

Simulación de la Movilidad Vehicular en Oaxaca de Juárez en el cruce del Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO)

**Álvarez Martínez
Alessandro Santiago**

Estudiante de Ingeniería en Sistemas
Computacionales,
Tecnológico Nacional de México
(TecNM)

23160835@itoaxaca.edu.mx

**Enríquez Rodríguez
Alejandro Guillermo**

Estudiante de Ingeniería en Sistemas
Computacionales,
Tecnológico Nacional de México
(TecNM)

23160890@itoaxaca.edu.mx

**Ruíz Osante
Ángel Yiban**

Estudiante de Ingeniería en Sistemas
Computacionales,
Tecnológico Nacional de México
(TecNM)

23161119@itoaxaca.edu.mx

1. Resumen

Un problema cotidiano para los ciudadanos es la congestión vehicular generada en intersecciones urbanas, con tiempos prolongados de espera y formación de cuellos de botella.

Nosotros como estudiantes del Instituto Tecnológico de Oaxaca, somos víctimas del problema, coincidiendo en el cruce Monte Albán – Constituyentes, donde el flujo vehicular es elevado, posiblemente provocado por una desproporción en los tiempos del ciclo de los semáforos.

Este artículo presenta el análisis, modelado y simulación del comportamiento vehicular en dicho cruce, con el objetivo de evaluar la efectividad actual del sistema y determinar la viabilidad en el cambio de los tiempos del ciclo.

Se utilizó la herramienta de simulación “ProModel” para construir un modelo de eventos discretos basados en las observaciones de campo realizadas, abarcando los porcentajes de llegada de vehículos en luz roja, los vehículos que cruzan en luz verde, los tiempos de ciclo de los semáforos y el cruce peatonal, además de la capacidad máxima de vehículos.

Los primeros resultados de la simulación se aproximan a los porcentajes obtenidos en la recolección de datos, y demuestran que los tiempos del ciclo no son exactos para evitar la acumulación vehicular a largo plazo.

Al modificar los tiempos de luz verde, además de agregar tiempo de paso al peatón, se observa una mejora significativa en la fluidez del sistema.

Por lo que, se concluye que el modelado del problema mediante la simulación es una forma útil y efectiva para poder realizar decisiones más acertadas sobre las mejoras en los semáforos y la gestión vial.

2. Palabras Clave

Simulación, Distribución Normal, Distribución Uniforme, ProModel, Gestión vehicular, Congestión vehicular, Ciclo semafórico, Oaxaca.

3. Introducción

La simulación dentro de la ingeniería es una herramienta fundamental para analizar los sistemas complejos reales, pudiendo experimentar con este sin intervenir directamente en él. Dentro del ámbito del tránsito vehicular, la simulación permite estudiar el comportamiento del flujo vehicular con los diferentes tiempos en los ciclos semafóricos, para poder predecir el impacto de los cambios operacionales sin afectar a los conductores.

En el presente trabajo, se aborda el análisis y modelado del cruce **Monte Albán – Constituyentes**, una intersección principal con dos carriles en cada dirección, además de contar con semáforos con un ciclo total de 139 segundos. Mediante la observación de campo,

se registró el flujo vehicular en 2 horarios diferentes, considerando 3 tipos de vehículos: los autos, las motos y los transportes pesados.

La simulación se realizó con **ProModel**, una herramienta idónea debido a su capacidad de modelar colas, tiempos de llegadas, restricciones de capacidad, y especificaciones en los procesos.

El objetivo principal de realizar este artículo es desarrollar un modelo aproximado del cruce Monte Albán – Constituyentes para analizar su efectividad actual y evaluar posibles alternativas en los ciclos semafóricos.

El estudio se inspira en metodologías similares a las desarrolladas en tesis académicas como la de Edgar Gómez Hernández (INAOE, 2011) [3], además del trabajo elaborado por Andrés Caminos (JAIIO, 2010) [1].

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 4 presenta el trabajo relacionado; la Sección 5 describe la metodología usada y su implementación en ProModel; la Sección 6 demuestra los experimentos y resultados obtenidos de las simulaciones; la Sección 7 analiza los hallazgos, además de validarlos, y la Sección 8 presenta nuestras conclusiones y posibles direcciones futuras.

4. Trabajo Relacionado

La simulación del flujo vehicular en intersecciones urbanas es un área que ha sido estudiada previamente por otros autores, todos con el principal fin de evaluar las alternativas de mejora, como lo puede ser el trabajo de Edgar Gómez Hernández (INAOE, 2011) [3] en el trabajo titulado “Desarrollo de un modelo de simulación vehicular para la sincronización de semáforos”, donde propone un modelo de simulación de flujo vehicular basado en datos reales y en la representación detallada de las intersecciones. Su estudio integra variables críticas como tiempos de llegada, saturación de carriles, el ciclo semafórico y las colas vehiculares.

Además, Gómez desarrolla su modelo centrándose en las intersecciones de Puebla, proporcionando una base sólida para sistemas urbanos de altos volúmenes de tráfico.

Un segundo trabajo encontrado, es el elaborado por Andrés Caminos (JAIIO, 2010) [1] titulado “Desarrollo de un modelo de simulación vehicular para la sincronización de semáforos”, este trabajo evalúa la sincronización de los semáforos, el flujo vehicular y los efectos de saturación en avenidas principales. Su estudio reconstruye la red vial con datos de campo, definiendo los ciclos del semáforo, y simula el comportamiento de diferentes tipos de vehículos en diferentes sistemas.

Ambos trabajos coinciden en el hecho de utilizar la simulación para recrear las condiciones reales del tráfico sin alterar la infraestructura física, facilitando el análisis de distintos escenarios, además de utilizar herramientas de simulación, en el caso de Gómez no especifica la herramienta, mientras que Caminos utilizó **SIMUL8**.

Nuestro estudio se apoya con los mencionados en el aspecto de los datos utilizados para la simulación, además de conceptos de las

teorías de colas y restricciones temporales para los semáforos. Y La diferencia se encuentra en distintos puntos, como lo es el uso de la herramienta de **ProModel** para la simulación, además de solo enfocarnos en una intersección de la ciudad de Oaxaca y de catalogar los vehículos en 3 grupos principales, que abarcan a un subgrupo de autos, variando según la marca y tamaño del vehículo.

5. Metodología

La **congestión vehicular** es un problema creciente en ciudades como Oaxaca. Simular los cruces permite predecir colas de espera, medir tiempos de recorrido y **analizar escenarios de mejora**, lo que ayuda a autoridades municipales a planear infraestructura más eficiente y a reducir costos asociados al tiempo perdido, contaminación y riesgos de accidentes.

5.1. Supuestos

- Las llegadas de vehículos se distribuyen siguiendo los porcentajes observados en campo de cada calle.
- Los vehículos llegan de manera independiente, sin considerar agrupamientos.
- La velocidad de los vehículos es constante, no se consideran cambios por aceleración, frenado o condiciones climáticas.
- El tiempo de cruce de cada carril es fijo, basado en el promedio observado.
- Los tiempos del ciclo semafórico se consideran constantes durante toda la simulación.
- No se modela el comportamiento del conductor, como puede ser el cruce en rojo o desaceleraciones bruscas.
- No se incluyen peatones, se considera en el tiempo asignado para su cruce.
- La capacidad de cada carril es fija, y los vehículos se acomodan en cola de manera ordenada.
- No se modelan cambios de carril ni adelantamientos.
- No se considera el ruido, baches, topes o elementos externos que puedan alterar el flujo.

