I. INTRODUCCION

El desarrollo que se está presentando en México, es una etapa de transformación y progreso para mejorar, en términos de dignidad y conveniencia humana; por lo tanto, el desarrollo significa una transformación óptima a través del uso más racional de los recursos y, lo que es má importante, de los valores existentes o potenciales de las personas que participan en ese proceso.

En atención a lo interior, podemos decir que una de las manifestaciones más evidentes de la evolución y del grado de desarrollo de un país depende, en gran medida, de una buena infraestructura vial; capaz de soportar las necesidades de movimientos del tránsito vehicular que se demanda y que se demandará en un cierto período de tiempo.

Todo esto puede lograrse a través de una adecuada planeación, tanto en la zona urbana como en la rural. La planeación sin las herramientas adecuadas, conducirá a problemas graves y a soluciones improvisadas y quizá muy costosas.

En el área de las carreteras, los análisis de capacidad y de nivel de servicio son un punto importante en la etapa estratégica de la planeación, pues son elementos primordiales en la toma de decisiones para las ampliaciones, las construcciones, el mantenimiento, la conservación y la operación de las mismas.

En general, la capacidad de una infraestructura se define como la máxima razón horario, en la cual los vehículos pueden pasar por un punto, una sección uniforme o un carril de un camino durante un período de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes del camino, del tránsito y de control.

Se debe reconocer el carácter estocástico del cálculo de la capacidad, que lo asocia a una cierta probabilidad, por lo que éste puede ser mayor o menor en un instante dado. La capacidad se define para condiciones prevalecientes, que son factores que al variar la modifican.

ANTECEDENTES

Desde 1991, la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L, a través de su DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE INGENIERIA DE TRANSITO, realizó estudios en esta línea de investigación; un ejemplo de ello fue el convenio realizado con el Instituto Mexicano del Transporte, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, que ha apoyado el desarrollo de diversos proyectos de investigación. Uno de los resultados obtenidos fue la determinación del valor máximo entre la relación Velocidad-Volumen, indicador principal de la capacidad máxima que puede soportar una infraestructura vial, en condiciones ideales.

Esta tesis formará parte de una serie de investigaciones que demandan ser realizadas para fortalecer los análisis que en materia de capacidad en carreteras multicarriles se ha venido desarrollado en nuestro país.

SITUACION ACTUAL

Actualmente, para los análisis de capacidad y nivel de servicio, se ha estado utilizando en México el "Highway Capacity Manual" (edición 1985 de los Estados Unidos de América), manual que fue diseñado exclusivamente para las condiciones que imperan en aquel país.

En los últimos años, nuestra infraestructura vial no solamente no ha crecido sino que se encuentra en latente deterioro, debido a la situación económica del país y a la falta de soporte técnico por parte de stras autoridades, en la asignación de recursos económicos para la construcción de obras viales que sean verdaderamente prioritarias. Esto ha redundando en que gran parte de nuestro sistema vial se encuentre en malas condiciones.

IMPORTANCIA

Si esta tesis pretende determinar el efecto que causa el estado superficial del pavimento en la capacidad vial, con el objeto de ajustar las condiciones físicas prevalecientes de nuestras carreteras en los cálculos de capacidad; por lo tanto, los resultados obtenidos de estos análisis nos representarán las condiciones reales en que operan nuestras carreteras. Conociendo esto, podremos implantar estrategias que ayuden a mejorar la eficiencia operativa de nuestra infraestructura vial.

IMPLICACION

Este estudio es elemento primordial de un "MANUAL DE CAPACIDAD PARA CARRETERAS MEXICANAS", meta que se logrará con la participación técnica de investigadores, tanto de Instituciones educativas como gubernamentales, para beneficio y progreso de nuestro país.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Determinar el efecto que causa el estado superficial del pavimento en el cálculo de la capacidad vial de las carreteras multicarriles.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

* Determinar los valores de la relación: velocidad de operación e IIR (Indice de Rugosidad Internacional).
* Proponer los valores de ajuste más fieles a la realidad; para diferentes índices de rugosidad (IIR) que se presentan en las carreteras mexicanas.
* Ahorrar en horas-hombre, por la disminución de ciertas demoras.
* Disminuir la contaminación ambiental generada por algunas demoras ocasionadas, al implantar las medidas obtenidas de los análisis de capacidad "ajustados".
* Facilitar a las autoridades de distintos niveles la toma de decisión, en la construcción o reconstrucción de las infraestructuras viales.
* Incrementar los beneficios económicos y sociales para los transeúntes a un bajo costo, obteniendo con ello elevados indicadores de rentabilidad.

III. HIPOTESIS

Los valores que se utilizan para determinar la capacidad y los niveles de eficiencia tanto en el diseño como en la operación de las carreteras mexicanas son diferentes a los que se utilizan en los Estados Unidos de América, ya que las condiciones del estado superficial del pavimento que imperan en México son distintas a las de aquel país.

Si se comprueba la hipótesis de que el mal estado superficial del pavimento influye en la reducción de la capacidad vial, seguir utilizando las normas emanadas del funcionamiento de las carreteras de los Estados Unidos de América, sin ajustar este efecto, traerá como consecuencia el cometer errores en la planificación, el diseño y la construcción de la infraestructura vial de México. La optimización de los recursos y la eficiencia operativa exigen la determinación de normas propias para las condiciones generalizadas en las carreteras de la República Mexicana.

IV. DEFINICION DE CONCEPTOS DE CAPACIDAD VIAL

IV.1. Tipos de vías

Las vías pueden clasificarse, generalmente, en dos categorías:

1. *Las de circulación continua:*

Estas no tienen elementos tales como los semáforos, que son externos a la corriente del tránsito y que causen interrupciones.

Las condiciones de la corriente del tránsito son el resultado de las interacciones entre los vehículos y la corriente del tránsito y entre los vehículos y las características geométricas, además del entorno del camino.

2. *Las de circulación discontinua:*

Estas tienen elementos que causan interrupciones a la corriente del tránsito como pueden ser: semáforos, las señales de alto y otros tipos de control. Estos dispositivos causan al tránsito suspensiones periódicas, independientemente del tránsito que exista.

Tanto la circulación continua como la discontinua son términos que describen el tipo de vía en estudio y no la calidad de la corriente del tránsito, en un tiempo determinado.

El análisis de estos tipos de vías varía considerablemente. Las primeras no tienen interrupciones de tiempo, en el uso del espacio del camino. En cambio, en las segundas, se debe considerar el impacto de las interrupciones. Por ejemplo, un semáforo limita la porción de tiempo, de ese tiempo que está disponible para varios movimientos, en una intersección. La capacidad no sólo está determinada por el espacio físico, sino también por el tiempo en uso de que se disponga para los movimientos en la corriente del tránsito.

IV.2. Conceptos de capacidad y Nivel de servicio

Capacidad:

Está definida como el valor de flujo máximo horario en el cual, de manera razonable, puede esperase que las personas y los vehículos pasen por un punto o una rama uniforme de un carril o de un camino durante un período de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, del camino y de los controles.

El período de tiempo usado para la mayoría de los análisis de capacidad es de 15 minutos, el cual es considerado como el período más corto, ahí donde existiese un flujo estable.

La definición de capacidad asume que existen buenas condiciones de clima y de pavimento.

Las condiciones del camino:

Se refieren a las características geométricas de una calle o de un camino, e incluye: el tipo de vía y el desarrollo de su entorno, el número de carriles y acotamientos, los espacios libres laterales, la velocidad de diseño y los alineamiento verticales y horizontales.

Las condiciones del tránsito:

Se refieren a las características de la corriente del tránsito que usa las vías. Están definidas por la distribución de los tipos de vehículos en la corriente del tránsito, la cantidad y distribución del tránsito en los carriles disponibles de la vía y la distribución direccional del tránsito.

Condiciones de control:

Se refiere a los tipos y diseños específicos de dispositivos para el control y reglamentos del tránsito presentes en la vía. La localización, el tipo y sincronía de los semáforos son condiciones de control críticas que afectan a la capacidad. Otros controles importantes incluyen a las señales de alto y ceda el paso, las restricciones de los usos de carriles, restricciones de vueltas y medidas similares.

Niveles de servicio:

Se define como una medida cualitativa que describe las condiciones operacionales dentro de la corriente del tránsito y su percepción por el conductor y el pasajero. Una definición de nivel de servicio generalmente describe estas condiciones en términos tales como velocidad y tiempo de recorrido, libertad de maniobra, interrupciones del tránsito, confort y comodidad y seguridad.

