4. APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO

En este capítulo se presenta un ejemplo de aplicación del SPME (Single Path Matrix Estimation o Estimación de la Matriz por Camino Sencillo), junto con el modelo de asignación vehicular recomendado que es el "Equilibrio del Usuario Estocástico" (SUE), al problema específico de la estimación de la matriz O-D para el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM).

Como ya se mencionó, dicha aplicación se efectuará utilizando el programa TransCAD.

Según los principios metodológicos presentados en los capítulos anteriores, el desarrollo del ejemplo requiere trabajar con los siguientes tres elementos básicos: un modelo de red de la región de interés (el AMCM), un conjunto de aforos en sitios importantes de dicha red y una matriz semilla. En una primera parte de este capítulo se describe cada uno de esos elementos. En una segunda parte se presenta la calibración de la matriz semilla y se discuten algunos resultados relevantes.

Dado que el proceso de calibración de la matriz semilla será contra valores de tránsito promedio diario anual (TPDA), medidos en sitios de la red considerada, la matriz O-D obtenida después de la calibración será de flujos vehiculares diarios. Como la matriz semilla se obtendrá de la contabilización de todos los vehículos registrados entre cada par O-D en estaciones de encuesta instaladas en diferentes sitios de la red, la matriz semilla así como la matriz O-D calibrada, serán de flujos vehiculares totales (p. ej. integrados por los flujos de automóviles, autobuses, camiones, etc.).

4.1 Descripción de los Elementos Básicos

4.1.1 La Red

En TransCAD, la especificación de la red para este ejemplo debe realizarse a través de tres capas de información o "layers": una para los límites geográficos de las jurisdicciones (Estados) que componen el área de estudio (AMCM), otra para los arcos de la red de transporte modelada, y una tercera para los nodos que delimitan dichos arcos. Cada una de las capas anteriores puede alimentarse al TransCAD a través de una base de datos de Visual Fox Pro.

La información de las tres capas para el área de estudio, fue obtenida a partir de trabajos anteriores que abarcaron todo el país (Referencias 37 y 38). En cada caso, se tomó la base de datos electrónica correspondiente.

En relación con la capa de límites, el área de estudio se integró por el Distrito Federal y los Estados de Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Puebla y Tlaxcala. En cada registro de la base de datos de esta capa se almacenaron los atributos de cada una de las siete jurisdicciones (área, perímetro, etiqueta, etc.).

La capa de arcos quedó integrada por 1,324 arcos (114 correspondientes a autopistas de cuota, 882 a carreteras libres, 188 a conectores de centroide de la subred de carreteras, etc.). En cada registro de esta capa se almacenó la información correspondiente a cada arco (longitud, identificador, etiqueta, etc.).

La capa de nodos quedó constituida por un total de 1,046 nodos, de los cuales: 161 son centroides y 885 son nodos regulares. En cada registro de esta capa se almacenó la información correspondiente a cada nodo (coordenadas geográficas, identificador, etiqueta, indicador de si el nodo es centroide o no, etc.). Cabe señalar que, en la red modelada, el identificador de cada nodo es un número de identificación. En el Anexo B se presenta el número de identificación asignado a cada uno de los 161 centroides.

Las tres capas anteriores fueron alimentadas a un archivo geográfico de TransCAD. La Figura 4.1 ilustra la representación en TransCAD del modelo de red considerado.

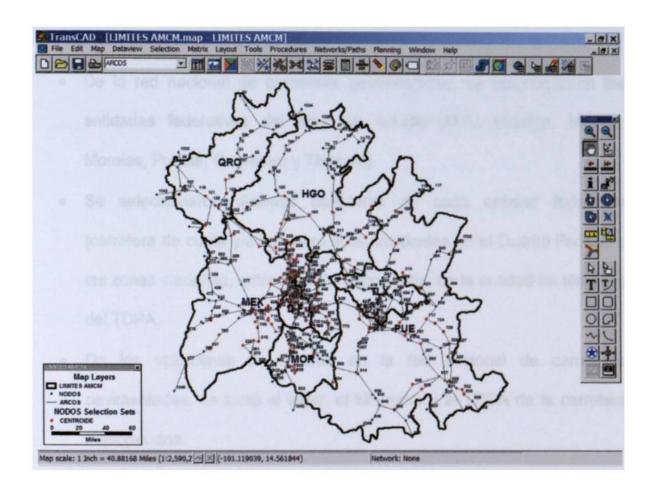


Figura 4.1 Representación en TransCAD del modelo de red del AMCM.