5.2. Datos de Entrada

Para simular el tráfico vehicular, se requiere de determinar una cantidad exacta de variables, por lo que se inició seleccionando un **cruce urbano de Oaxaca de Juárez**, por consiguiente, se definió las variables a usar, las cuales se detallan en la tabla 1. Una vez recabados los datos, se definió a la herramienta de simulación **ProModel**, para empezar a trabajar la simulación.

Cuadro 1: Datos a Capturar

Flujo vehicular (veh/h)	Número de vehículos que cruzan
Tipo de vía	Clasificación Vial
Número de carriles	Capacidad Física
Ciclo total (s)	Duración Total (V+A+R)
Verde (s)	Tiempo en luz verde
Amarillo (s)	Tiempo en luz amarilla
Rojo (s)	Tiempo en luz roja
Cola máxima (veh)	Total de Vehículos detenidos en rojo
Longitud del cruce (m)	Longitud de la calle
Hora de observación	Identificación de Horario
Autos (%)	Incluye vehículos pequeños y medianos
Motos (%)	Incluye todo tipo de motos
Transporte (%)	Incluye vehículos grandes y de carga

5.2.1. Cruces Analizados

Se analizaron dos intersecciones principales: **Monte Albán y Constituyentes**, donde se midieron variables operativas del tráfico en un horario de 11:00 - 11:45 horas.

Dentro de la tabla 2 se observan los datos documentados de la calle Monte Albán con dirección a la Plaza Monte Albán, cruzando el puente del Tecnológico; En la tabla 3 se observan los datos capturados de la calle Monte Albán con dirección al Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO), sobre esta calle suele venir una gran cantidad de estudiantes, ya sea en transporte público o caminando.

En la tabla 4 se proyectan los datos registrados de la calle Constituyentes con dirección a la Gasolinera, en esta calle suele venir una gran cantidad de estudiantes en transporte público; Para finalizar, la tabla 5 incluye los datos anotados de la calle Constituyentes con dirección al ITO, siendo una de las calles con mayor número de autos pesados observados, lo que la hace lenta si es que giran hacia el puente o cruzan hacia el ITO.

A pesar de que la calle de Constituyentes cuenta con una vía lateral, se acumula una gran cantidad de tráfico en la zona.

Datos Capturados de la calle Monte Albán

Cuadro 2: Con dirección a Plaza Monte Albán

Flujo vehicular (veh/h)	164
Tipo de vía	Principal
Número de carriles	2
Ciclo total (s)	139
Verde (s)	44
Amarillo (s)	3
Rojo (s)	92
Cola máxima (veh)	172
Longitud del cruce (m)	370
Hora de observación	11:00
Autos (%)	80 %
Motos (%)	16 %
Transporte (%)	4 %

Cuadro 3: Con dirección al ITO

Flujo vehicular (veh/h)	120
Tipo de vía	Principal
Número de carriles	2
Ciclo total (s)	139
Verde (s)	44
Amarillo (s)	3
Rojo (s)	92
Cola máxima (veh)	120
Longitud del cruce (m)	108
Hora de observación	11:00
Autos (%)	59 %
Motos (%)	34 %
Transporte (%)	7 %

Datos Capturados de la calle Constituyentes

Cuadro 4: Con dirección a la Gasolinera

Flujo vehicular (veh/h)	57
Tipo de vía	Principal
Número de carriles	2
Ciclo total (s)	139
Verde (s)	12
Amarillo (s)	3
Rojo (s)	124
Cola máxima (veh)	66
Longitud del cruce (m)	390
Hora de observación	11:00
Autos (%)	56 %
Motos (%)	27 %
Transporte (%)	17 %

Cuadro 5: Con dirección al ITO

Flujo vehicular (veh/h)	41
Tipo de vía	Principal
Número de carriles	2
Ciclo total (s)	139
Verde (s)	12
Amarillo (s)	3
Rojo (s)	124
Cola máxima (veh)	45
Longitud del cruce (m)	190
Hora de observación	11:00
Autos (%)	44 %
Motos (%)	25 %
Transporte (%)	31 %

Cabe recalcar que los tiempos del ciclo semafórico se cronometra-
ron manualmente para cada uno, abarcando un ciclo total de 139
segundos y 14 segundos extras para el paso al peatón.

5.2.2. Herramienta Fit

La herramienta FIT en ProModel grafica los datos de entrada, con
todas las distribuciones de probabilidad que se pueden utilizar [4].

En nuestro caso, utilizaremos los datos obtenidos para conocer la
cantidad de autos que llegan por segundo, y cuánto tardan en pasar
el semáforo.

A continuación, cada una de las figuras mostrará los datos usados
en Arribos y Procesos, como es el caso de la figura 1, la cual muestra
las distribuciones de arribos (rojo) y procesos (verde) de la calle de
Constituyentes hacia la Gasolinera de las 3 entidades.

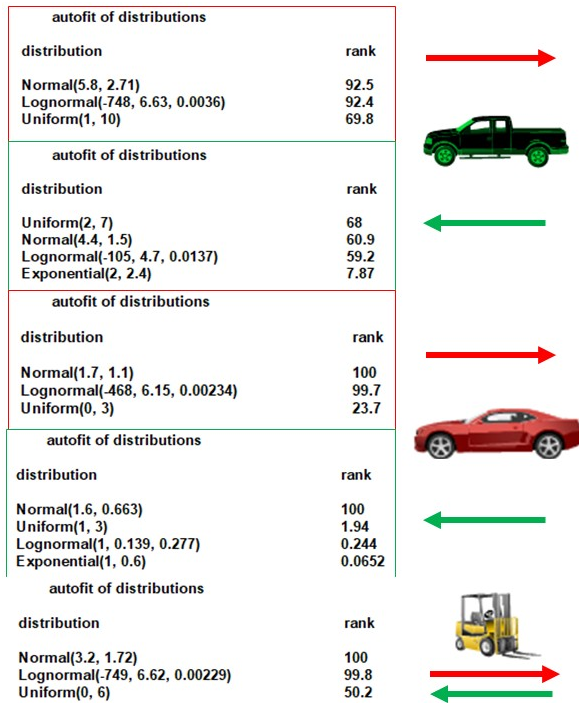


Figura 1: Arribos y Procesos(Constituyentes hacia Gasolinera).

La figura 2, muestra las distribuciones de arribos y procesos de
la calle de Monte Albán hacia el ITO de las 3 entidades. En esta
ocasión los datos no se ven bordeados por colores, la razón es que
según los datos registrados, la cantidad de vehículos que llegaban en
rojo, pasaban en verde, por lo que los valores de las distribuciones
eran iguales.

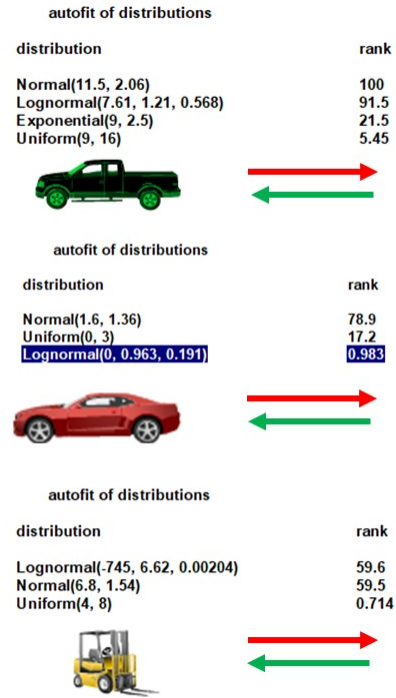


Figura 2: Arribos y Procesos(Monte Albán hacia ITO).

La figura 3, muestra las distribuciones de arribos y procesos de la
calle de Monte Albán hacia la Plaza Monte Albán de las 3 entidades.
En este caso solo los datos que no se ven bordeados por colores, son
los de las entidades Auto y Moto, mientras que los autos pesados si
mostraron una ligera diferencia.