Se han definido 6 niveles de servicio para cada tipo de vía; a las que se han asignado las letras de la ***A*** a la ***F***. Es el nivel de servicio ***"A"*** el que represente las mejores condiciones de operación y el nivel de servicio ***"F"*** el de las peores condiciones.

1. *Definiciones de los niveles de servicio para la circulación continua:*

*Nivel de servicio **A**:*

Representa al flujo libre. Los usuarios no se ven afectados por ningún interruptor en la corriente del tránsito.

*Nivel de Servicio **B**:*

Está en el rango de un flujo estable pero la presencia de pocos usuarios en la corriente del tránsito es notoria.

*Nivel de Servicio **C**:*

Está en el rango de flujo estable; pero marca el inicio del rango de flujo en el cual la operación de los usuarios en forma individual empieza ser afectada significativamente por la interacción con otros usuarios en la corriente del tránsito.

*Nivel de Servicio **D**:*

Representa alta densidad, pero un flujo estable.

*Nivel de Servicio **E**:*

Representa condiciones de operación muy cercanas al nivel de mínima capacidad.

*Nivel de Servicio **F**:*

Se usa para definir un flujo forzado, o los embotellamientos.

2. *Valor de flujo de servicio:*

Es el valor máximo horario en el cual, en forma razonable, puede esperarse que las personas y los vehículos pasen por un punto o un tramo uniforme de un carril o de un camino durante un período de tiempo dado. bajo las condiciones prevalecientes del camino, del tránsito y los controles; mientras se mantenga un nivel de servicio establecido.

Debido a que los valores del flujo de servicio son los máximos para cada nivel de servicio, ellos definen los límites de flujo entre los distintos niveles de servicio.

3. *Medidas de eficiencia:*

Para cada tipo de vía, los niveles de servicio se definen basándose en uno o más parámetros que pueden describir mejor la calidad de la operación del tipo de vía de que se trate. Estos parámetros seleccionados son llamados "Medidas de Eficiencia" y representan las medidas disponibles que mejor describen la calidad de la operación de las vías.

Tabla Nº 1
DISTINTAS VIAS Y SU EFICIENCIA

TIPO DE VIA	***MEDIDA DE EFICIENCIA***
Tramos básicos de autopistas - DENSIDAD	(vl/mill/carr)
Zonas de entrecruzamiento	Vel. promedio de viaje (mill /h)
Enlaces	Valores de flujo (vl/h)
Carretera de carriles múltiples	Densidad (vl/ mill /carr)
Carretera de dos carriles	Porcentaje de demora (%)
	Vel. promedio de viaje (mill /h)
Intersecciones semaforizadas - DEMORA	(seg/veh)
Intersecciones no semaforizadas	Capacidad de reserva (vl/h)
Arterias	Velocidad promedio de viaje (mill /h)
Transporte público	Factor de carga (per/asiento)
Peatones	Espacio (pies 2/pea)

IV.3. Principios básicos sobre el flujo del tránsito

El estado operativo de cualquier corriente de tránsito está definido por tres medidas principales:

- *La Velocidad*
- *El Volumen y/o Valor de flujo*
- *La Densidad*

- *La Velocidad:*

Está definida como la relación de movimiento expresada como distancia por unidad de tiempo. La medida más utilizada es la velocidad promedio de recorrido (velocidad global). Se usa esta medida debido a que se obtiene fácilmente por medio de observaciones de vehículos en la corriente del tránsito (Método del Vehículo Flotante).

Hay que hacer notar que los tiempos obtenidos incluyen las demoras debidas a las interrupciones o a los embotellamientos del tránsito. No hay que confundir esta medida con la velocidad promedio de marcha (velocidad de marcha) que está definida como la distancia dividida entre el tiempo promedio de marcha para cruzar esa distancia. Esta incluye solamente el tiempo en que el vehículo está en movimiento.

En el flujo continuo, cuando se opera bajo condiciones libres, la velocidad global y la velocidad de marcha son iguales.

• *El Volumen y/o Valor de flujo*

Son dos medidas que cuantifican la cantidad del tránsito que pasa por un punto, un carril o un camino, durante un intervalo de tiempo dado.

* *Volumen*: Es el número total de vehículos que pasan por un punto dado, o una sección de un carril o un camino, durante un período de tiempo dado. Los volúmenes pueden ser expresados en períodos anuales, diarios, horarios y subhorarios.

* *Valor de Flujo*: Es el valor horario equivalente a aquéllos en los que los vehículos pasan por un punto dado, una sección de un carril o un camino, durante un intervalo de tiempo dado, menor que una hora; generalmente es de 15 minutos.

La diferencia entre el volumen y el valor de flujo es muy importante. El volumen es el número actual de vehículos observados o asignados que pasan por un punto durante un intervalo de tiempo. El valor de flujo representa el número de vehículos que pasan por un punto durante un intervalo de tiempo menor que la hora, pero expresada como un valor horario equivalente.

El valor de flujo se obtiene tomando el número de vehículos observados en un período menor que la hora, dividiéndolo entre el tiempo (en fracción de horas), en el cual fueron observados.

El valor de flujo de máxima demanda se obtiene mediante la utilización del factor horario de máxima demanda el cual esta definido como el cociente que resulta de dividir el volumen horario total entre el valor de flujo máximo de 15 minutos, dentro de la hora.

Matemáticamente su expresión es:

$$PHF = Vhm / (4 * V15)$$

Donde:

PHF=Factor horario de máxima demanda.

Vhm= Volumen horario (horario de máxima demanda).

V15= Volumen de los 15 minutos máximos en la hora de máxima demanda.

En la mayoría de los análisis serán usados los valores de flujo en el período de máxima demanda.

Cuando se conoce el factor horario de máxima demanda, éste se puede utilizar para convertir el valor del volumen de máxima demanda a otro valor de flujo de máxima demanda como sigue:

$$V = Vhm / PHF$$

Donde:

V= Valor de flujo para el período de 15 minutos máximo.

PHF=Factor horario de máxima demanda.

Vhm=Volumen de la hora de máxima demanda.

- *La Densidad:*

Está definida como el número de vehículos que están en una determinada longitud de un carril o de un camino y se expresa en vehículos por milla.

Medir la densidad en el campo es difícil, pues se necesita un punto elevado desde el cual se pueda fotografiar, videograbar y observar longitudes significativas del camino; sin embargo, de la velocidad global y del valor de flujo, que son mas fáciles de calcular, puede obtenerse la densidad así:

$$V = S * D$$

Donde:

V= Valor de flujo (veh/h).

S= Velocidad global (mill /h).

D= Densidad (veh/ mill).

La densidad es un parámetro crítico que describe las operaciones del tránsito, describe la proximidad entre los vehículos y refleja la libertad de los conductores dentro de la corriente del tránsito.

IV.4. Características de la circulación continua

Aunque la relación $V = S * D$ algebráicamente permite, para un valor de flujo dado, que ocurra un número de combinaciones de velocidad y densidad, existen relaciones adicionales que restringen la variedad de condiciones de flujo que puedan existir en una vía determinada.

La figura IV.1, muestra la forma general de estas relaciones, las cuales son básicas para el análisis de capacidad de las vías con circulación continua. La forma exacta de estas curvas y su calibración numérica depende de las condiciones prevalecientes del tránsito y del camino que existe en el tramo en estudio. Debe notarse que las curvas calibradas para vías específicas pueden ser discontinuas, cercanas a la capacidad.

Según la nota, el valor de flujo F1 ocurre bajo dos condiciones muy diferentes:

1. Cuando no hay vehículos en la vía, la densidad es cero y el valor de flujo es también cero. La velocidad es puramente teórica para esta condición y podría ser cualquier velocidad que seleccionara el primer conductor, la cual se presume que sea alta.

2. Cuando la densidad sea tan alta que todos los vehículos se detengan (la velocidad es cero), el valor de flujo será cero, porque no hay movimiento y los vehículos no podrán "pasar" por un punto del camino.

