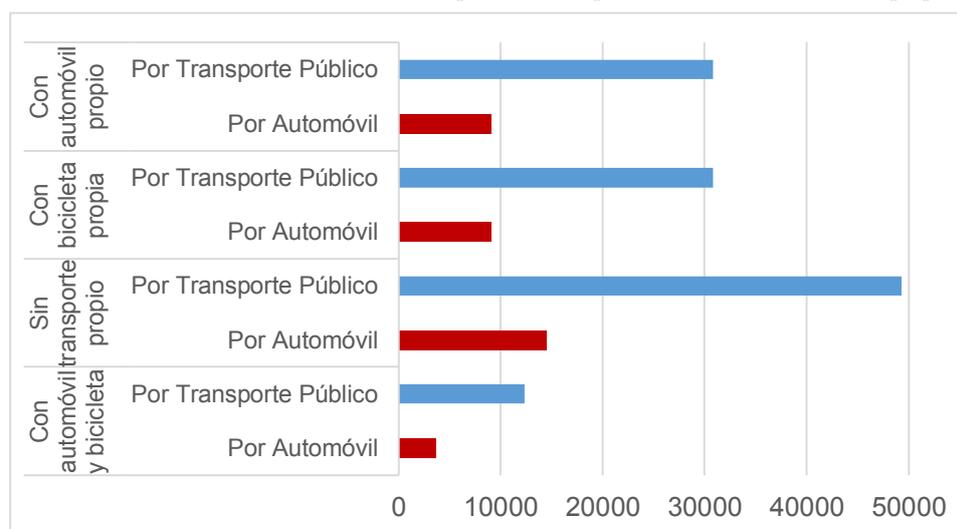


Figura 35. Partición Modal del modelo modificado por estrato de personas. Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 35 y 36 se muestran resultados obtenidos en el software VISUM luego de haber corrido los dos escenarios del modelo empleado. En estos se muestra la partición modal entre transporte privado y transporte público, es decir, el porcentaje de uso de cada uno de los sistemas. Del modelo base, los usuarios que emplearían el sistema privado en los cuatro grupos de personas creados, Estudiantes con automóvil, Estudiantes con bicicleta, Estudiantes sin transporte propio y Estudiantes con automóvil y bicicleta, serían el 54% de la población total. Los mismos resultados en el escenario modificado muestran que el uso de transporte privado sería de 23% de la población estudiantil total, por tanto, habría una reducción en 31% del uso del transporte privado, aumentándose recíprocamente el uso del transporte público de 46% en el escenario base a 77% en el escenario modificado.

En la figura 37 se muestra el resumen de la partición modal.

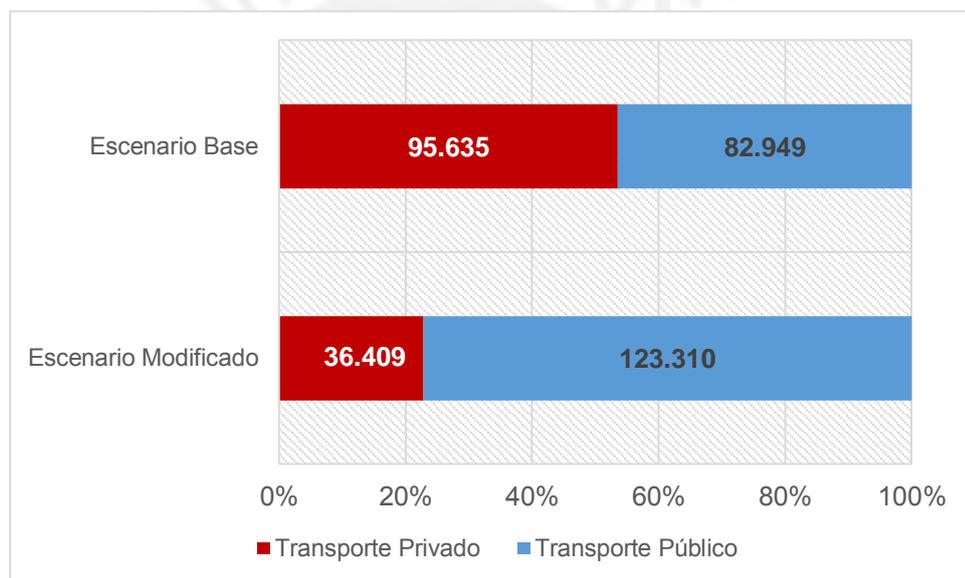


Figura 36. Resumen de partición modal por sistema de transporte. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Impedancias por modo de transporte