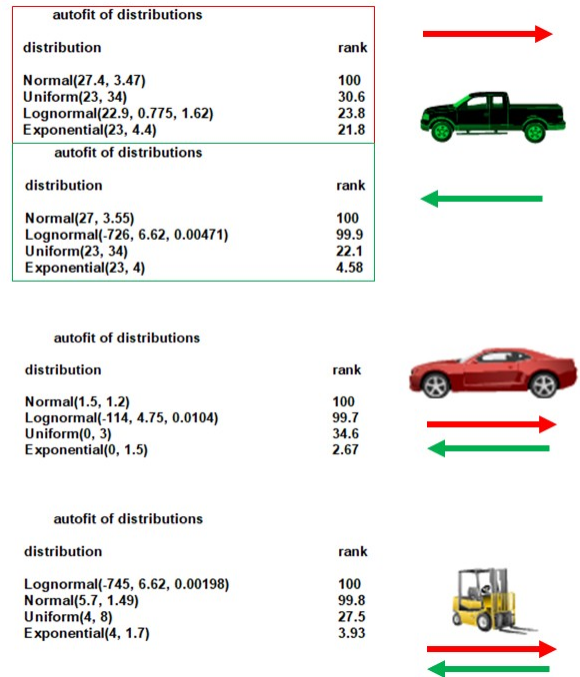


Figura 3: Arribos y Procesos(Monte Albán hacia Plaza).

Para finalizar, la figura 4, muestra las distribuciones de arribos y
procesos de la calle de Constituyentes hacia el ITO de las 3 entidades.
En esta ocasión, todos los datos están bordeados por sus respectivos

colores, lo que indica que si hubo una diferencia entre los autos que llegaban en rojo, y los que pasaban en verde.

autofit of distributions	
distribution	rank
Lognormal(-0.222, 1.35, 0.368)	100
Normal(3.9, 1.45)	70.8
Uniform(2, 6)	48.2
Exponential(2, 1.9)	18.1
autofit of distributions	
distribution	rank
Lognormal(-2.4, 1.81, 0.173)	100
Normal(3.8, 1.06)	82.1
Uniform(2, 6)	11.9
Exponential(2, 1.8)	4.21
autofit of distributions	
distribution	rank
Normal(2.9, 1.04)	66.1
Lognormal(-748, 6.62, 0.00139)	65
Uniform(2, 5)	3.09
Exponential(2, 0.9)	0.0823
autofit of distributions	
distribution	rank
Normal(2.4, 0.917)	90.5
Lognormal(-292, 5.68, 0.00312)	90.2
Uniform(1, 4)	41.3
autofit of distributions	
distribution	rank
Normal(2.1, 0.831)	100
Uniform(1, 3)	9.07
Lognormal(1, 0.396, 0.343)	1.7
autofit of distributions	
distribution	rank
Normal(2, 0.632)	100
Uniform(1, 3)	18.2
Exponential(1, 1)	0.889
Lognormal(1, 0.173, 0.3)	0.559

Figura 4: Arribos y Procesos(Constituyentes hacia ITO).

5.3. Implementación en ProModel

ProModel es un simulador con animación para computadoras personales, el cual permite simular cualquier tipo de sistemas de manufactura, logística, manejo de materiales, como también bandas de transporte, grúas viajeras, ensamble, corte, logística, etc. [2].

Para poder realizar la simulación dentro de ProModel, es necesario determinar algunos datos para ciertos campos dentro de las pestañas de la aplicación, como lo son las **Entidades**, **Locaciones**, **Arribos** y **Procesos**.

5.3.1. Entidades

Para poder construir las entidades, se clasificaron los vehículos en 3 grandes grupos:

- Autos. Incluye todos los vehículos pequeños y medianos.
- Motos. Incluye todas las marcas de Motos.
- Camión o Carga. Incluye las camionetas, transporte público, transporte de carga, etc.

Se pensó en realizar 4 bloques de estos grupos, uno para cada calle, pero debido a la cantidad máxima de entidades posibles, se dividió en 2 bloques para las calles:

- Constituyentes. Lo integra Autos, Motos, Camión o Carga.
- Monte Albán. Lo integra Autos2, Motos2, Camión o Carga2.

Esto se puede observar dentro de la figura 5, donde se organizan las entidades utilizadas para cada una de las calles, siendo un total de 6. Gracias a esto se puede obtener de mejor manera los datos luego de simular las 24 horas.

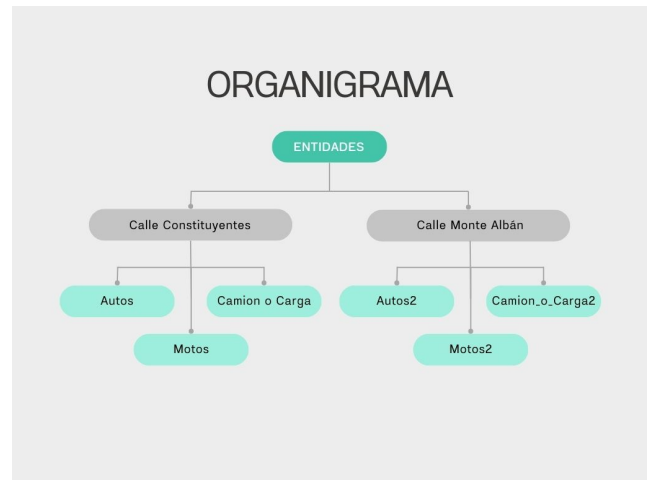


Figura 5: Organigrama de Entidades.

En la figura 6, se muestran los datos ingresados dentro de la pestaña de **Entidades** de ProModel, como lo es el ícono, el nombre de la entidad, la velocidad Ppm y sus estadísticas.

La velocidad de Ppm (Pies por minuto), a cada entidad se le asignó la velocidad promedio de ese tipo de vehículo (no máxima).

Icono	Nombre	Velocidad (Ppm)	Estadíst	Notas...
	Auto	200	Serie de tiempo	
	Camion_o_carga	300	Serie de tiempo	
	Moto	200	Serie de tiempo	
	Autos2	200	Serie de tiempo	
	Camion_o_carga2	300	Serie de tiempo	
	Motos2	200	Serie de tiempo	

Figura 6: Elaboración de Entidades en ProModel.

5.3.2. Locaciones

En el caso de las locaciones, representan los lugares por donde las entidades pasan.

Dentro de la figura 7, se pueden observar las diferentes Locaciones realizadas para cada una de las calles de la intersección, con un total de 20 locaciones diferentes que se pueden agrupar en 3 grupos:

Entradas. En este caso pertenecen a las calles de la intersección, son 2 carriles por calle, 4 en total para ambos sentidos. Incluye datos como:

- Icono. Se selecciona figura similar a un carril.
- Nombre. El de la calle a la que pertenecen más el número de carril.
- Capacidad. La cantidad de autos que caben en el carril. Se calcula conociendo la longitud de la calle.
- Unidades. Solo un carril.
- Reglas. Elegimos FIFO, ya que el primer vehículo en llegar es el primero en pasar.