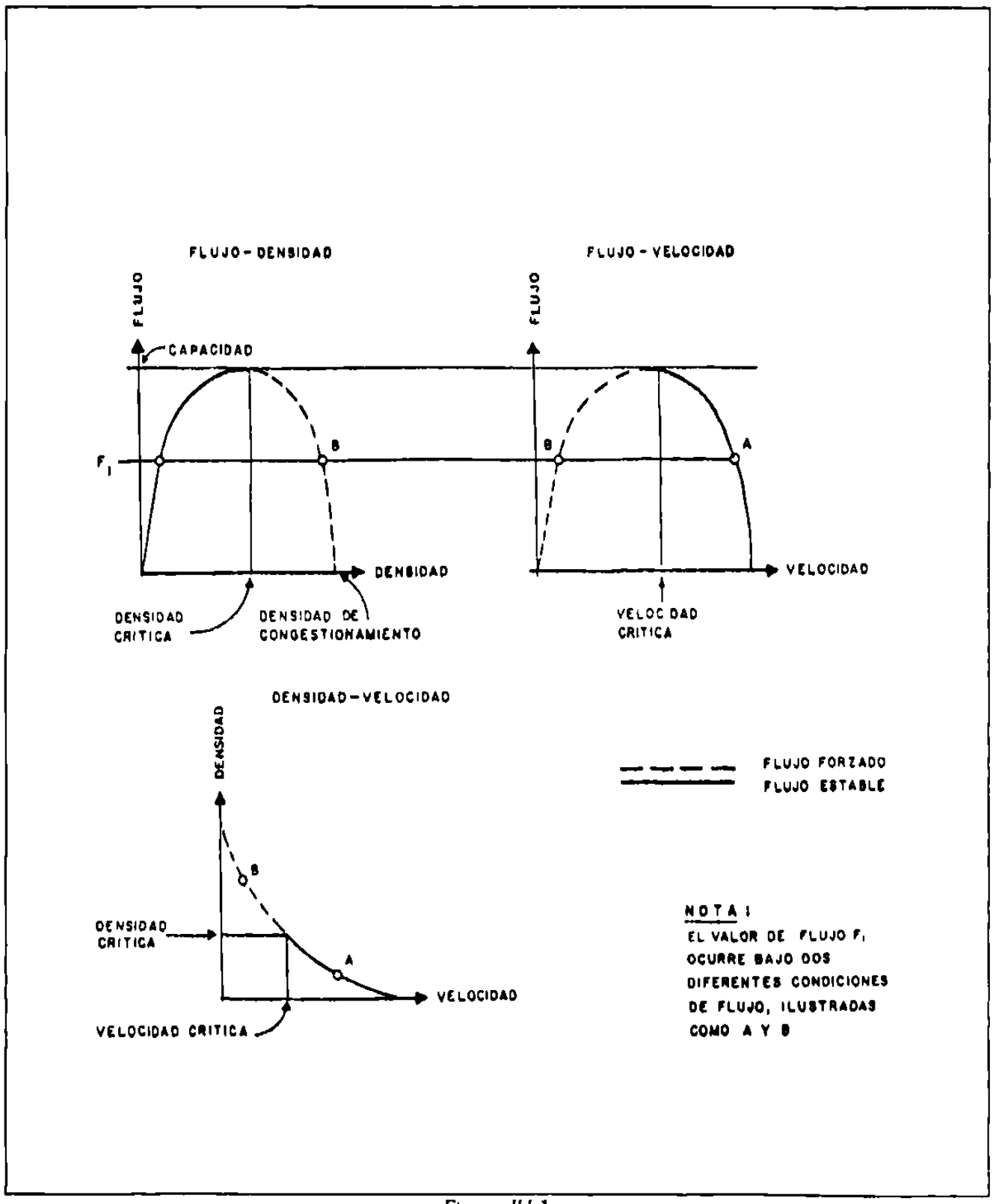


Figura IV.1
Relaciones entre velocidad, flujo y densidad.

A la densidad en la cual todo el movimiento se detiene se le llama densidad de congestionamiento. Dentro de estos dos puntos extremos, la dinámica del flujo del tránsito produce su máximo efecto.

Cuando la densidad aumenta desde cero, el valor del flujo también aumenta, debido a que un mayor número de vehículos están en el camino. Mientras esto esta sucediendo, el valor de la velocidad comienza a declinar (debido a la interacción de los vehículos). Esta declinación es virtualmente insignificante en densidades y valores de flujo bajos. A medida que la densidad continúa incrementándose se alcanza un punto en el cual la velocidad declina fuertemente, el máximo valor del flujo se alcanza cuando el producto de la densidad creciente y la velocidad decreciente resulte en un flujo reducido.

El valor máximo para el valor del flujo de una vía determinada es la "Capacidad".

La densidad a la cual esto ocurre se le llama densidad crítica y a la velocidad, velocidad crítica; al aproximarse a la capacidad, el flujo se convierte en mas inestable, debido a que los espacios entre los vehículos, entre la corriente del tránsito son muy pequeños.

En la capacidad no hay espacios disponibles en la corriente del tránsito. Cualquier perturbación de los vehículos que entren o salgan de la vía, o de los conductores que cambien de carril desde los carriles internos, crean un "desorden", que no puede ser disipado o desaparecer en forma rápida; por ello, la operación en o cerca de la capacidad es difícil de mantener por períodos largos de tiempo sin la formación de "colas" y flujos forzados llegándose a presentar los embotellamientos inevitables. Por esta razón las vías son diseñadas para operar en volúmenes menores a la capacidad oficial.

IV.5. Características de la circulación discontinua

La circulación discontinua es mucho más compleja que la circulación continua, ya que está sujeta a puntos de operación determinados, tales como: los semáforos, señales de alto y señales de ceda el paso.

1. *El concepto de "Tiempo de verde", en las intersecciones semaforizadas.*

El recurso más importante que se usa para la interrupción de la circulación es el semáforo. En ellos, la circulación en cada movimiento o grupo de movimientos es periódicamente detenida.

Sólo el tiempo durante el cual el semáforo está en verde es el disponible para el movimiento. Así, el movimiento en un grupo de carriles dado, es solamente posible para una porción del tiempo total.

2. *El Valor de flujo de saturación y los tiempos perdidos en las intersecciones semaforizadas.*

En este punto se debe de considerar la dinámica (de inicio y continuación) de la "cola" de vehículos cuando se tiene el tiempo de verde. En la figura IV.2., se ilustra una "cola" de vehículos detenidos en un semáforo. Cuando el semáforo cambia a luz verde, los vehículos empiezan a moverse, los espacios en tiempo entre vehículos pueden ser observados cuando crucen la línea de la orilla de la banqueta de la intersección.

Primer vehículo: Experimenta un tiempo desde que ve el conductor el verde, reacciona al cambio quitando su pie del freno y acelera al pasar por la intersección.

Segundo vehículo: El tiempo de acción-reacción, puede ocupar parte del tiempo en que el primero empieza a moverse y podrá moverse mas rápido por tener una mayor longitud de aceleración, por lo tanto, el espacio en tiempo es menor. Así se continua con los siguientes "N" vehículos hasta que se logra un movimiento uniforme de ellos hasta el último vehículo de la "cola".

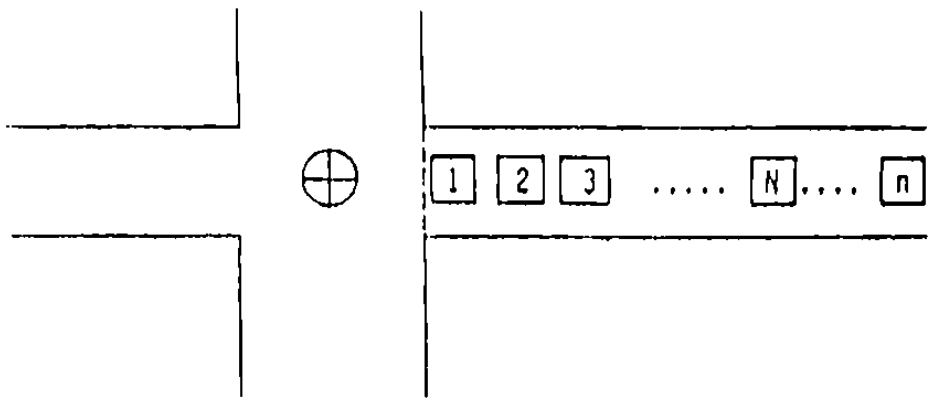
El espacio en tiempo para estos últimos será relativamente constante.

En la figura IV.2., este espacio en tiempo es denominado como "h" y se alcanza después de "N" vehículos.