4.1.2 Los Aforos

Del archivo de Datos Viales de la SCT de 2004 (Referencia 39), se seleccionaron una serie de sitios de aforo con base en los siguientes criterios:

- De la red nacional de carreteras pavimentadas, se seleccionaron las entidades federativas del área de estudio (D.F., Hidalgo, México, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala).
- Se seleccionaron distintas carreteras de cada entidad federativa (carretera de cuota y/o carretera libre) incidentes en el Distrito Federal y las zonas aledañas, entre las más importantes de la entidad en términos del TDPA.
- De los volúmenes de tránsito en la red nacional de carreteras pavimentadas, se tomó el lugar, el kilómetro y el TPDA de la carretera seleccionada.
- En total, se seleccionaron 38 sitios de aforo. La Tabla 4.1 muestra la información obtenida de la Referencia 39 para cada uno de ellos.

Tabla 4.1

TPDA de las entidades federativas del área de estudio

EDO.	No. AFORO	LIMAR	TIPO	CARRETERA	120	TPDA
D.F.	1	MEDICO - CUERNAVACA	CUOTA	CASETA DE COSRO	23.30	13,820
	2	MEXICO - CUERNAVACA	LIBRE	T.IZQ. TEPOZTLAN	71.84	6,915
	3	CHALCO - MIXIQUIC		MOXQUIC	10.00	6,364
	4	MEXICO - LA MARQUESA	CUOTA	PUENTE CONAFRUT	0.00	20,459
	- 5	SAN GREGORIO - CAXTEPEC		SAN GREGORIO	0.00	8,121
98E9CO	•	MEXICO - YOLUCA		LIBRAMIENTO TOLUÇA	62.20	31,765
	7	MERCO - LA MARQUESA	CUOTA	MEDICO-TOLUCA	10.20	11,875
		MERCO - TIZAYLICA	CUOTA	OTUMBA-TIZAYUCA	53.46	8,924
	•	MEXICO - QUERETARO	CUOTA	JILOTEPEC-MARVILLAB	107.00	14,185
	10	TOLUCA - CD. ALTAMIRANO		T.DER. ZINACATEPEC	10.21	10,526
	11	MEXICO - PUEBLA	CUOTA	LOS REYES	20.00	39,874
	12	NAUCALPAN - TOLLICA		T DER LOMA LINDA	2.13	22,252
	13	LECHERIA - APAXCO		CUATUTITIAN	8.60	14,286
MEDALGO	14	TLAKCO	LIBRE	APIZACO-TEJOCOTAL	23.91	5,262
	18	MEXICO - PACHUCA	CUOTA	LIBRAMIENTO PACHUCA	80.60	19,322
	16	MEXICO - QUERETARO	CUOTA	CASETA DE COBRO "TEPOZILAN"	43.01	21,761
	17	ENT COLONIA - PORTEZUELO	1	DOMQUILPAN	75.20	13,461
'	18	VENTA DE CARPIO - T.C. (PACHUCA-TURPAN)		T C.PACHUCA-TUDPAN	94.09	4,764
	19	CUERNAVACA - ACAPULCO	CUOTA	CUERNAVACA	0.00	18,594
	20	SANTA BARBARA - IZUCAR MATAMOROS	1	CHATCO	0.00	16,042
MORELOS	21	SAN GREGORIO - OAXTEPEC		T DER YAUTEPEC	53.00	7,124
	22	SANTA BARBARA - IZUCAR MATAMOROS		T IZO. LIBRAMIENTO CUALITLA	77.05	18,207
	23	PUNTE DE IXTLA - IGUALA	CUOTA	PUENTE DE OCTLA	2.00	6,210
	24	AMOZOC - TEZIUTLAN		PUEBLA-CORDOBA (CUOTA)	1.40	10,806
	26	APIZACO - TEJOCOTAL		APIZACO	0.00	7,984
PUEBLA	26	PUEBLA - HUAJUAPN DE LEON	I	ATLIXCO	29.86	11,854
	27	MEXICO - PUEBLA	LIBRE	CHOLULA	119.50	14,213
	28	LOS REYES - ZACATEPEC	1	TEXCOCO	23.02	30,454
	29	LIB. NORTE QUERETARO	$\overline{}$	MEXICO-QUERETARO	8.00	23,974
'	30	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA		CADEREYTA DE MONTES	47.90	2,880
QUERETARO	31	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA		JALAPAN DE SIERRA	179.30	1,004
	32	TOLUCA - PALMILLAS		ATLACOMULCO	66.00	7,084
	33	SAN JUAN DEL RIO - XILITLA	\vdash	T.DER. LIB. SAN JUAN DEL MO	5.20	4,587
	34	CALPULALPAN - EL OCOTE		CALPULALPAN	0.00	7,664
	36	VILLA ALTA - T.C. (PUEBLA - TLAXCALA)	1	PUEBLA-TLAXCALA	22.05	4,886
TLAXCALA	36	LOS REYES - ZACATEPEC	1	UBRAMENTO DE HUAMANTLA	141 70	10,889
	87	PUEBLA-TLAXCALA	1	TLAXCALA	23.22	20,082
	26	SAN MARTIN TEXNELUCAN - TLAXCALA	1	SAN MARTIN TEXMELUCAN	0.00	13,856