Semáforos. En este caso son bases donde los vehículos pasan, los datos que los conforman son:

- Icono. Se selecciona la figura similar a un semáforo.
- Nombre. El número del semáforo.
- Capacidad. Se considera 2, ya que solo 2 vehículos pueden pasar un semáforo al mismo tiempo.
- Unidades. Solo un semáforo para ajustarlos individualmente.
- TMs. Se selecciona reloj, donde podremos especificar cosas como:

- Entidad. Especificamos el tipo de vehículo que vendrá.
- Locación. La calle (carril) en la que aparecerá.
- Cantidad por Arribo. La cantidad que aparece (la cual es 1).
- Primera Vez. Cuando pueden empezar a aparecer (segundo 0).
- Ocurrencias. La cantidad de veces que pueden aparecer (para nuestro sistema son infinitas, por lo que aparecen hasta que la simulación acabe).
- Frecuencia. La proporción obtenida de la herramienta Fit, de acuerdo al tipo de vehículo y la calle. En este caso se le otorga la proporción de tiempo más baja a los autos (ya que son los de mayor porcentaje), la media a las motos, y la más alta a los transportes pesados.
- Lógica. Se deja vacío.
- Deshabilitado. Podemos habilitar o deshabilitar los arribos de ciertas entidades en locaciones específicas, lo que nos permite conocer las estadísticas de algunos procesos.

- Icono. Se selecciona figura similar a un carril.
- Nombre. El de la calle a la que pertenecen más hacia donde van.
- Capacidad. La cantidad de autos que caben en el carril, en este caso infinitas por ser salida.
- Unidades. Solo un carril.
- Reglas. Elegimos FIFO, ya que el primer vehículo en cruzar es el primero en salir.

A continuación, la figura 8 muestra los datos ingresados dentro de la pestaña de **Localidades** de ProModel, donde se observa con claridad los íconos para cada locación, además de su respectivo nombre, capacidad, unidades, TMs, Estadísticas y Reglas.

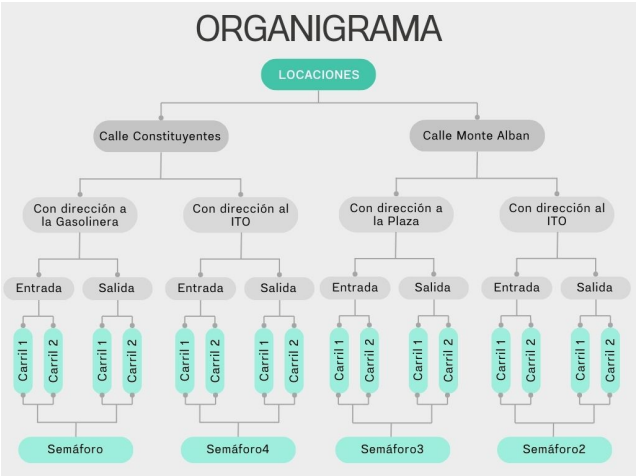


Figura 7: Organigrama de Locaciones.

Nome	Rotunda	Cap.	Utilizades	Tipo...	Estados	Região...	Notas...
	Constituintes_T0	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Panoforo	10	1	Reliz	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Constituintes_T00	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Falido_Gasimovai	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Falido_Gasimovai2	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Mueta_Alban_T0	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Mueta_Alban_T00	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Mueta_Alban_T00	50	1	Reliz	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Panoforo	10	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Falido_T0	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Constituintes_T0	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Mueta_Alban_Plane	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Mueta_Alban_Plane0	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Panoforo	10	1	Reliz	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Falido_Planetico	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Falido_Planetico0	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Constituintes_T0	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Constituintes_Gas0	15	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Panoforo	10	1	Reliz	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Falido_T0	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	
	Falido_T0	50	1	Quilopica	decisa de tempo	di Tempo, FIDO	

Figura 8: Elaboración de Locaciones en ProModel.

5.3.3. Arribos

En el caso de los arribos, los 3 tipos de vehículos pueden aparecer en todos los carriles, pero cada uno diferente a partir de la distribución obtenida de la herramienta **Fit**.

Esto se puede explicar mejor con la figura 9, pudiendo identificar el tipo de Entidad que arriba a cada carril de una calle específica, con el fin de mantener el orden.

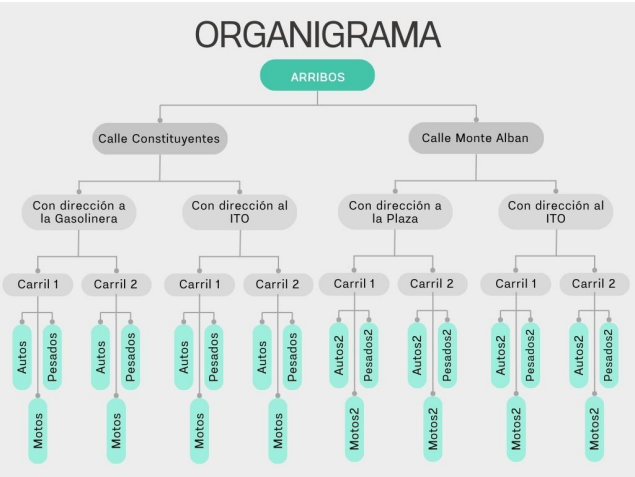


Figura 9: Organigrama de Arribos.

[illegible]

Figura 10: Elaboración de Arribos en ProModel.

5.3.4. Procesos

En los procesos se indica el paso de las entidades en cada uno de las locaciones, en este caso hay 2 grupos generales, los cuales se pueden observar en la figura 11, ambos grupos son los mismos pero involucran a las diferentes calles y entidades que les corresponden. Estos se clasifican segun las locaciones:

Calle hacia semáforo. En este caso, los datos ingresados son:

- Entidad. El tipo de vehículo que hace el proceso.
- Locación. En donde se encuentra.
- Operación. Queda vacía
- Enrutamiento:
 - Salida. El tipo de vehículo que realiza el proceso.
 - Destino. Hacia dónde va (semáforo).
 - Lógica de Movimiento. Move For 1 sec.

Semáforo hacia salida. En este caso, los datos ingresados son:

- Entidad. El tipo de vehículo que hace el proceso.
- Locación. En donde se encuentra (Semáforo).
- Operación. El tiempo que tarda en pasar el semáforo; en este dato se usan las distribuciones obtenidas en FIT de los autos que pasan en verde, asignando la proporción menor al auto, la media a la moto y la alta a los transportes pesados.
- Enrutamiento:
 - Salida. El tipo de vehículo que realiza el proceso.
 - Destino. Hacia dónde va (salida).
 - Lógica de Movimiento. Se queda vacía.

En las figura 12 y figura 13 se puede observar a las entidades en cada uno de los procesos, indicando inicialmente la locación de la que parten, y seguidamente en otra ventana a la locación en la cual terminan el proceso.

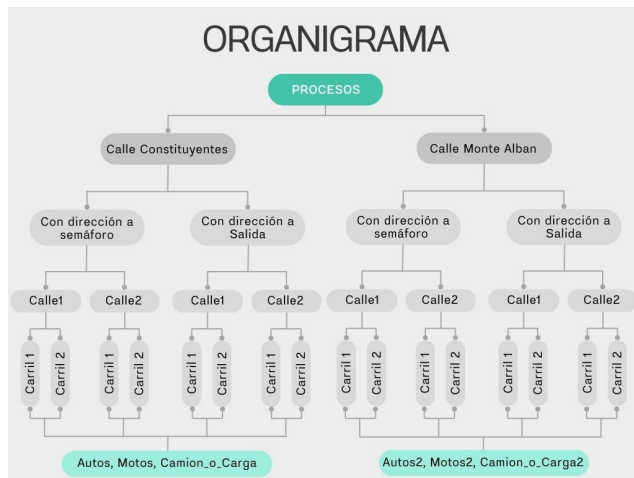


Figura 11: Organigrama de Procesos.