Como se definió anteriormente, las impedancias son aquellos factores que desestimulan al pasajero, el uso de un determinado modo de transporte. En este caso, se muestran los resultados de tiempo de viaje, el cual a medida que es mayor representa una impedancia mayor y de velocidad de viaje, que por el contrario, de ser mayor, significa una impedancia menor en el sistema.

Tabla 27. Tiempos de viaje, distancia y velocidad por sistema de transporte público. Fuente: Elaboración propia.

	MODELO BASE	MODELO MODIFICADO
<i>Tiempo de viaje</i>		
Promedio en vías de Transporte Público (min)	28.57	3.73
<i>Distancia recorrida</i>		
Con modos de Transporte Público (km)	0.012	1.542
<i>Velocidad en viajes</i>		
Por vías de transporte público (km/h)	4	27.14
Usando transporte público (km/h)	22	56.61
Distancia directa con transporte público (km/h)	3	17.57

Respecto al tiempo de viaje invertido en viajes realizados por transporte público, en la Figura 38 se observa que el tiempo total en el modelo base es mayor al del modelo modificado, diferenciándose por veinticinco minutos de viaje promedio. Cabe resaltar, que si bien el tiempo de viaje promedio disminuye en el modelo modificado, la distancia cubierta por el sistema de transporte público ha aumentado considerablemente, de 0.01 km a 1.54 km. En cuanto a la velocidad de viaje, en general la movilización por modos de transporte público se volvería más rápida, sobretodo como era de esperarse, empleando los modos motorizados público. Este resultado soporta el menor tiempo de viaje con el sistema público en la red. La velocidad promedio aumenta de 22 km/h a 57 km/h usando los modos motorizados públicos y aumenta de 4 km/h a 27 km/h en la red general a través del sistema de transporte público.

Tanto los tiempos de viaje como velocidad son indicadores o fuentes de impedancia para un medio de transporte. En este caso, la impedancia es positiva para el transporte público, ya que la reducción de estos valores, fomenta su uso en la población, mientras que la impedancia sería negativa para el transporte privado, suponiendo que la mejora en el sistema de transporte público signifique una desmejora en las condiciones de circulación del transporte privado.

6.3. Accesibilidad

	MODELO BASE	MODELO MODIFICADO
Conectores		
De origen de Transporte Privado	150	101
De origen de Transporte Público	149	248
De destino de Transporte Privado	149	100
De destino de Transporte Público	150	258
Vías de un sentido		
Bicipuma	17	10
Automóvil	12	424
Pumabús	26	432
A pie	49	871

Figura 37. Comparación de conectores y vías de un sentido en los escenarios. Fuente: Elaboración propia.