La Figura 4.2 ilustra la ubicación de los 38 sitios de aforo seleccionados para este trabajo. Los números con los que se etiquetan los sitios de aforo en la

figura, corresponden al número secuencial dado a los mismos en la columna 2 de la Tabla 4.1.

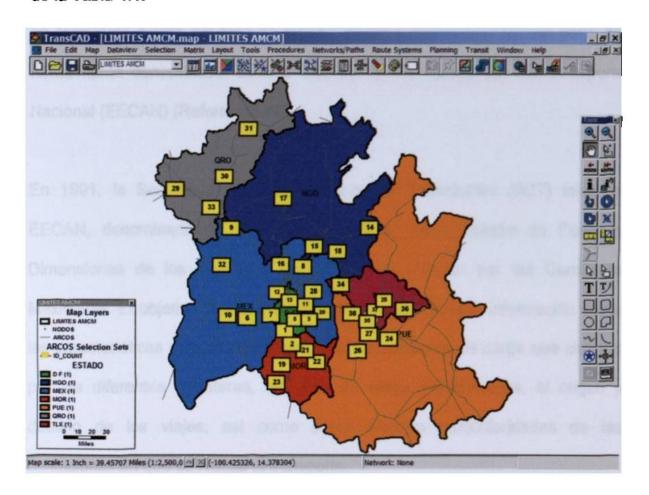


Figura 4.2 Representación en TransCAD de los 38 sitios de aforo seleccionados para el área de estudio.

4.1.3 La Matriz Semilla

Como ya se señaló en el Capítulo 3, el método SPME con asignación tipo SUE requiere de una matriz O-D semilla, sobre la que realiza una serie de ajustes iterativos con base en los aforos considerados, hasta obtener la matriz calibrada que, al ser asignada a la red, mejor reproduce los aforos.

Para el caso particular de este ejemplo, la matriz semilla fue generada a partir de una serie de estudios O-D realizados en estaciones de encuesta instaladas en carreteras dentro del área de estudio. Estos estudios O-D forman parte del formalmente denominado: Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional (EECAN) (Referencia 40).

En 1991, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) inició el EECAN, denominado en sus etapas iniciales como: Estudio de Pesos y Dimensiones de los Vehículos de Carga que Circulan por las Carreteras Mexicanas. El objetivo principal del EECAN ha sido generar información sobre las características más representativas de los vehículos de carga que circulan por las diferentes carreteras, los tipos de carga transportados, el origen y destino de los viajes, así como sobre algunas particularidades de las condiciones en que se realiza el transporte.