El valor de "h" esta definido como el espacio promedio constante entre los vehículos y ocurre después del "N", vehículo en la cola y continua hasta el último vehículo de la cola que "despeja" la intersección.

El espacio en tiempo de saturación es la cantidad de tiempo consumido por un vehículo en una "cola", con movimiento estable, cuando pasa a través de una intersección semaforizada en verde.

A los incrementos que experimentan los primeros vehículos se les llama "Tiempos perdidos de inicio". Estos incrementos se repiten en cada luz verde.



----- LINEA DE OBSERVACION PARA MEDICION DE INTERVALOS.

vehículo en cola	intervalo salida
1	$h+t_1$
2	$h+t_2$
3	$h+t_3$
.	.
.	.
.	.
.	.
N	$h+t_n$
N+1	h
N+2	h
.	.
.	.
.	.
n	h

Figura IV.2
Condiciones en la interrupción del tránsito.

Cada vez que una corriente de vehículos se detiene, se experimenta otro tipo de tiempo perdido, ya que se requiere, por seguridad, un tiempo para despejar la intersección antes de que otra corriente de vehículos intente usar la intersección. A este intervalo se le llama "Tiempo Perdido de Despeje". En la práctica este tiempo período se toma en cuenta en los ciclos mediante el tiempo de luz ámbar y todo el de luz roja. Los conductores generalmente no se detienen durante el intervalo completo.

El "Valor del flujo de saturación" es el valor del flujo por carril en el cual los vehículos pueden pasar a través de una intersección semaforizada en una "cola" en movimiento estable (h). Entonces, el valor del flujo de saturación representa el número de vehículos por hora, por carril, que pueden pasar a través de una intersección si el tiempo de luz verde estuviera disponible durante toda la hora y el flujo de los vehículos nunca fuese interrumpido.

La relación entre el valor del flujo de saturación y los tiempos perdidos es crítica. Para un carril o movimiento dado, los vehículos usan la intersección en el valor de flujo de saturación por un período de tiempo igual al tiempo de luz verde disponible más el intervalo de cambio, menos los tiempos perdidos de inicio y despeje. Por esto, el total de tiempo perdido por hora está relacionado con el ciclo del semáforo.

La cantidad de tiempo perdido impacta la capacidad, la lógica sugiere que la capacidad de la intersección se incrementa con el incremento del ciclo, más sin embargo, la demora también llegando a ser excesiva.

3. *La circulación en las intersecciones con señales de "Alto" y "Ceda el paso".*

Un conductor, ante las señales de "Alto" y "Ceda el paso", enfrenta una tarea de discernimiento. Debe de seleccionar un espacio entre los vehículos en la circulación de la calle considerada principal, para ejecutar el movimiento deseado.

La capacidad, en este tipo de intersecciones depende de dos factores:

a) De la distribución de los espacios entre los vehículos, en la corriente del tránsito de la calle considerada principal.

b) De la distribución de los espacios, aceptable para los conductores de la calle considerada secundaria .

El inciso a) depende de:

* El volumen total de la calle.
* La distribución direccional de la calle.
* El número de carriles en la calle principal.
* La pendiente del terreno.
* El tipo de vehículos que esté agrupado.

El inciso b) depende de:

* El tipo de maniobra (vuelta izquierda, derecho y de frente) que tiene que realizar el vehículo de la calle secundaria.
* El número de carriles de la calle considerada secundaria.
* La velocidad del tránsito en la calle considerada principal.
* La distancia de visibilidad.
* El tiempo que ha estado esperando el vehículo en la calle secundaria.
* Las características del conductor (edad, tiempo de reacción, vista, etc.).

4. *La Demora.*

Una medida de capacidad crítica en las vías de circulación discontinua es la Demora. La "Demora" es un término general que puede ser interpretado para describir un buen número de cosas. La demora promedio por parada es la medida más importante de eficiencia para las intersecciones semaforizadas; es la demora total que experimentan todos los vehículos en un acceso o en un grupo de carriles, en un período de tiempo dado, dividido entre el volumen total que entra a la intersección durante el mismo periódo de tiempo, expresado en segundos por vehículo.

La demora que se presenta al viajar a velocidades mas bajas que las deseadas es difícil de establecer, debido a que se requiere fijar una velocidad razonablemente deseada para cada segmento de la vialidad.

IV.6. Factores que afectan la capacidad

Condiciones ideales:

Una condición ideal es una condición en la cual, cualquier mejora posterior no logrará ningún aumento en la capacidad.

Ejemplos de condiciones ideales en:

a) Circulación continua:

1. Carriles de 12 pies de ancho.
2. Zonas de 6 pies libres entre las obstrucciones y los objetos laterales más cercanos, a la orilla de los carriles principales y en la faja separadora central.
3. Velocidad de diseño de 70 mph para autopistas y carreteras de carriles múltiples y 60 mph para carreteras de dos carriles.
4. 100% de vehículos ligeros en la corriente del tránsito.

b) Accesos en las intersecciones semaforizadas:

1. Carriles de 12 pies de ancho.
2. Terreno en nivel.
3. Prohibido estacionarse en las aceras en los accesos de la intersección.
4. 100% de vehículos ligeros en la corriente del tránsito, incluyendo la prohibición de paradas de autobuses urbanos dentro de la intersección.
5. Todos los vehículos que viajan en la intersección van directo (de frente).
6. Intersecciones localizadas fuera de la zona comercial.
7. Semáforo siempre en verde.

En la mayoría de los análisis de capacidad, las condiciones prevalecientes no son las ideales y los cálculos para obtener la capacidad, los valores del flujo de servicio o el nivel de servicio, deben incluir los ajustes que reflejen estas condiciones. Las condiciones prevalecientes son generalmente categorizadas como las condiciones del camino, del tránsito y de los controles.

Condiciones del camino:

Incluyen todos los parámetros geométricos que describen el camino:

- *Tipo de vía y su desarrollo en la zona:*

- Esta puede ser de flujo continuo o de flujo discontinuo.
- Puede o no tener faja separadora central.
- Influencia del lugar en que se encuentra.

- *Ancho de carril:*

Los carriles angostos hacen que los vehículos circulen más cerca unos de otros por los costados, lo cual se compensa disminuyendo la velocidad y observando mayor distancia, en el sentido longitudinal.

- *Ancho de acotamiento y obstáculos laterales:*

Muchos vehículos "huyen", de los lados del camino o de los objetos en la faja separadora central, haciendo que viajen más cercanos en el sentido lateral teniendo la conducta misma mencionada en el punto anterior. En las vías de dos carriles, donde existen acotamientos, éstos se usan para permitir pasar a los vehículos lentos; si los acotamientos son angostos, se afecta a la capacidad.

- *Velocidad de diseño:*

Las restricciones de velocidad afectan la capacidad, debido a que los conductores se ven obligados a viajar en velocidades reducidas y a ser mas cautelosos cuando los alineamientos vertical y horizontal, representan peligro.

- *Alineamiento vertical y horizontal:*

El alineamiento vertical y horizontal de un camino son producto de la velocidad para la que fueron diseñados, según la topografía del lugar donde se han construído. En términos generales se tienen tres tipos de terrenos:

1. Terreno en un nivel: Es una combinación de ambos alineamientos que permiten a los vehículos pesados mantener aproximadamente la misma velocidad que los vehículos ligeros. Incluyen pendientes pequeñas del 1 al 2 %.
2. Terreno en lomerío: es una combinación de ambos alineamientos que causa que los vehículos pesados disminuyan substancialmente la velocidad respecto a los vehículos ligeros pero no causa que éstos lleguen a la velocidad sostenida.
3. Terreno montañoso: Es una combinación de ambos alineamientos que causa que los vehículos pesados operen a velocidades sostenidas, en distancias significativas o en intervalos frecuentes.

El vehículo pesado esta definido como todo aquel vehículo que usa más de 4 llantas tocando la superficie de rodamiento.

Velocidad sostenida: Es la máxima velocidad que pueden mantener los vehículos pesados en una pendiente ascendente para un por ciento dado, en un tramo prolongado.

Estas definiciones están dadas en forma general y dependen de la mezcla particular de vehículos pesados, en la corriente del tránsito.

La capacidad y los niveles de servicio se ven afectados por los vehículos pesados, cuando:

a) El porciento de vehículos pesados en el volumen total es significativo.
b) Las oportunidades de rebase en las carreteras de dos carriles son escasas.
c) Existen pendientes aisladas en longitudes significativas.
d) Existen pendientes en las intersecciones, principalmente en los accesos.