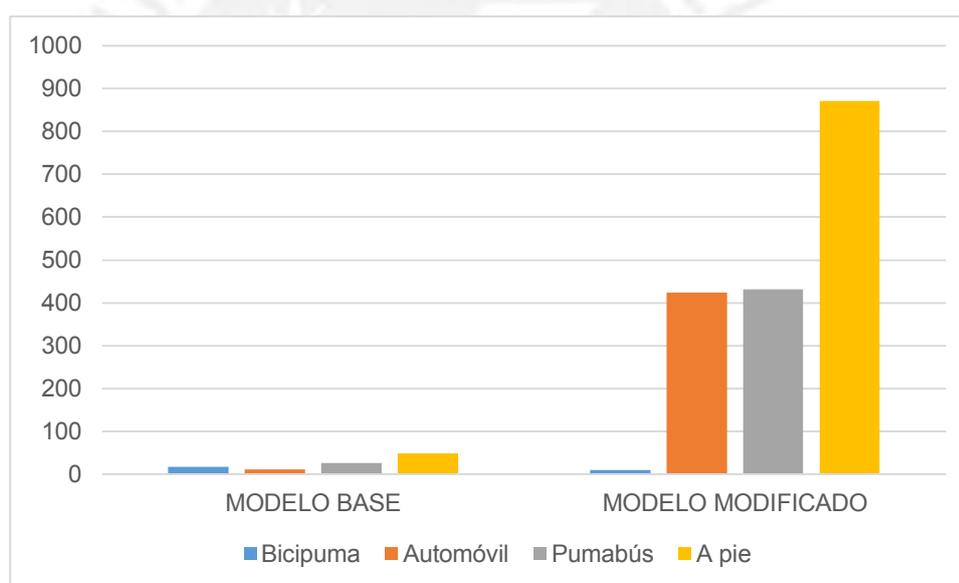


Figura 38. Comparación de vías de un sentido en los escenarios base y modificado. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 39 se muestra una comparación en la cantidad de vías para los modos de transporte privado y público. El aumento de vías es notorio para el modelo modificado, sobre todo para el caso de caminos peatonales, vías de la línea Pumabús y de automóvil. Estos resultados son coherentes ya que dentro de todos los centros se creó una extensa red de caminos peatonales y ciclovías para la movilización de las personas dentro de su centro de actividad. La cantidad de vías de automóvil y Pumabús en el modelo modificado son prácticamente iguales. Esto se derivaría de que en la creación del modelo, este exigía necesariamente crear conexiones de

vías de transporte privado en toda zona o caso contrario el modelo no podía correr. Cabe resaltar que el modelo cuenta como vías de transporte cada tramo entre dos nodos o intersecciones del modelo, estas intersecciones podrían ser puntos de parada o solo simples intersecciones. Ello causa un aumento aparente del número de vías en los resultados mostrados.

Sin embargo, es importante notar que en el modelo modificado se redujo la cantidad de vías de conexión de transporte privado, en que se disminuyeron en 30% tanto para conectores de donde inician viajes utilizando transporte privado como en conectores de destino, es decir de llegada. Por otro lado, las vías de conexión de origen y destino de viajes, aumentaron en 66%, lo cual incluye los modos de Pumabús, bicicleta y caminata.