A partir de 1991, cada año se han realizado estudios en una serie estaciones de exploración instaladas en diferentes sitios de la red carretera nacional, que permiten obtener la información antes mencionada. Este trabajo utiliza la información correspondiente a las 10 estaciones de encuesta instaladas entre los años 1995 a 2003.

Los trabajos de campo que se realizan como parte del EECAN consisten en recopilar información en las carreteras seleccionadas, mediante una encuesta.

Hasta la fecha, la exploración de campo se ha llevado a cabo en sitios específicos o estaciones distribuidas por toda la red.

En general, en las estaciones se capta a todos los vehículos de carga que circulan por ellas, durante 24 horas, cuatro días consecutivos (martes a viernes). En primer lugar, se aplica un cuestionario a los conductores. Posteriormente, los vehículos se miden (en ocasiones) y pesan. Hasta 2002 se han instalado 155 estaciones, 10 en 1991; 3 en 1992; 15 en 1993; 18 en 1994; 21 en 1995; 11 en 1996; 20 en 1997; 13 en 1998; 7 en 1999; 4 en 2000 y 21 en 2001. En todas se ha aplicado la encuesta origen-destino.

Es importante señalar que en algunos años, como en 2002, las estaciones de campo no sólo se han instalado con objeto de estudiar el transporte de carga, sino también, por el interés de distintas dependencias de la SCT, se ha buscado investigar otros diversos aspectos de utilidad para esas dependencias, tales como el comportamiento de la demanda en las autopistas de cuota, el origen y destino de los automóviles y los autobuses, etc.

En 2002, por ejemplo, se incluyó en la encuesta a todos los vehículos (autos, autobuses y camiones); en el caso de los autos, se incluyó en el cuestionario el motivo del viaje (trabajo, escuela, compras, etc.), y en el caso de los autobuses, el número de pasajeros.

A partir del estudio en cada estación, se genera una base de datos en la que en cada registro se almacena la información correspondiente a cada vehículo encuestado. A su vez, en campos de dicho registro, se almacena la siguiente información para ese vehículo: sitio de origen del viaje, por población y entidad de origen; el sitio de destino del viaje, por población y entidad de destino; el tipo de vehículo (A, B o C según se trate de un automóvil, de un autobús o de un camión de carga); la cantidad y las unidades transportadas (p. ej. 40 pasajeros, 25 toneladas, etc.); y el tipo de carga, en caso de tratarse de un camión de carga.

Para este trabajo, se seleccionaron 10 bases de datos, correspondientes a 10 estudios O-D realizados en estaciones de encuesta instaladas de 1995 a 2003.

La Tabla 4.2 resume información general de cada una de las estaciones seleccionadas (p. ej. nombre, ubicación, fecha de encuesta y vehículos encuestados). El último rengión de la tabla indica que la muestra considerada para la obtención de la matriz semilla para este ejemplo se constituyó por 330,340 vehículos.

La Figura 4.3 ilustra la ubicación de las 10 estaciones. Los números con los que se etiquetan las estaciones en la figura, corresponden al número secuencial dado a los mismos en la columna 1 de la Tabla 4.2.