Entidad	Locación	Operación
Auto	Constituyentes_T0	Wait 0.0, 7.0 sec
Auto	Constituyentes_T02	Wait 0.0, 7.0 sec
Auto	Constituyentes_T02	Wait 0.0, 7.0 sec
Camion_o_Carga	Constituyentes_T0	Wait 0.0, 1.70 sec
Camion_o_Carga	Constituyentes_T02	Wait 0.0, 1.70 sec
Moto	Constituyentes_T0	Wait 0.0, 0.400 sec
Moto	Constituyentes_T02	Wait 0.0, 0.400 sec
ALL	Salida Constituyentes	
ALL	Salida Constituyentes	
Auto	MonteAlban_T0	Wait 0.0, 1.00 sec
Auto	MonteAlban_T02	Wait 0.0, 1.00 sec
Camion_o_Carga	MonteAlban_T0	Wait 0.0, 1.00 sec
Camion_o_Carga	MonteAlban_T02	Wait 0.0, 1.00 sec
Moto	MonteAlban_T0	Wait 0.0, 0.100 sec
Moto	MonteAlban_T02	Wait 0.0, 0.100 sec
ALL	Salida_T0	
ALL	Salida_T02	

Figura 12: Elaboración de Procesos en ProModel Parte 1.

Auto	MonteAlban_T0	Wait 0.0, 1.00 sec
Auto	MonteAlban_T02	Wait 0.0, 1.00 sec
Auto	MonteAlban_T02	Wait 0.0, 1.00 sec
Camion_o_Carga	MonteAlban_T0	Wait 0.0, 1.00 sec
Camion_o_Carga	MonteAlban_T02	Wait 0.0, 1.00 sec
Moto	MonteAlban_T0	Wait 0.0, 0.100 sec
Moto	MonteAlban_T02	Wait 0.0, 0.100 sec
ALL	Salida Constituyentes	
ALL	Salida Constituyentes	
Auto	Constituyentes_T0	Wait 0.0, 1.00 sec
Auto	Constituyentes_T02	Wait 0.0, 1.00 sec
Camion_o_Carga	Constituyentes_T0	Wait 0.0, 1.00 sec
Camion_o_Carga	Constituyentes_T02	Wait 0.0, 1.00 sec
Moto	Constituyentes_T0	Wait 0.0, 0.100 sec
Moto	Constituyentes_T02	Wait 0.0, 0.100 sec
ALL	Salida_T0	
ALL	Salida_T02	

Figura 13: Elaboración de Procesos en ProModel Parte 2.

6. Experimentos y Resultados

6.1. Diseño Experimental

Se realizaron 2 simulaciones, cada una con diferentes valores en las variables de tiempo del ciclo semafórico, con la intención de comparar sus resultados y determinar la mejor opción.

En este caso se presenta:

Escenario 1. Configuración Actual.

Escenario 2. Aumento del tiempo de luz verde en las calles de Constituyentes (10 seg), además de aumentar el tiempo de paso al peatón a 20 segundos.

6.2. Métricas de Evaluación

Los aspectos a evaluar son:

- Tiempo en sistema promedio.
- Tiempo vacío de los carriles y los semáforos.
- Utilización del semáforo.
- Cantidad de autos, motos y transportes pesados generados.

6.3. Análisis de Resultados. Escenario 1

Para poder iniciar con el análisis, la figura 14 nos muestra el diseño final del modelo de simulación del cruce Monte Albán y Constituyentes. En esta imagen podemos distinguir las calles y sus nombres, a parte de los 2 carriles que abarca cada calle, junto a sus entradas y salidas respectivas.

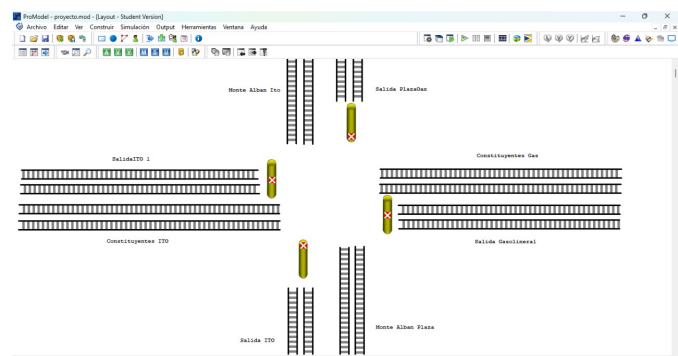


Figura 14: Diseño del modelo de simulación.

Basado en la figura 15 y la figura 16, el **Análisis** es el siguiente:

- El **Total Salidas (Flujo)** corresponde al número total de vehículos que pasan por la zona en 24 horas simuladas.
- El **Tiempo en Sistema Promedio** (que incluye el tiempo promedio que esperan en el semáforo y recorren la zona) es significativamente mayor para el flujo 1 (≈ 5 min) que para el flujo 2 (≈ 2 min), lo que indica una distribución de tiempos ineficiente y confirma la necesidad de ajustar el ciclo semafórico para balancear las esperas.



Figura 15: Flujo y Tiempos de Espera.

Nombre	Total Salidas	Tiempo En Sistema Promedio (Min)	Tiempo En Operación Promedio
Auto	2,834.00	4.92	
Camion o carga	1,546.00	4.64	
Moto	1,565.00	4.92	
Auto2	3,582.00	1.93	
Camion o carga2	294.00	2.19	
Moto2	888.00	2.04	

Figura 16: Cuadro de Indicadores de Rendimiento

La Figura 17 detalla el estado de las ubicaciones a lo largo del tiempo simulado:

- El color **Azul Oscuro** (% Vacío) indica el porcentaje de tiempo que el carril no está ocupado.
- El color **Azul Claro** (% Parte Ocupada) indica el tiempo que hay coches en el carril, formando fila.
- El color **Amarillo** (% Lleno) en los semáforos indica el tiempo que la capacidad máxima del semáforo está comprometida por el flujo vehicular.

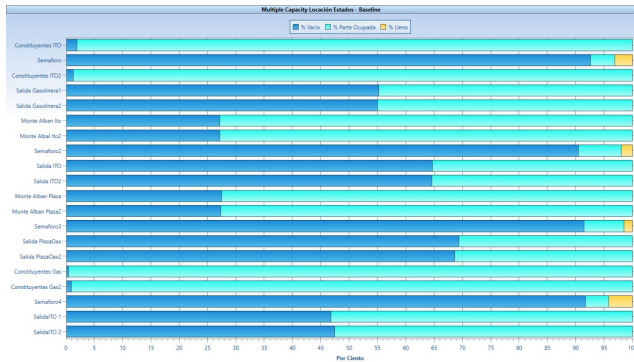


Figura 17: Estados de Locaciones.

Análisis de Locaciones Clave

- **Filas Largas (Constituyentes, Monte Albán):** Los carriles “Constituyentes ITO” y “Monte Albán Plaza” muestran un alto porcentaje en % **Parte Ocupada** (azul claro), lo que confirma las largas filas y la demanda insatisfecha.
- **Saturación de Semáforos:** Los semáforos, especialmente el “Semeforo” y “Semeforo3”, muestran un porcentaje significativo en % **Lleno** (amarillo). Esto indica que durante gran parte de la fase verde o inmediatamente después, las llegadas de vehículos están excediendo la capacidad de salida, lo que lleva a un **incremento en el tiempo de espera** (rosa) observado en el gráfico de estados de las entidades.
- **Flujos Asimétricos:** Se reitera que el flujo por Constituyentes (sin número) tiene una utilización de los carriles diferente al flujo de Monte Albán (con número 2), lo que justifica el desequilibrio en los tiempos de espera del sistema.

6.3.1. Análisis Detallado del Flujo: Constituyentes hacia la Gasolinera

Para obtener una visión específica de los problemas de congestión, se analiza la situación del flujo vehicular que transita por Constituyentes con destino a la gasolinera (Locación “Constituyentes Gas” y “Salida Gasolinera”). La figura 18 nos permite observar un ejemplo de la cola que se produce durante la simulación en ProModel.