Condiciones del tránsito:

1. *Tipo de vehículos*:

Los vehículos pesados descritos anteriormente afectan en dos formas significativas a la capacidad:

* Son mas largos que los vehículos ligeros y, por lo tanto, ocupan más espacios que los vehículos ligeros.
* Tienen una habilidad de operación mas lenta que los vehículos ligeros, particularmente en la aceleración, la desceleración y la habilidad para mantener uniforme la velocidad en las pendientes ascendentes.

Los vehículos pesados están clasificados en tres principales categorías:

a) Camiones:

Involucrados principalmente en el transporte de bienes, cuya relación peso potencia es de 200 lb/hp.

b) Vehículos recreacionales:

Operados por particulares, dedicados al transporte de equipo para recreación, cuya relación peso potencia varía de 30 al 60 lb/hp.

c) Autobuses:

Dedicados al transporte de personas. Existen dos tipos básicos: los foráneos que no paran continuamente para el ascenso/descenso del pasaje y los urbanos que sí lo hacen; cuya relación peso-potencia varía de 70 a 100 lb/hp.

2. Uso de carriles y la distribución direccional.

a) Distribución direccional:

Tiene su mayor impacto sobre las carreteras de dos carriles. Lo óptimo es que sea 50-50 la capacidad declina cuando se desequilibra esta proporción.

b) Distribución de carriles:

Normalmente, los carriles laterales se usan menos que los carriles internos.

Condiciones de control:

La más crítica es la del semáforo, la cual depende de:

- El tipo de control que se utilice.
- El tipo de fases.
- La distribución del tiempo de luz verde.
- La duración del ciclo.

1. Las señales de "Alto" y "Ceda el paso", las cuales asignan la preferencia a la calle considerada principal.
2. Las señales de "Alto", en los cuatro accesos, donde es el comportamiento muy variable.
3. Las restricciones del estacionamiento en las calles.
4. Las restricciones para conceder vueltas.
5. El control en el uso de los carriles reversibles.

Uno de los usos mas importantes de este estudio de capacidad es la evaluación de los planes alternativos de mejoramiento basada en cambios como: construcción, ampliación y mejoras en puntos específicos, anchos de carriles, anchos de acotamientos, número de carriles, alineamientos vertical y horizontal, además de otros factores geométricos y de operación.

IV.7. Niveles de análisis

El manual de capacidad vial contempla tres niveles de análisis:

1. Análisis operacional.
2. Análisis de diseño.
3. Análisis de planificación

1. Análisis operacional:

Es la aplicación más detallada y flexible de las técnicas para el análisis de capacidad.

Básicamente, consiste en comparar los valores de flujo del tránsito, conocido o proyectado y sus características con la descripción de la vialidad, conocida o proyectada, para estimar el nivel de servicio que se espera que predomine.

Este análisis permite también evaluar el nivel de servicio que podrá resultar de alguna alternativa por mejora a un lugar o en un tramo específico de la vialidad existente. Los impactos operacionales de las medidas implantadas pueden estimarse o calcularse, para con ello poder tomar una decisión razonable; también, evalúa las alternativas de diseño para una nueva vialidad; provee valores precisos de parámetros operacionales y determina los valores del flujo de servicio permisibles, según suposiciones operacionales variables, con el fin de evaluar la adaptabilidad de estos valores para varios diseños.

2. Análisis de diseño:

Pretende determinar el número de carriles requeridos en una vialidad particular, para proporcionar un nivel de servicio específico. Este análisis es limitado su uso y a menudo trae como resultado una generación de alternativas que serán corregidas después de un análisis operacional.

3. Análisis de planificación:

Tiene el mismo objetivo específico que el anterior, sin embargo, en este nivel de análisis, la cantidad, el detalle y la actualización de la información son muy limitados. A menudo se basa en proyecciones del tránsito del "TPDA" y las supuestas condiciones del tránsito, del camino y de los controles. En cuanto se tenga

disponible mayor cantidad de información, deberá irse redefiniendo el proceso, hasta llegar a un análisis operacional detallado.

Precisión:

Al hacer los cálculos de capacidad, debe recordarse que los resultados esperados no pueden ser más precisos o exactos que la información y los datos que se utilizaron para el análisis.

Todos los valores de flujo de servicio, en el manual, han sido redondeados a 50 vph.

V. DEFINICIONES DE CONCEPTOS SOBRE PAVIMENTOS

V.1. Pavimentos asfálticos (flexibles)

El pavimento asfáltico, normalmente se estructura con una capa superficial de rodamiento que tiene, en general poco espesor; la cual suele apoyarse sobre capas de material granular seleccionado, denominadas "capas de sub-base y de base"; con el fin de contrarrestar los esfuerzos que producen por la acción. El nombre de "pavimento flexible", se abandonó, al tener en cuenta que la capa superficial de rodamiento construida por medio de concreto asfáltico es mas bien semi-rígido y, además, que la base y la sub-base (figura V.1), pueden, en ocasiones, estabilizarse con el empleo del cemento Portland; con lo cual se convierten en capas rígidas o semi-rígidas.

V.2. Pavimento rígido

En él la superficie de rodamiento es proporcionada por losas de concreto hidráulico que distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes, que trabajan en forma conjunta con la que recibe directamente las cargas. Este tipo de pavimento no puede plegarse a deformaciones de las capas inferiores sin que se presente una falla estructural; aunque, en teoría, las losas de concreto hidráulico pudieron colocarse en forma directa sobre la subrasante, es necesaria la construcción de una capa de sub-base para evitar que los finos sea bombeados hacia la superficie de rodamiento, por el paso de los vehículos, lo cual puede provocar fallas de esquina o de orilla en la losa. La sección transversal de un pavimento rígido esta formado por la losa de concreto hidráulico y la sub-base, que se construyen sobre la capa subrasante (figura V.2.).

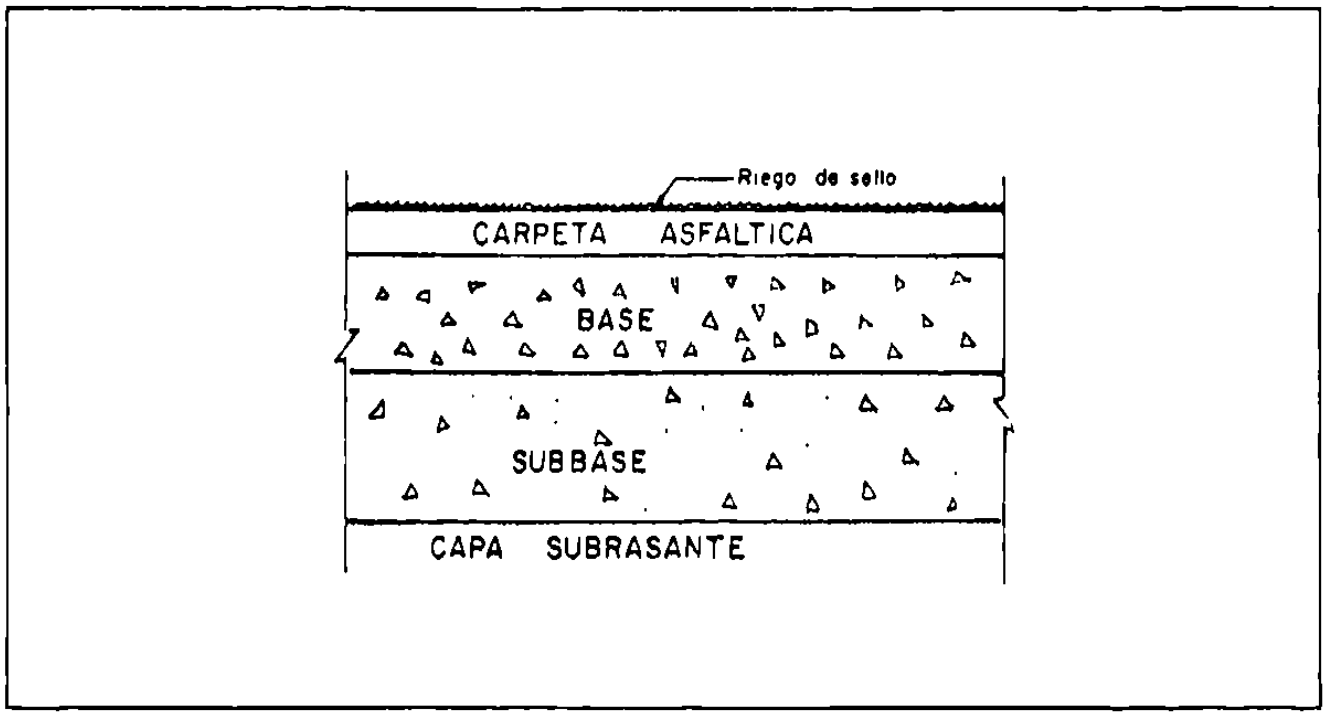


Figura V.1. Capas de un pavimento flexible típico.