Tabla 4.2

Estaciones de encuestas O-D seleccionadas en el área de estudio

Estephin			Feeka					
No.	Membee	Carretora	Trusto	Tee	Man	Dig-Mass	Año	
1	Allecomulop	Taluca - Painilles	Pestajo - Allecomulco	Libro	88+100	29 Oct-01 Nov	1896	84,7%
2	El Refugio	Portezuelo - Palmilles	Jonacepe - Palmilles	Libro	67+000	27-30 May	2008	34,000
3	Las Rajas	Neutalpan - Tokoa	T tag. Chichicaspe - T.Der. Zolotepec	Libro	29-400	09-11 Jul	2003	21,200
4	San José	Pachuse - Tulencings	T.C. Vertin de Carple / Tulancingo - T.Iza, Lili. de Tulancingo	Libro	40-000	17-20 Oct	1005	0,00
5	Sen Mertin	Márico - Pueble	Ban Mertin Termetucan - Pueble	Cuote	91+000	12-15 Ago	2003	44,88
6	San Mateo	México - Pueble	Sen Medin Termetucan - T.Der Chotula	Libro	\$1+800	05-00 Ago	2000	30,540
7	Singitucen	Vente de Cerpio - T C. (Pachupa - Tulanoingo)	Piramides - T.C. (Peolsuce - Tulancingo)	Custe	71+600	08-08 Jun	2009	31,43
8	Tehultzingo	Pustis - Huguspen	Izucer de Matemores - Tenutzingo	Libro	147+000	22-26 Sep	1000	2,100
9	Yautapec	Cuementos - Cuestilizo	Yautepac - Coccyce	Libro	39-300	22-25 (sep	1999	9,171
10	Zumpengo	Iguale - Chilpancingo	Ent. Milpilina - Chilpanohingo	Libre	200+300	23-26 Sep	1996	10,140
<u> </u>						SUMA -		200,241

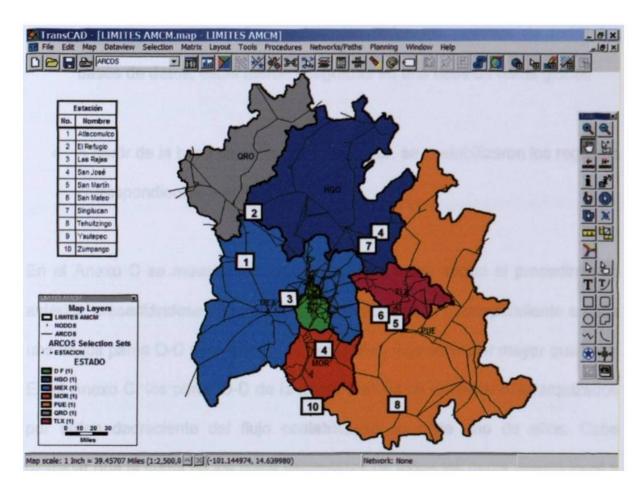


Figura 4.3 Representación en TransCAD de las 10 estaciones seleccionadas para el área de estudio.

El procedimiento seguido para la obtención de la matriz semilla a partir de las 10 bases de datos consideradas, fue el siguiente:

- Para cada registro de cada base de datos, a partir de la población y
 entidad de origen del viaje, de los 161 centroides considerados se
 seleccionó como centroide de origen aquél geográficamente más
 cercano a dicha población, ingresándose en un campo su identificador.
 El mismo procedimiento se realizó para registrar el identificador del
 centroide de destino.
- Una vez completado lo anterior para todos los registros de todas las bases de datos, éstas fueron integradas en una base de datos global.
- A partir de la base de datos global anterior, se contabilizaron los registros correspondientes a cada par O-D.

En el Anexo C se muestra la matriz semilla obtenida según el procedimiento anterior, presentándose en cada renglón la información correspondiente a cada uno de los pares O-D para los que se contabilizó flujo vehicular mayor que cero. En el Anexo C, los pares O-D de la matriz semilla se encuentran jerarquizados por orden decreciente del flujo contabilizado en cada uno de ellos. Cabe destacar que la suma de los flujos vehiculares de todos los pares resultó igual a 330,340 (vehículos encuestados en las 10 estaciones consideradas).

La Figura 4.4 muestra una representación gráfica, realizada en TransCAD, de los 36 pares O-D con mayor flujo contabilizado en ambos sentidos (con flujo en ambos sentidos superior a 1,000 vehículos). El flujo vehícular para todos los pares O-D se muestra en el Anexo C. Cabe señalar que el flujo total en ambos sentidos de los 36 pares en la Figura 4.4 (221,146 vehículos) representa el 66.94% del flujo contenido en toda la matriz semilla (330,340 vehículos).