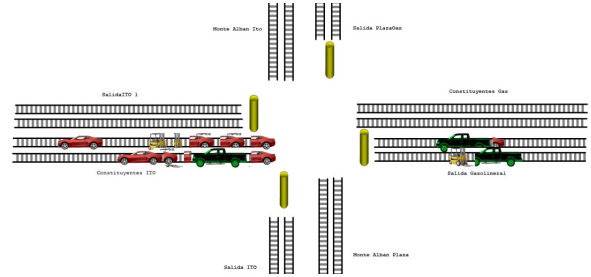


Figura 18: Congestión en Constituyentes.

La figura 19 nos proporciona datos como el Cuadro de Indicadores de Rendimiento, el Flujo y los Tiempos de espera para poder identificar lo siguiente para este flujo:

- **Ocupación (% Parte Ocupada):** Los carriles asociados a este flujo muestran un alto porcentaje de tiempo en estado **Parte Ocupada** (azul claro en el gráfico de locaciones), indicando que la fila de vehículos es una condición constante en la simulación.
- **Carga de Entidades:** Las entidades que circulan por esta calle (Entidades “Auto”, “Camion o carga”, “Moto”), presentan un **Tiempo en Sistema Promedio más alto** ($\approx 5,99 - 6,19$ minutos, según la Figura de Indicadores).
- **Efecto Semafórico:** El semáforo que regula este flujo es el segundo lugar en registra mayor tiempo en estado **Lleno** (amarillo) en el gráfico de locaciones. Esto significa que, a pesar de tener el semáforo en verde, la capacidad de salida se satura constantemente debido a la alta demanda, lo que provoca que la **cola no se disipe completamente** durante la fase verde.

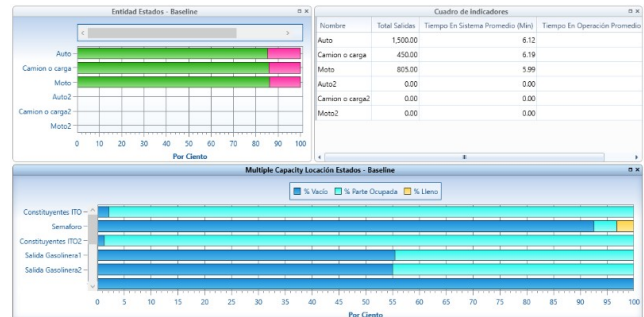


Figura 19: Estadísticas de Constituyentes hacia la Gasolinera.

Este análisis confirma que la **acumulación de vehículos** en Constituyentes hacia la gasolinera es uno de los principales cuellos de botella del escenario actual, y cualquier propuesta de mejora debe enfocarse en aumentar el tiempo de desalojo efectivo de esta locación.

6.3.2. Análisis Detallado del Flujo: Monte Alban hacia el ITO

A continuación, se realizará un análisis del flujo vehicular que transita por Monte Albán con destino al ITO (Locación “Monte Alban ITO” y “Salida ITO”). En la figura 20, se observa el paso de los vehículos por la intersección sin presentar alguna cola, esto es una constante durante las 24 horas de simulación en ProModel.

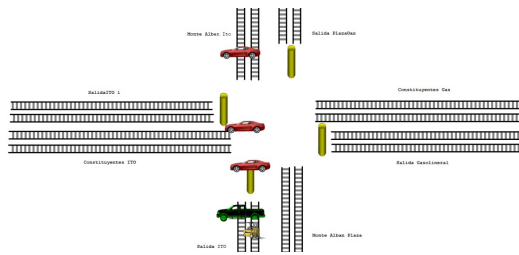


Figura 20: Flujo de Monte Albán hacia el ITO.

La Figura 21, nos otorga las mismas estadísticas, como el Cuadro de Indicadores de Rendimiento, el Flujo y los Tiempos de espera, lo cual nos revela lo siguiente para este flujo:

- **Ocupación (% Parte Ocupada):** Los carriles asociados a este flujo muestran un porcentaje alto de tiempo en estado **Parte Ocupada** (azul claro en el gráfico de locaciones), indicando que la fila de vehículos es una condición casi constante en la simulación, pero menor a comparación con las calles de Constituyentes.
- **Carga de Entidades:** Las entidades que circulan por esta calle (Entidades “Auto2”, “Camion o carga2”, “Moto2”), presentan un **Tiempo en Sistema Promedio más alto** ($\approx 1,96 - 2,21$ minutos, según la Figura de Indicadores).
- **Efecto Semafórico:** El semáforo que regula este flujo es el segundo en registra menor tiempo en estado **Lleno** (amarillo) en el gráfico de locaciones. Esto significa que, la capacidad de salida no se satura constantemente, debido a que la **cola si se disipa constantemente** durante la fase verde.

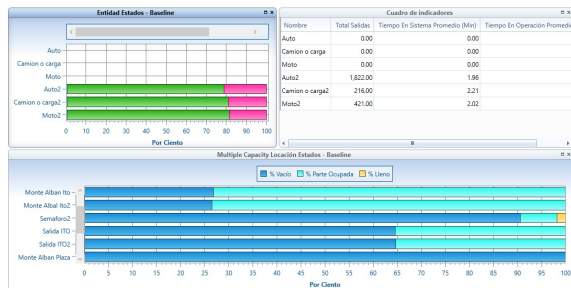


Figura 21: Estadísticas de Monte Albán hacia el ITO.

Gracias al análisis realizado, se deduce que la **acumulación de vehículos** en Monte Albán hacia el ITO no presenta problemas de tráfico. La reducción del verde efectivo en la locación es posible.

6.3.3. Análisis Detallado del Flujo: Monte Albán hacia Plaza Monte Albán

Para complementar los datos de las calles de Monte Albán, se realizará un análisis del flujo vehicular que transita por Monte Albán con destino a la Plaza Monte Albán (Locación “Monte Alban Plaza” y “Salida PlazaOax”).

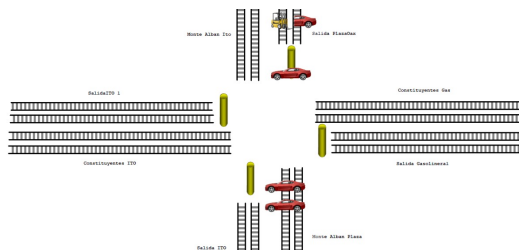


Figura 22: Flujo de Monte Albán hacia Plaza Monte Albán.

La figura 22, nos muestra el paso de los vehículos durante la simulación de 24 horas en ProModel, mostrando la similitud en el hecho de no formar colas.

Para poder realizar el análisis, la figura 23, nos otorga los datos del Cuadro de Indicadores de Rendimiento, el Flujo y los Tiempos de espera; con esta información, se puede revelar lo siguiente para este flujo:

- **Ocupación (% Parte Ocupada):** Los carriles asociados a este flujo muestran un porcentaje alto de tiempo en estado **Parte Ocupada** (azul claro en el gráfico de locaciones), indicando que la fila de vehículos es una condición casi constante en la simulación, con tiempos similares a su calle en sentido contrario.
- **Carga de Entidades:** Las entidades que circulan por esta calle (Entidades “Auto2”, “Camion o carga2”, “Moto2”), presentan un **Tiempo en Sistema Promedio más alto** ($\approx 1,95 - 2,46$ minutos, según la Figura de Indicadores).
- **Efecto Semafórico:** El semáforo que regula este flujo es el que registra menor tiempo en estado **Lleno** (amarillo) en el gráfico de locaciones. Esto significa que, la capacidad de su salida es la que menos se satura, debido a que la **cola si se disipa constantemente** durante la fase verde.