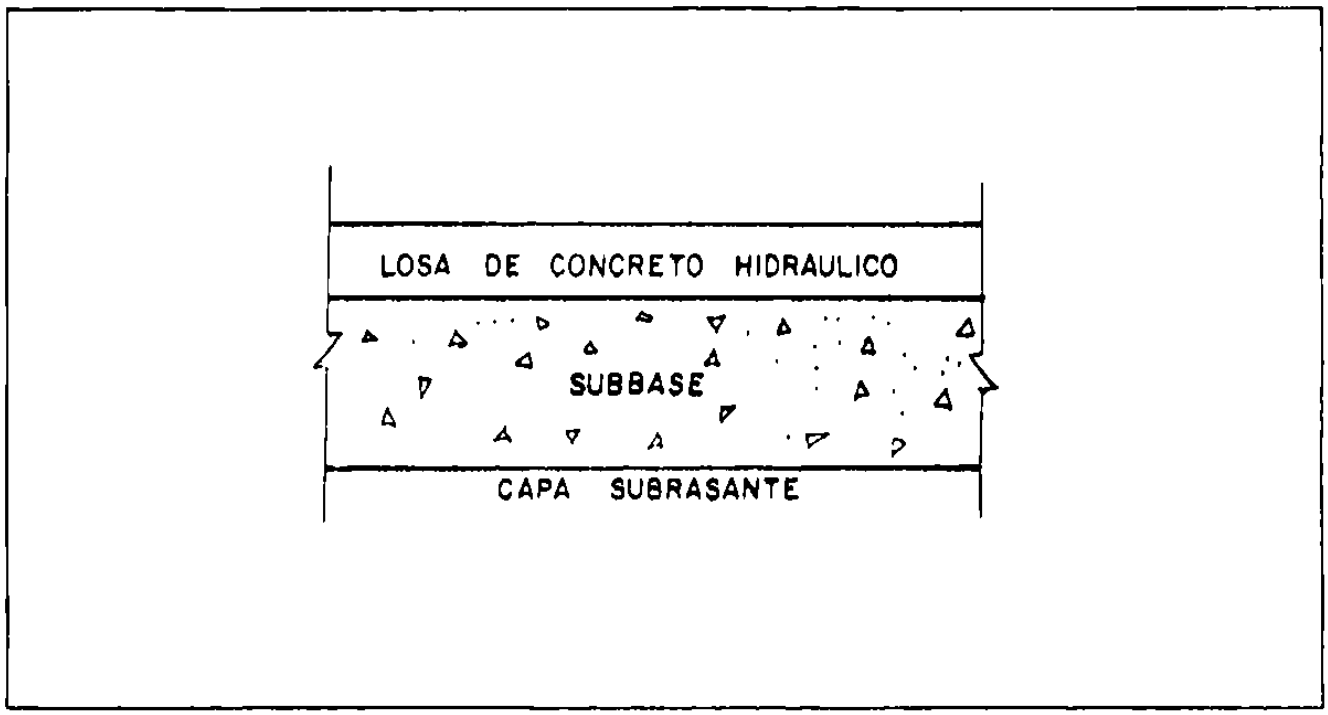


Figura V.2. Capas que forman un pavimento rígido

V.3. Indice internacional de rugosidad

Los estados de la superficie de rodamiento están representados, por el ***Indice de Servicio*** y el ***Indice Internacional de Rugosidad***.

Indice de Servicio:

Corresponde a la vinculación de la comodidad de viaje en una escala que va del 0 al 5, determinada por cuatro personas que viajan en un vehículo cuya suspensión y alineación están en buenas condiciones y circulando a una velocidad de operación normal.

Indice Internacional de Rugosidad:

Constituye una medida de la rugosidad, entendida como las deformaciones verticales de la superficie de un camino, con respecto a la superficie plana; mismas que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de viaje, las cargas dinámicas y el drenaje superficial del camino. La rugosidad recorrida y el índice internacional de rugosidad puede definirse como la suma de las irregularidades verticales (en valor absoluto) a lo largo de la zona de rodadura de un tramo homogéneo de carretera, dividida entre la longitud del mismo. Su unidad de medida se da en m/km.

En la figura V.3, se muestra gráficamente la escala de dicho índice, con una breve descripción del estado cualitativo del pavimento correspondiente a ciertos rangos.

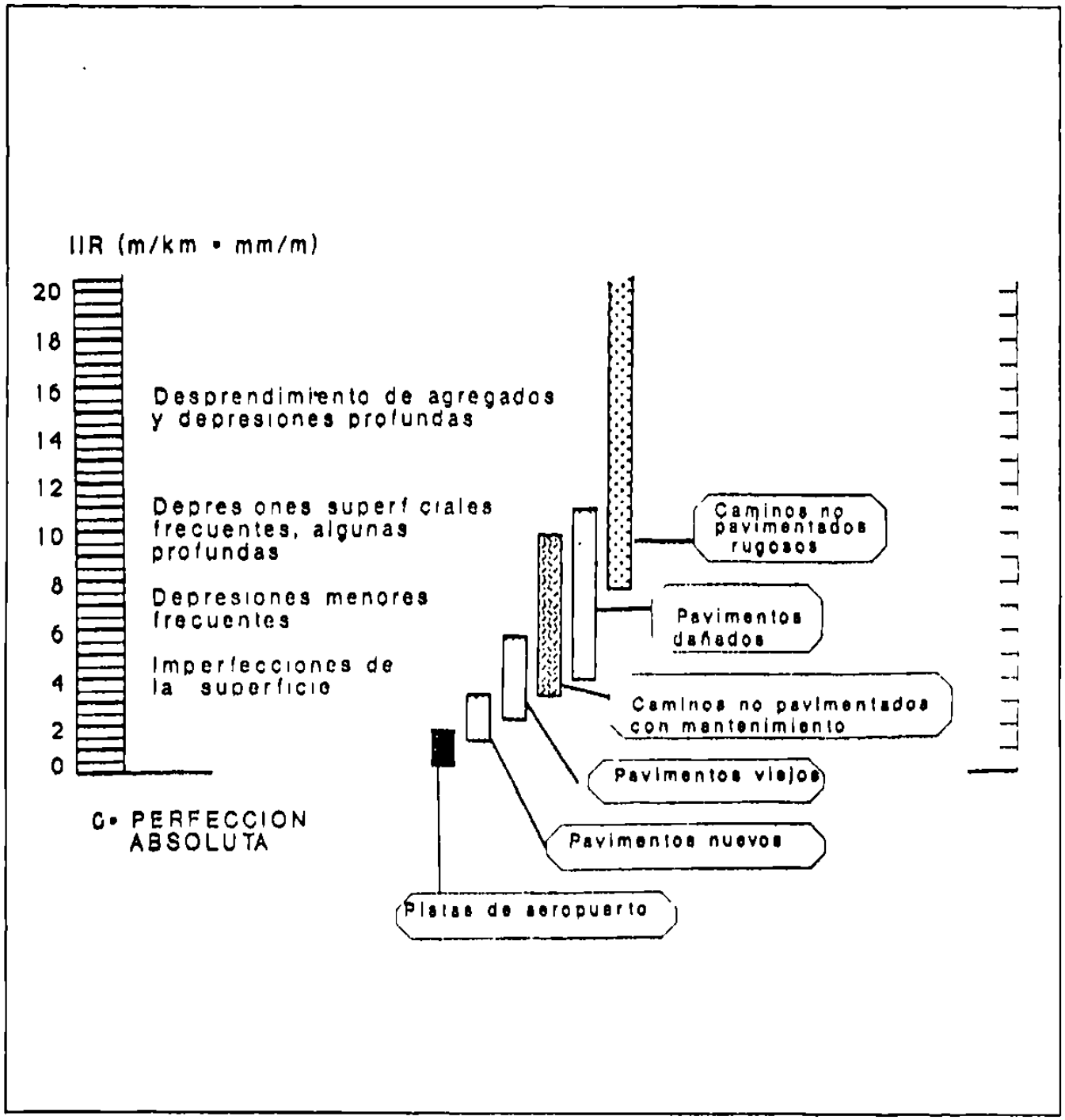


Figura V.3. Escala del Indice Internacional de Rugosidad.