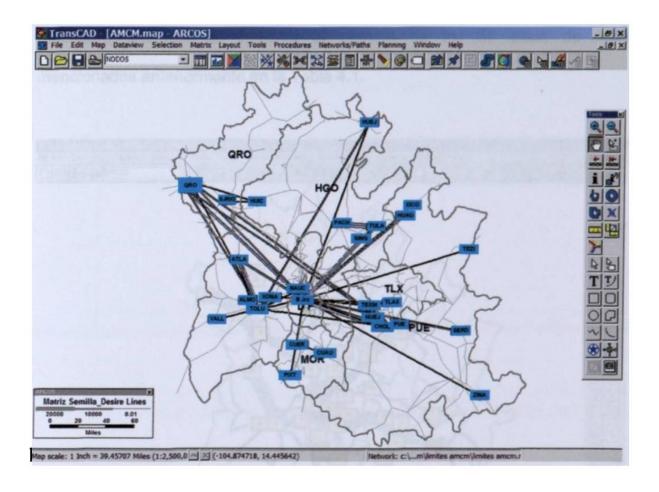


Figura 4.4 Representación en TransCAD de los 36 pares O-D con mayor flujo vehicular en ambos sentidos, obtenidos de la matriz semilla.

Posteriormente se realizó una asignación tipo SUE de la matriz semilla, a la red considerada. La Figura 4.5 muestra la representación gráfica de los flujos

asignados en todos los arcos, donde el ancho de la banda en cada arco es proporcional a la magnitud del flujo en los dos sentidos de dicho arco.

En la Figura 4.5 es evidente que los flujos de mayor magnitud resultantes de la asignación de la matriz semilla, se generan por las autopistas México-Querétaro, México-Puebla, México-Pachuca, México-Toluca, Toluca-Atlacomulco y Atlacomulco-Palmillas. Cabe sefialar que en la Figura 4.5, en recuadros amarillos se muestra el número de los 38 sitios de aforo mencionados anteriormente en la Tabla 4.1.

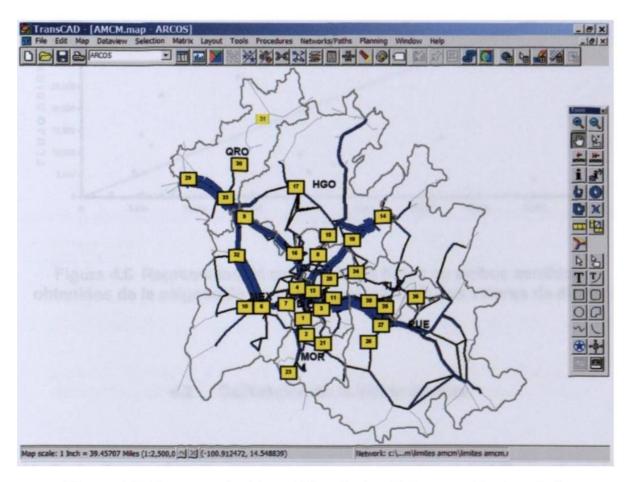


Figura 4.5 Representación gráfica de los flujos resultantes de la asignación de la matriz semilla.

La Figura 4.6 muestra una gráfica que compara los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación de la matriz semilla, contra los valores de aforo (TDPA) seleccionados, para los 38 sitios marcados en recuadros amarillos en la Figura 4.5. Como es evidente en la figura, los valores de flujo asignado son en general muy diferentes a los flujos reales (aforos). Un dato relevante obtenido de este análisis es que los flujos asignados resultaron, en promedio, un 54% de los reales.

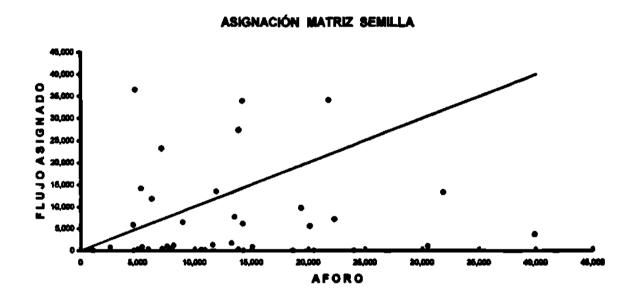


Figura 4.6 Representación gráfica de los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación de la matriz semilla, Vs. los valores de aforo.