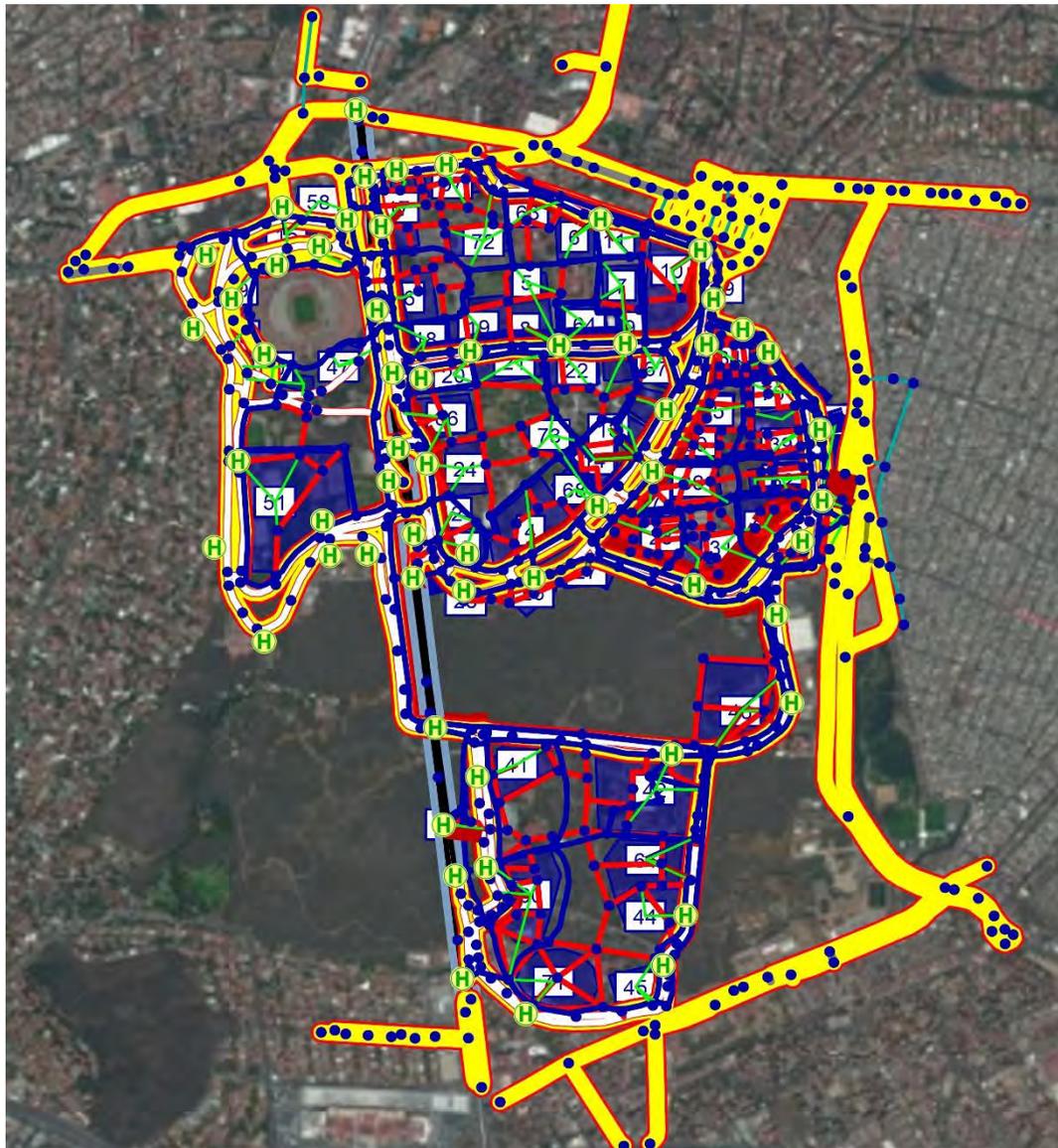
	MODELO BASE	MODELO MODIFICADO
Pasajeros		
Usan transporte público	156632	160000
No realizan transferencias	113500	137267
Realizan al menos 1 transferencia	11988	20218
Realizan 2 transferencias	388	1893
Realizan más de 2 transferencias	47	10

Figura 39. Transferencias realizadas por los pasajeros en viajes por transporte público. Fuente: Elaboración propia.

La accesibilidad está muy relacionada a la posibilidad de realizar intercambio modal, es decir, el paso de un modo de transporte a otro, para continuar realizando el mismo viaje entre un origen y destino. En la Figura 41 se observa que de la población total, la cantidad de pasajeros que en su viaje realizan entre una a dos transferencias de modos de transporte dentro del mismo sistema de transporte público, aumentan en 68% y 387% respectivamente.

La combinación de los resultados de menor tiempo de viaje, mayor velocidad y el aumento de transferencia entre modos de transporte, podrían dar indicios de una mejor movilización en la red de estudio.

6.4. Asignación de rutas



	Zonas		Vías Peatonal
	Nodos		Ciclovías
	Vías de transporte privado		Conectores
	Vías de Pumabús		Punto de parada
	Vía de MetroBús		

Figura 40. Asignación de rutas en el modelo modificado. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 representa el posible panorama de circulación por modo de transporte privado y público en el segundo escenario creado bajo los principios de la movilidad sostenible.