Fuente:
Adaptado de Savers M W . T D Gillespie. and W D O Paterson (1986)
Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurents Tecnhical Paper 46 World Bank. Washington. D C

En virtud de que los equipos disponibles para la medición de la rugosidad son muy variados y de que el equipo móvil es generalmente caro, existe un método muy accesible para realizar las estimaciones de la rugosidad en el campo, a través del mismo procedimiento utilizado para controlar las tolerancias a las irregularidades de una superficie (Paterson, 1987). El método consiste en colocar manualmente una regla de dos o tres metros de largo, longitudinalmente, sobre una de las huellas del camino, medir la desviación máxima bajo la regla en mm. y repetir la operación a distancias muy parecidas. Con los datos de las mediciones se calculan las frecuencias acumuladas y se sustituye el valor del 95 percentil resultante (aquél que es mayor al 95% de las observaciones e inferior al 5%) en la formula siguiente, que sirve, para conocer el valor del Indice Internacional de Rugosidad (IIR), en m/km:

IIR (m/km)= 0.35 DMR_3

DMR_3 = 95 Percentil de las observaciones máximas bajo una regla portátil de 3m de largo.

IIR (m/km)= 0.437 DMR_2

DMR_2 = 95 Percentil de las desviaciones máximas bajo una regla portátil de 2m de largo.

Un procedimiento alternativo a la utilización de estas fórmulas es el uso de las gráficas de la figura V.4.

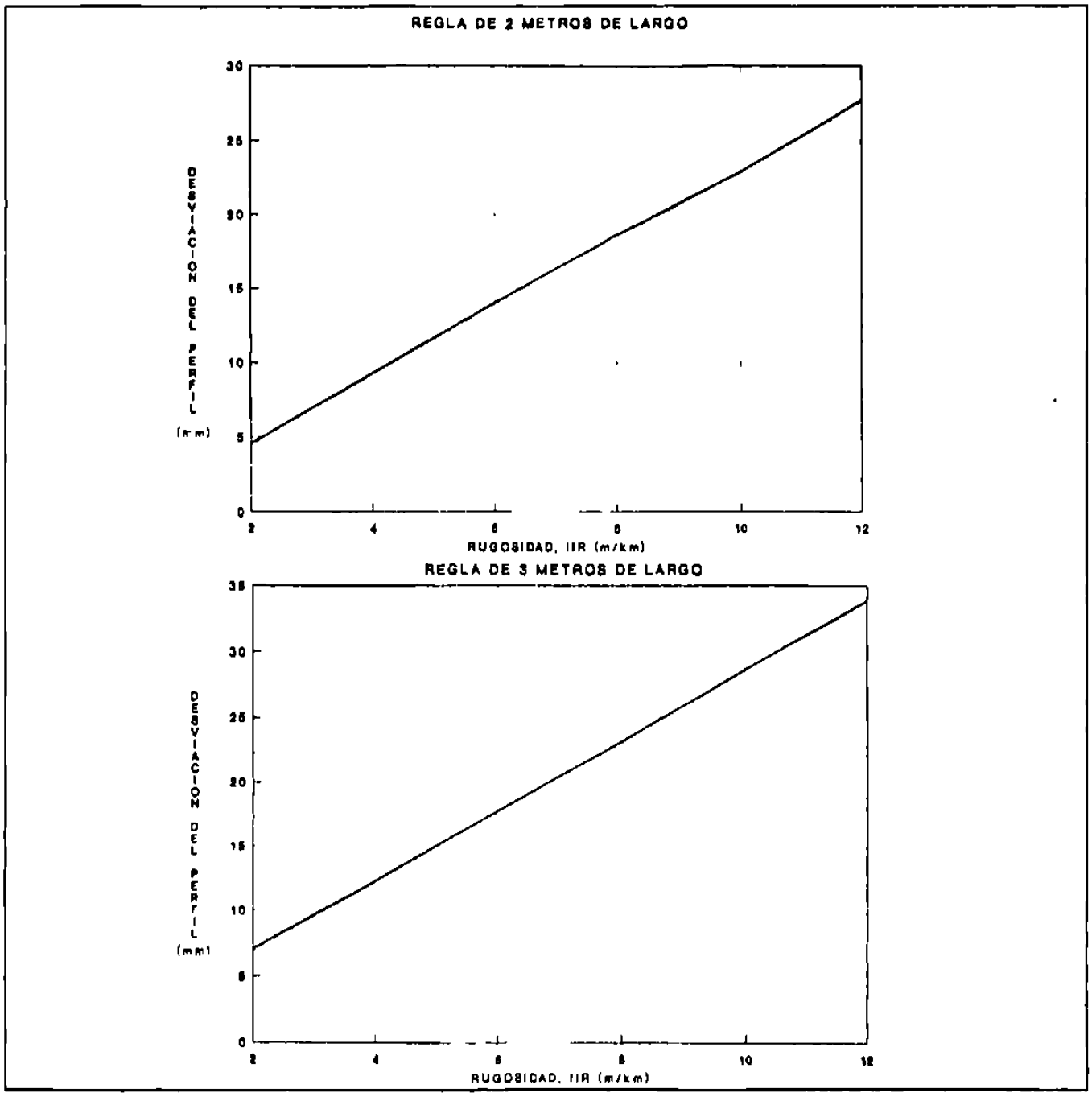


Figura V.4. Equivalencias entre la escala del Indice Internacional de Rugosidad y desviaciones con respecto a reglas de 2 y 3 m de longitud.

NOTA: Las desviaciones del perfil corresponden al valor de 95 percentil de las mediciones bajo la regla correspondiente.

FUENTE: Adaptación de Paterson, W.D O.(1987)"Road Deterioration and Maintenance Effecta, Modela For Plamming and Management". The Highway Design and Maintenance Standars Series, pág. 40. The World Banck.

VI. ANALISIS DE CAPACIDAD EN CARRETERAS MULTICARRILES

VI.1. Características, tipos de carreteras y flujo ideales

Los procedimientos de este capítulo están diseñados para analizar la capacidad, el nivel de servicio, los requerimientos de los carriles y los impactos en las características del tránsito y del diseño de carreteras de carriles múltiples rurales y suburbanas.

Características :

Las carreteras de carriles múltiples están ubicadas entre los límites de velocidad de 40 a 55 mph. Generalmente tienen 4 ó 6 carriles, con fajas separadoras centrales físicas o con carriles de vuelta izquierda para ambos sentidos aunque también las hay sin dividir. Se localizan en comunidades suburbanas, aledañas a las ciudades, con corredores rurales de altos volúmenes, que conectan a dos ciudades o donde hay actividades que generan un número importante de viajes diarios. También se pueden encontrar semáforos en estas carreteras; que, si llegan a estar más próximas que de 2 millas, crean las condiciones para ser analizadas como arterias urbanas. Los volúmenes varían ampliamente, fluctuando entre los quince mil y cuarenta mil vehículos diarios. En algunos casos se han observado volúmenes tan altos como los cien mil v/d, en donde el acceso por la faja separadora central está muy restringido y en donde los cruces importantes se realizan en desnivel.

Relación entre los tipos de carreteras de carriles múltiples:

Estas carreteras tienen características operacionales diferentes a las de las autopistas, las de las arterias urbanas y a las de las carreteras de dos carriles. Sus accesos no están completamente controlados. Se encuentran dentro del rango entre las condiciones de flujo libre, como en las autopistas y las condiciones de flujo, como las arterias urbanas, las cuales son interrumpidas frecuentemente por los semáforos.

Los factores que distinguen a las carreteras de carriles múltiples de las autopistas son:

- Los vehículos pueden entrar y salir de la carretera en intersecciones y calles y por la faja separadora central en lugares seleccionados.
- Pueden situarse semáforos en este tipo de vialidad.
- Los estándares de diseño, en forma general, tienden a ser más bajos que los encontrados para las autopistas, aunque una carretera de carriles múltiples se acerca a las condiciones de las autopistas, cuando los puntos de acceso y los volúmenes de vuelta son casi nulos.
- El entorno de las carreteras de carriles múltiples tiene un impacto mayor sobre los conductores que el que se atribuyen a las autopistas.