4.2 Calibración de la Matriz Semilla

Mediante el procedimiento del TransCAD que resuelve el SPME, se ajustó la matriz semilla para que en una asignación tipo SUE, dicha matriz reprodujese los aforos considerados.

La Figura 4.7 muestra, en una representación gráfica, los 75 pares O-D con mayor flujo en ambos sentidos (con flujo en ambos sentidos superior a 1,000 vehículos). El flujo vehícular para todos los pares O-D se muestra en el Anexo C. Cabe sefialar que el flujo total en ambos sentidos de los 75 pares en la Figura 4.7 (408,564 vehículos) representa el 68.23% del flujo contenido en toda la matriz ajustada (595,850 vehículos).

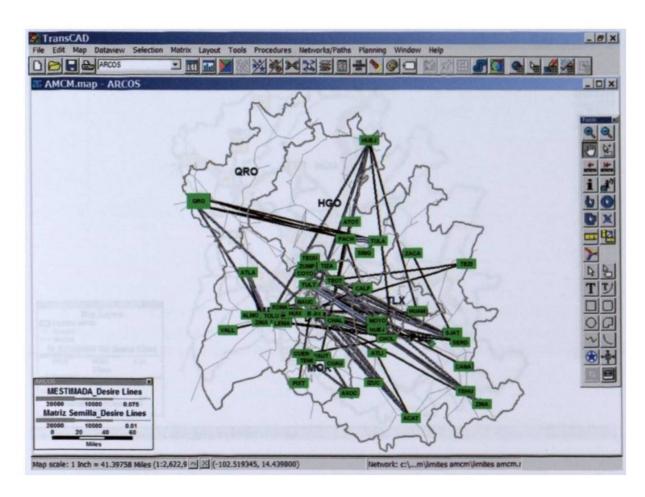


Figura 4.7 Representación en TransCAD de los 75 pares O-D con mayor flujo vehicular en ambos sentidos, obtenidos de la matriz estimada.

Como resultado de realizar la asignación tipo SUE de la matriz calibrada, sobre la red considerada, se obtuvo la Figura 4.8, en la cual se muestran los flujos asignados en todos los arcos.

Como puede observarse en la figura, los flujos de mayor magnitud resultantes de la asignación de la matriz estimada, al igual que cómo se obtuvo de la asignación de la matriz semilla, se generan por las autopistas México-Querétaro, México-Puebla, México-Pachuca, México-Toluca, Toluca-Atlacomulco y Atlacomulco-Palmillas.

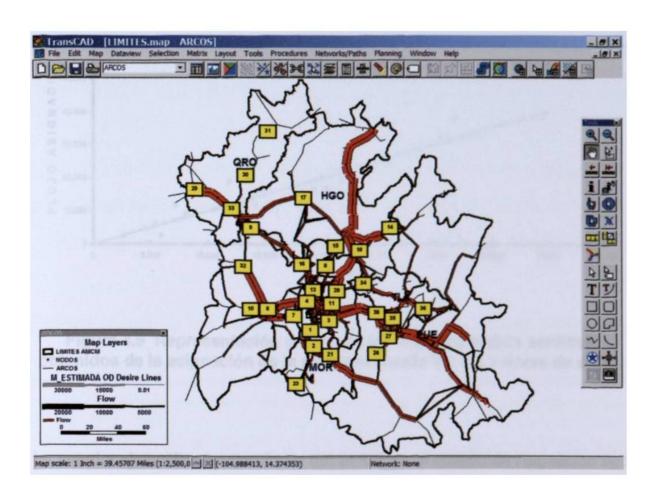


Figura 4.8 Representación gráfica de los flujos resultantes de la asignación de la matriz estimada.

Finalmente, la Figura 4.9 compara los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación calibrada, contra los valores de TDPA en los 38 sitios considerados. Como es evidente en esta figura, después de la calibración de la matriz semilla,

los valores asignados contra los reales en los 38 sitios considerados son muy similares, mejorando la correlación entre ambos parámetros anteriores (entre los flujos asignados y los reales) y escalándose los flujos asignados (96%) hasta alcanzar valores similares a los de los flujos reales.