En la figura 29 se observó que los flujos de circulación se concentran en ciertas vías, tanto para el transporte privado como público, lo cual implicaría que existen pocas rutas óptimas o atrayentes a la población y las que existen se saturarían. En cambio, en el escenario de modelo modificado, la distribución de flujos se observa mucho más equilibrada. Esta condición podría repercutir fuertemente en el nivel de satisfacción de la población, ya que significa un tránsito más ordenado, así como la posibilidad de optar por varias rutas para llegar al destino.



CAPÍTULO 7. 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, conllevó 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 claves 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 o 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.

Cabe mencionar que la velocidad promedio de viaje por transporte público, lo cual incluye buses y metro, y el tiempo de viaje promedio por todos los modos de transporte público (buses, metro, caminos peatonales y ciclovías) presentarían según los resultados una considerable mejora, pasando de 22 km/h a 56 km/h. Por otra parte, también el número de personas que realizarían su viaje entre un origen y un destino, en más de un modo de transporte público

(intercambio modal), aumentó considerablemente, aumentando en 8230 el número de personas que realizan al menos una transferencia, lo que representa el 6.7% de la población que usa el transporte público. A partir de estas condiciones, se infiere que la gran disminución de tiempo de viaje promedio se alcanza por la prioridad que posee el transporte público en velocidad y circulación libre y por el uso de los modos de transporte sostenibles entre orígenes y destinos cercanos.

Se concluye además, que sería efectiva la implementación de amplias redes de caminos peatonales y ciclovías, los que se modelaron como medio de transporte público, dentro de centros que contienen una diversa oferta de servicios a donde la población necesita desplazarse.

De la investigación realizada y el uso de 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 horarios 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.

Por ello, se sugiere no emplear simplemente los beneficios de la modelación del software para evaluar la capacidad de las vías de infraestructura motorizada frente a la demanda futura de personas, estimada por la creación de la población, sino además, incluir una etapa previa de evaluación del uso del suelo existente y opciones de rediseño. Para ello, por ejemplo, en el modelo de la presente tesis, el modelo base se mantuvo con el orden de las zonas sin alteración alguna, y se realizó un segundo modelo modificando la cantidad de servicios ofrecidos así como un análisis de su mejor ubicación e incluso reubicación de servicios ya existentes y eliminando otros.

Una posible mejora podrá darse incluyendo la posibilidad de indicar los centros del área de estudio en el modelo, que se quieren crear. Por ejemplo, por medio de cuadros de datos clasificados según estos centros que puedan ser editables paralelamente a la creación de la geometría de la zona de estudio, se podría evaluar mejor si la oferta de servicios en cada centro es adecuada según las actividades de la población. Además, este mismo proceso, la posibilidad de crear diversos escenarios, cambiando constantemente los tipos de servicios en cada zona, debería ser posible a través de un entorno más amigable.

Para el modelo trabajado en la presente tesis, dicha evaluación se realizó antes de la modelación, haciendo uso de planos y esquemas en donde se reorganizó la ciudad universitaria, ubicando dentro de un mismo centro, de preferencia servicios relacionados y a

donde los estudiantes tendrían mayor necesidad de movilizarse. Luego de definir el cambio en el uso del suelo, recién se pudo proceder a crear el modelo modificado en el software.

Otra sugerencia respecto a las herramientas del software es permitir la creación de áreas con tipos o niveles de movilidad sostenible. Por ejemplo, permitir la creación de centros donde algunas zonas internas estén solo conectadas a través de vías de transporte público y modos sostenibles ya que las vías de transporte privado no requieren ser implementadas en toda la extensión. Si bien los modelos de planificación de transporte como el VISUM son empleados para ciudades, provincias, distritos y en general áreas de gran extensión, para áreas menores donde se quiere diseñar la infraestructura de transporte es muchas veces también empleado. Es así, que el modelo base de la ciudad universitaria estudiada se encuentra en modelación. En casos como este, las zonas internas que eran pabellones o facultades, podían ser conectadas solo a las vías de modos sostenible que se encontraban a su alrededor, ciclovías y caminos peatonales. Sin embargo, para poder correr el modelo, era necesario crear conectores de transporte privado en todas las zonas del modelo, lo cual favorece el aumento de la partición modal para dicho modo de transporte así como el aumento de infraestructura de transporte motorizada en el área.