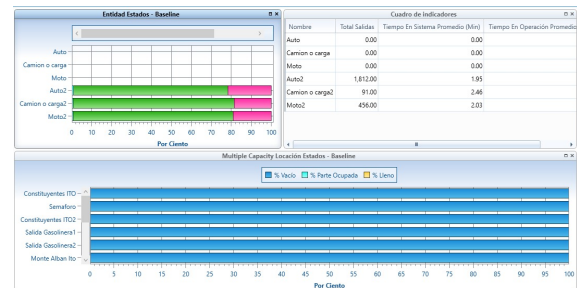


Figura 23: Estadísticas de Monte Albán hacia Plaza Monte Albán.

Con este análisis, se puede decir que la **acumulación de vehículos** en las calles de Monte Albán, no son el principal problema, por lo que la reducción del verde efectivo en sus semáforos es viable.

6.3.4. Análisis Detallado del Flujo: Constituyentes hacia el ITO

Para finalizar con los análisis, observaremos los datos de las calles de Constituyentes, se realizará un análisis del flujo vehicular que transita por Constituyentes con destino al ITO (Locación “Constituyentes Gas” y “Salida ITO”). La imagen 24, nos proporciona un ejemplo de las colas que pueden llegar a generarse durante la simulación de 24 horas en ProModel.

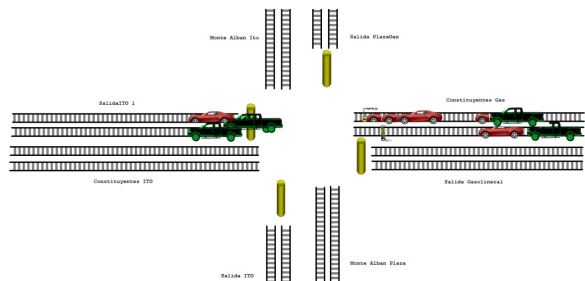


Figura 24: Congestión de Constituyentes hacia el ITO.

La Figura 25 muestra en detalle los datos necesarios para obtener:

- **Ocupación (% Parte Ocupada):** Los carriles asociados a este flujo muestran un porcentaje muy alto de tiempo en estado

Parte Ocupada (azul claro en el gráfico de locaciones), indicando que la fila de vehículos es una condición en la simulación, superando a su calle en sentido contrario.

- **Carga de Entidades:** Las entidades que circulan por esta calle (Entidades “Auto”, “Camion o carga”, “Moto”), presentan un **Tiempo en Sistema Promedio** muy alto ($\approx 4,52 - 4,65$ minutos, según la Figura de Indicadores).
- **Efecto Semafórico:** El semáforo que regula este flujo es el que registra el mayor tiempo en estado **Lleno** (amarillo) en el gráfico de locaciones. Esto significa que, la capacidad de su salida es la que más se satura, debido a que la **cola no se disipa constantemente** durante la fase verde.

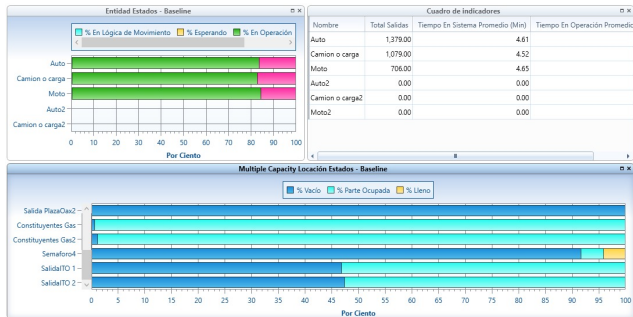


Figura 25: Estadística de Constituyentes hacia el ITO.

Con todos los análisis concluidos, se determina que la **acumulación de vehículos** en las calles de Constituyentes son el problema, por lo que el aumento del verde efectivo en sus semáforos es necesario.

El comportamiento del flujo vehicular puede observarse en el Anexo A).

6.4. Análisis de Resultados. Escenario 2

Para el escenario 2, se modificaron los datos del ciclo semafórico de los 4 semáforos, donde los semáforos de Constituyentes duran 10 segundos más en verde, y los de Monte Albán 10 segundos menos; además del tiempo del paso del peatón por ser una zona escolar, siendo este un aumento a 20 segundos. La figura 26 muestra un ejemplo de la simulación en ProModel.

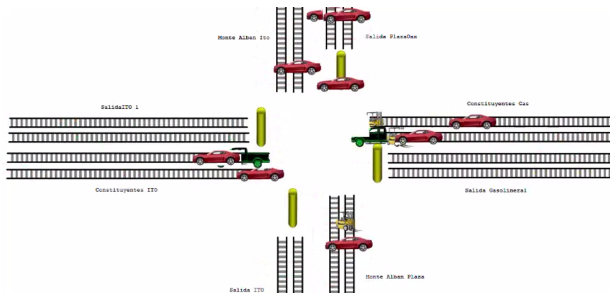


Figura 26: Diseño del modelo de simulación Escenario 2.

Utilizando los Estados de las Entidades y los Cuadros de Indicadores del Escenario 2 de la figura 27, el **análisis** es el siguiente:

- El **Total Salidas** (Flujo) corresponde al número total de vehículos que pasan por la zona en 24 horas simuladas.
- El **Tiempo en Sistema Promedio** es significativamente menor que el **Escenario 1**, lo que indica que la distribución de tiempos es mejor y confirma lo conveniente que puede ser ajustar el ciclo semafórico para balancear el tráfico.

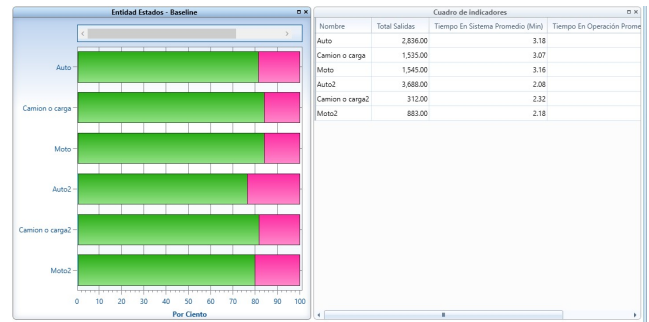


Figura 27: Flujo, Tiempos de Espera y Cuadro de Indicadores .

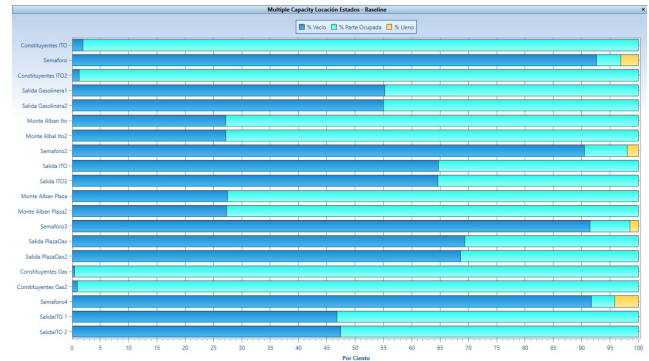


Figura 28: Estados de Locaciones

La Figura 28 muestra el estado de las ubicaciones a lo largo del tiempo simulado del Escenario 2:

- El color **Azul Oscuro** (**% Vacío**) indica el porcentaje de tiempo que el carril no está ocupado.
- El color **Azul Claro** (**% Parte Ocupada**) indica el tiempo que hay coches en el carril, formando fila.
- El color **Amarillo** (**% Lleno**) en los semáforos indica el tiempo que la capacidad máxima del semáforo está comprometida por el flujo vehicular.