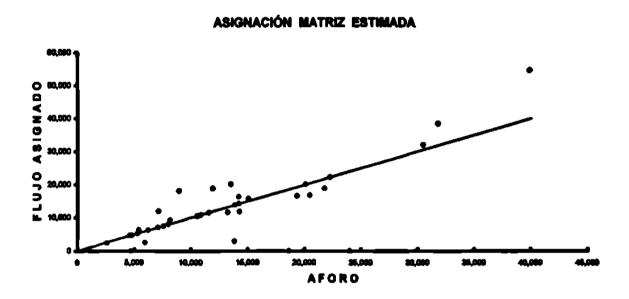


Figura 4.9 Representación gráfica de los flujos en ambos sentidos obtenidos de la asignación de la matriz estimada Vs. los valores de aforo.

Lo anterior ejemplifica las bondades del SPME en el modelo de asignación tipo SUE, para calibrar matrices O-D en problemas reales.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la estimación de matrices O-D a partir de aforos vehiculares es de considerable importancia en la planeación de los sistemas de transporte.

Utilizando los métodos de estimación de matrices a partir de aforos vehiculares, pueden estimarse a menudo modelos de tránsito más baratos y más fáciles que con los estudios O-D que son más extensos y costosos.

En este trabajo se han descrito algunos métodos para estimar matrices de viajes a partir de aforos vehiculares. Dichos métodos pueden ocuparse de aforos con inconsistencias e incertidumbres, pudiendo ser Implementados con cualquier método de asignación, incluso con el método de asignación "Equilibrio del Usuario Estocástico" (SUE). Si ocurren aforos inconsistentes, éstos no afectarán seriamente los resultados como en muchos otros métodos de estimación de matrices.

El primer método, SPME, es el más fácil de implementar, pero tiene una naturaleza más heurística que el segundo método, MPME. El MPME utiliza todos los aforos, a lo largo de todas las rutas, entre cada par de zonas para la

estimación; mientras que SPME sólo utiliza los aforos a lo largo del carnino óptimo. En estudios de casos prácticos, esto significa que MPME converge más fácilmente que SPME y que las soluciones dan mejores ajustes para los aforos y estimaciones más razonables para las matrices. Sin embargo, en ambos métodos se obtienen mejoras significativas, comparadas con la matriz semilla. Esto se da particularmente en el caso de redes donde ocurren a menudo elecciones múltiples de rutas, como en la mayoría de las áreas urbanas.

El principal aspecto a considerar para los planificadores, es que ambos métodos son bastante fáciles de llevar a cabo y convergen dentro de tiempos de cálculo razonables. Esto se ha logrado construyendo los métodos sobre supuestos y mecánicas bastante simples, en lugar de formularlos como programas matemáticos. SPME es más simple de implementar, debido a que puede utilizarse con los diferentes métodos de asignación.

Tanto SPME, como MPME dependen del modelo de la matriz semilla (si hay menos aforos que en los elementos de la matriz, como normalmente es el caso), pero ambos métodos pueden alterar dicho modelo significativamente para lograr el mejor ajuste con los aforos. Ésta es una ventaja en los análisis de bajo presupuesto, donde una matriz existente (a menudo antigua) debe ser actualizada para ser la base para estimar un nuevo modelo de tránsito, a fin de utilizarla como matriz pivote en el modelo o para ser utilizada directamente en la estimación de flujos para nuevos caminos.

Este trabajo muestra una metodología que se recomienda para generar mejores estimaciones de la demanda de transporte entre las diferentes zonas de un área determinada de estudio. La metodología mostrada es sencilla y por lo mismo fácil de utilizar en problemas reales, que suelen ser de tamaño considerable.

Se recomienda lograr mayores avances en trabajos futuros explorando la aplicación de métodos que mejoren la calidad de las estimaciones (p. ej. MPME), con niveles similares de versatilidad en la obtención de las soluciones.