Finalmente, de la investigación realizada y el piloto de 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. Es importante resaltar que el presente trabajo contiene una gran simplificación al realizar una variación de la oferta de servicios que en la realidad se daría en un proceso de varios años, sin haber alterado la población total. Sin embargo, se considera que el aumento de la población que se daría en el transcurso de esos años, difícilmente alterarían el patrón de comportamiento en cuanto a las zonas del campus universitario más transcurridas. Mas bien, el aumento de la población, realza la necesidad de crear un sistema de transporte más sostenible y ordenado, que reduzca la congestión y tiempos de viajes y creando uno que devuelva la autonomía de los usuarios en el espacio público.

REFERENCIAS

- Agencia de Cooperación Internacional del Japón. (2013). *Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao*. Lima.
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 73-80.
- Ben-Akiva, M. (2008). Travel Demand Modeling. Presentation.
- Böhler-Baedeker, S., Kost, C., & Merforth, M. (2014). *Planes de Movilidad Urbana, Enfoques Nacionales y Prácticas Locales*. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- CAF. (2011). *Desarrollo urbano y movilidad en América Latina*. Panamá: Norma color.
- De Jond, G., & Tavasszy, L. (2014). *Modelling Freight Transport* (Primera ed.). London, England: ELSEVIER. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124104006000069>
- Dextre, J. C., & Avellaneda, P. (2014). *Movilidad en zonas urbanas*. Lima: Fondo Editorial PUCP.
- Dial, R. (1971). A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model Which Obviates Path Enumeration. *Transportation Research*, 5, 83-111. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/33520631_A_Probabilistic_Multipath_Traffic_Assignment_Model_Which_Obviates_Path_Enumeration
- Gerken, J. (Abril-Junio de 1991). Generalized Logit Model. (ELSEVIER, Ed.) *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(2/3), 75-88.
- Ghel, J., & Svarre, B. (2013). *How to study public life*. Washington: Island Press.
- Gupta, J., & Shah, N. (Mayo de 2012). Origin Destination Transpotation Models: Methods. *Journal of Mathematical Sciences & Applications*, 2(2). Obtenido de www.journalshub.com
- Herce, M. (2009). *Sobre la movilidad en la ciudad : propuestas para recuperar un derecho ciudadano*. Barcelona, España: Reverté.
- Hernández, M. (s.f.). *Eslabones*. Recuperado el 25 de Agosto de 2016, de Diario en bici: La ciudad en bicicleta: <http://diarioenbici.com/bicipuma-extiende-horario-de-atencion/>