6.4.1. Análisis de Locaciones Clave

- **Filas (Constituyentes, Monte Albán):** Los carriles muestran un menor porcentaje en **% Parte Ocupada** (azul claro), lo que confirma la modificación del ciclo semafórico reduce las filas y la demanda.
- **Saturación de Semáforos:** Los semáforos no muestran un cambio significativo en **% Lleno** (amarillo). Esto debido a que no aumentan ni disminuyen exageradamente los vehículos que pasan en las 24 horas de simulación, por lo que al aumentar o reducir los tiempos, los semáforos no muestran cambios.

El comportamiento del flujo vehicular del Escenario 2 puede observarse en el Anexo B).

6.5. Comparación

La Figura 29 muestra la comparación de los Estados de las Locaciones en el Escenario base y en el Escenario 2 a lo largo de las 24 horas simuladas, pudiendo obtener:

- El color **Azul Oscuro** (**% Vacío**) indica el porcentaje de tiempo que el carril no está ocupado en el Escenario base.
- El color **Turquesa Oscuro/Azul claro** (**% Vacío**) indica la diferencia del porcentaje de tiempo que el carril no está ocupado entre el Escenario base y el escenario 2.



Figura 29: Comparación Escenario base y Escenario 2.

- El color **Azul cielo** (**% Parte Ocupada**) indica el tiempo que hay coches en el carril, formando fila.
- El color **Amarillo** (**% Lleno**) en los semáforos indica el tiempo que la capacidad máxima del semáforo está comprometida por el flujo vehicular en el Escenario base.
- La línea **Negra** (**% Lleno**) en los semáforos indica la diferencia entre el tiempo que la capacidad máxima del semáforo está comprometida por el flujo vehicular en el Escenario base y el Escenario 2.

7. Discusión

7.1. Interpretación

Los resultados obtenidos en la simulación permiten identificar comportamientos consistentes con las observaciones del sistema real.

En el **Escenario 1** (configuración sin modificaciones), se observó que las calles correspondientes a Constituyentes presentan un tiempo vacío menor, lo cual indica una mayor demanda vehicular y una utilización más intensa del semáforo. Esto provoca la formación de colas en horas de mayor afluencia.

Por otro lado, las calles de Monte Albán registraron mayores tiempos vacíos, lo que sugiere que el semáforo asigna un tiempo de luz verde superior a la demanda actual.

En el **Escenario 2**, donde se incrementa el tiempo de luz verde para Constituyentes y se amplía el tiempo destinado al cruce peatonal, los resultados muestran una mejora moderada en la fluidez del tráfico. Aunque el número total de vehículos que cruzan la intersección no se modifica de forma notable, sí se observa un aumento en el tiempo vacío de los carriles más demandados, lo cual reduce la formación de colas y permite un tránsito más uniforme.

Esto nos confirma que un ajuste del tiempo de luz verde puede mejorar la eficiencia sin alterar la infraestructura existente, justificando la viabilidad de la propuesta.

7.2. Validación

Consideramos que, para poder realizar un buen modelo, debíamos acertar en los patrones observados en el campo, en este caso, los porcentajes de llegada y el ciclo semafórico.

Al obtener los resultados de la primera simulación, se compararon los patrones obtenidos con los observados en campo. El modelo reproduce de manera aproximada la relación entre tipos de vehículos (autos, motos y transporte pesado), con porcentajes muy cercanos a los medidos.

Esta aproximación se puede observar en la figura 30 y en la figura 31, ambas comparan el total de autos que pasan durante las 24 horas en ProModel y los 45 minutos que duró la observación, cada una de sus respectivas calles. Esto confirma que las distribuciones de llegada del modelo representan fielmente el sistema real.

Ciclo		
Motos	Autos	Pesados / Transporte
28	138	6
16.2790698	80.2325581	3.48837209
24 Horas en ProModel		
443	1824	101
18.7077703	77.027027	4.2652027

Figura 30: Vehículos totales en Monte Albán - Plaza Monte Albán

Ciclo		
Motos	Autos	Pesados / Transporte
18	37	11
27.2727273	56.0606061	16.6666667
24 Horas en ProModel		
788	1525	440
28.62332	55.3941155	15.9825645

Figura 31: Vehículos totales en Constituyentes - Gasolinera

7.3. Análisis de Escenarios

Escenario 1: Exhibe cuellos de botella en Constituyentes, con escasos tiempos en los que las calles se encuentran vacías.

Escenario 2: Ofrece la mejor relación entre utilización del semáforo y reducción de colas en la calle de Constituyentes, además de que el aumento del tiempo de paso peatonal mejora la seguridad sin afectar de manera crítica la capacidad vehicular.

Podemos concluir en que el Escenario 2 es el más conveniente, ya que optimiza la operación del semáforo considerando tanto la demanda vehicular como las necesidades peatonales.

7.4. Limitaciones

- No se pudo capturar más datos debido a que cerraron la calle de Monte Albán hacia Plaza Monte Albán.
- No se modeló interacción con peatones ni calles secundarias.
- La velocidad de los vehículos es constante.
- Los datos de entrada pueden ser afectados por condiciones fuera de nuestro alcance.
- El tiempo de observación de campo fue corto.
- No se modelaron los autos que cruzan en rojo.
- No se modelaron calles cerradas o casos de choque.

8. Conclusión y Trabajo Futuro

El estudio realizado busca resolver el problema de la congestión vehicular en el cruce **Monte Albán – Constituyentes**, donde los tiempos actuales del ciclo semafórico parecen no resolver la acumulación de autos. Mediante un modelo de simulación elaborado en **ProModel**, se evaluaron diferentes tiempos del ciclo semafórico.

La solución se pudo encontrar en el **aumento del tiempo de luz verde para las calles de Constituyentes** y otorgar un mayor tiempo de cruce peatonal, lo que mejora la fluidez del sistema sin afectar demasiado las calles de Monte Albán, además de facilitar el paso seguro de los peatones, en especial a los estudiantes.

Posiblemente exista una mejor configuración en los tiempos de los semáforos, en el tiempo del cruce del peatón, el uso de calles alternas o nuevas salidas, etc. Pero nuestro trabajo demostró una alternativa por medio de la simulación.

8.1. Trabajo Futuro

Para un trabajo futuro, se podría incorporar:

- Extender la recolección de datos a más días y horarios para obtener una visión más completa del comportamiento del flujo.
- Incorporar peatones y calles secundarias en el modelo para obtener una mayor precisión en el análisis de las interacciones.
- Modelar variaciones en la velocidad vehicular, condiciones climáticas y eventos inesperados (choques, calles cerradas) para hacer el modelo más robusto.
- Evaluar intersecciones cercanas para una sincronización semaforica, lo que permitiría analizar el impacto a nivel de red vial y no solo de un cruce.

Referencias

- [1] A. Caminos, “Simulación de semáforos y su aplicación a la circulación de vehículos en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA),” 39º JAIIO, 2010. [En línea]. Disponible: <https://39jaiio.sadio.org.ar/sites/default/files/39jaiio-jii-13.pdf>
- [2] Belge Consultoria, “ProModel — Simulador de eventos discretos”, Belge Consultoria. [En línea]. Disponible: https://www.belge.com.br/promodel_esp.php
- [3] H. E. Gómez, “Desarrollo de un modelo de simulación vehicular para la sincronización de semáforos,” INAOE, Puebla, México, Informe Técnico (tesis/trabajo), 2011. [En línea]. Disponible: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/379/1/GomezHE.pdf>
- [4] ProModel Corporation, “Stat::Fit — Software para ajuste estadístico de datos,” ProModel México, 2025. [En línea]. Disponible: <https://promodel.com.mx/stat-fit/>

Anexos

Anexo A. Video de Simulación 1

Escenario Base - Carpeta Drive

Anexo B. Video de Simulación 2

Escenario 2 - Carpeta Drive