- Ilustre Municipalidad de Santiago. (2015). *Plan Integral de Movilidad, Comuna de Santiago*. Santiago.
- Islas Rivera, V., & Lelis Zaragoza, M. (2007). *Análisis de los Sistemas de Transporte*. Sanfandilla.
- Kii, M., Nakanishi, H., Nakamura, K., & Doi, K. (2016). Transportation and spatial development: An overview and a future direction. *Transport Policy*(49), 148-158. Obtenido de www.elsevier.com/locate/tranpol
- Koppelman, F., & Wen, C.-h. (1998). Alternative Nested Logit Models: structure, properties and estimation. (ELSEVIER, Ed.) *Transportation Research Part B*, 32(5), 289-298.
- Lee, D. (Mayo de 1973). Requiem for Large Scale Models. *Journal of the American Institute of Planners*, 39(3).
- Lenormand, M., Bassolas, A., & Ramasco, J. (2016). Systematic comparison of trip distribution laws and models. *Journal of Transport Geography*, 158-169.
- Manzo, S., Nielsen, O., & Prato, C. (Enero de 2015). How uncertainty in input and parameters influences transport model: output A four-stage model case-study. *Transport Policy*(38), 64-72. Obtenido de www.elsevier.com/locate/tranpol
- McNally, M. G. (2007). *The Four Step Model*. Irvine. Recuperado el 18 de Abril de 2016, de <http://escholarship.org/uc/item/0r75311t>
- Minh, N. Q. (2016). Application of "Car-Free City" and "City of Short Walks" to Living Quarters in Hanoi Towards Sustainable Mobility and Logistics. *ELSEVIER*, 283-290. Obtenido de www.sciencedirect.com
- OPTI. (Noviembre de 2009). *Búsquedas: Estudios de Prospectivas*. (F. OPTI, Ed.) Recuperado el 14 de Abril de 2016, de Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial Web site: <http://www.opti.org>
- Ortúzar, J. d. (1990). *Modelling Transport*. Chichester, Inglaterra: Wiley.
- Postorino, M. (1993). A comparative analysis of different specifications of modal choice models in an urban area. *European Journal of Operational Research*, 288-302.
- Prato, C. G. (2009). Route choice modeling: past, present and future research directions. *Journal of Choice Modelling*, 65-100. Obtenido de www.jocm.org.uk
- PTV America,. *VISUM Overview*. Presentación.
- PTV Vision,. (2009). *VISUM State of the Art Travel Demand Modeling*. Presentación.

- Sanz, A. (Junio de 1997). *Movilidad y accesibilidad: un escollo para la sostenibilidad urbana*. Obtenido de Ciudades para un Futuro más Sostenible : <http://habitat.aq.upm.es/cs/p3/a013.html>
- Sanz, A., & Gea21. (2010). *Urbanismo y Movilidad Sostenible. Guía para la construcción de ciudades siguiendo criterios de movilidad sostenible*. Navarra: NASURSA.
- Secretaría de Desarrollo Social. (s.f.). *Porgrama de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades mexicanas*. Manual de operación de transporte público.
- Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. (s.f.). *Historia*. Recuperado el 20 de Agosto de 2016, de Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: <http://www.repsa.unam.mx/index.php/historia-repsa>
- Sheffi, Y., & Powell, W. (1981). A Comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15, 53-64.
- SIGMA GP LOGIT. (2010). *Estudio del impacto vial en la red metropolitana de Lima y Callao por el flujo de carga del puerto, aeropuerto y zona de actividad logística*. Lima.
- Sillaparcharn, P. (26 de Julio de 2007). Vehicle Ownership and Trip Generation Modelling. A case study of Thailand. *IATSS Research*, 32(2), 17-26. Obtenido de www.sciencedirect.com
- Susan, H., & Guliano, G. (2004). *The geography of urban transportation* (3era ed.). New York: The Guildford Press. Recuperado el 18 de Abril de 2016, de <https://books.google.com.pe/books?id=AeEyAAAAQBAJ&lpq=PP1&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
- UNAM. (s.f.). *Acerca de la UNAM: Mapas UNAM*. Recuperado el 16 de Agosto de 2016, de Universidad Nacional Autónoma de México: <https://www.unam.mx/acerca-de-la-unam/mapas-unam>
- UNAM. (s.f.). *Agenda Estadística UNAM*. Recuperado el 18 de Agosto de 2016, de Portal de Estadística universitaria: <http://www.estadistica.unam.mx/agenda.php>
- UNAM. (s.f.). *Series estadísticas UNAM*. Recuperado el 22 de Agosto de 2016, de Portal de Estadística universitaria: http://www.estadistica.unam.mx/series_inst/index.php
- UNAM. (s.f.). *Transporte*. Recuperado el 19 de Agosto de 2016, de Universidad Nacional Autónoma de México: <https://www.unam.mx/transporte>
- Universitat Politècnica de València. (2015). *Plan de Movilidad Sostenible*. Valencia.

Wardrop, J. G. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, II(36), 344-353.

Wegener, M. (2004). Overview of Land-use Transport Models. En *David A. Hensher and Kenneth Button (Eds.): Handbook in Transport* (págs. 127-146). Kidlington: Elsevier.