Comparadas con las arterias urbanas, las carreteras de carriles múltiples son muy similares, pero no tienen tanto control mediante semáforos y el número de accesos por milla es mínimo. Los estándares de diseño son mejores y sus velocidades son de 5 a 15 mph más altas que las de las arterias urbanas.

Velocidad de flujo libre:

Esta es una característica importante en las carreteras de carriles múltiples. Es la velocidad teórica del tránsito, cuando la densidad llega a cero. Prácticamente, es la velocidad a la cual los conductores sienten que viajan confortablemente.

Las velocidades de flujo libre serán más bajas en aquellas secciones donde los alineamientos vertical y horizontal son restringidos y en donde se han establecido límites de velocidad. Esta velocidad es importante porque es tomada como el punto de inicio para el análisis de la capacidad y del nivel de servicio.

La determinación de la velocidad de flujo libre en el campo se logra mediante los estudios de velocidad, en períodos de bajo volumen. Para los análisis de este capítulo, el límite superior para las condiciones de bajo volumen es de 1400 vl/h/carr.

Relación Flujo-Densidad y Velocidad-Flujo:

Las figuras VI.1 y VI.2 muestran estas relaciones para un segmento de flujo continuo en una carretera de carriles múltiples, en condiciones ideales y no ideales, cuando se conoce la velocidad de flujo libre.

La capacidad y el nivel de servicio para las carreteras de carriles múltiples deben ser ligeramente más bajos que los de las autopistas, aún en condiciones ideales; debido a que los conductores están expuestos a conflictos potenciales con el tránsito que da vuelta, aún cuando no haya accesos en las proximidades.

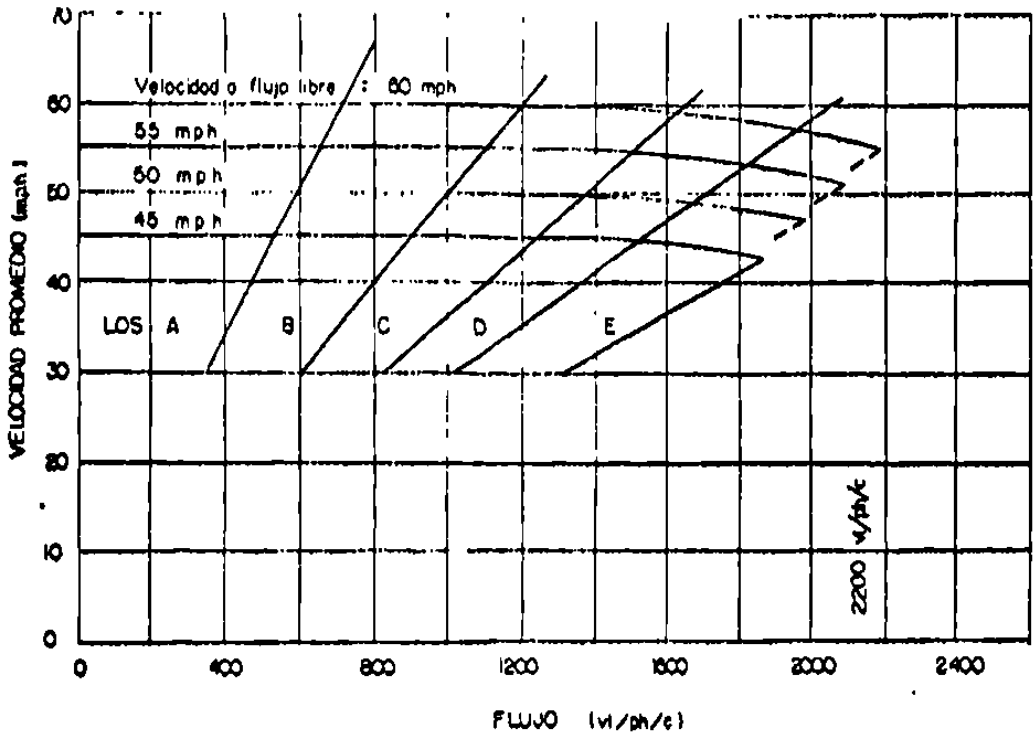


Figura VI.1. Relación Flujo-Velocidad en Carreteras Multicarriles

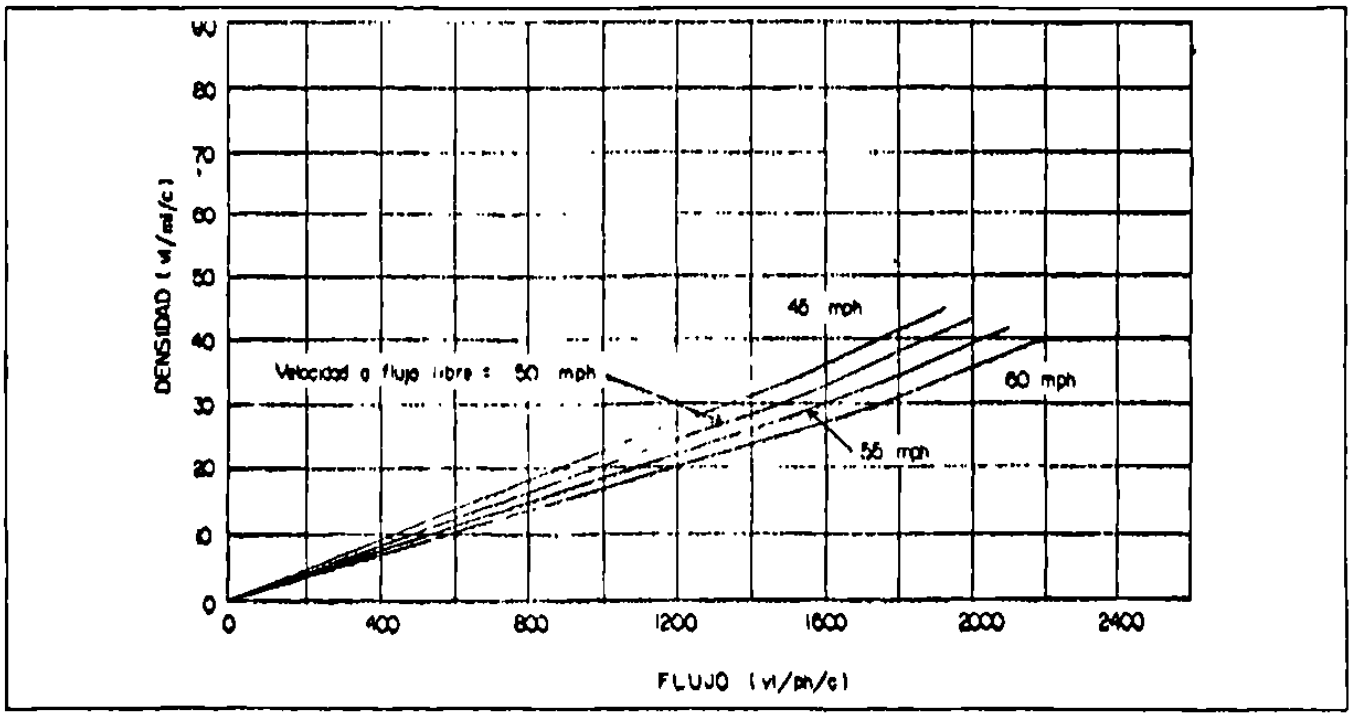


Figura VI.2. Relación Flujo-Densidad en Carreteras Multicarriles

La figura VI.1 muestra que la velocidad del tránsito es invariable hasta un valor de flujo de 1400 vl/h/carr. La capacidad, en condiciones ideales es de 2200 vl/h/carr., para una velocidad de flujo libre de 60 mph. Cuando los valores de flujo están entre 1400 y 2200 vl/h/carr., la velocidad de flujo libre de 60 mph decrece en 5 mph.

La figura VI.2 muestra que la densidad varía constantemente para todos los valores de flujo.

Condiciones ideales:

Estas son:

- Terreno nivelado, con pendientes no mayores del 1 al 2%
- Carriles de 12 pies de ancho.
- Un mínimo de 12 pies total libres de obstáculos laterales en el sentido del estudio. Este total representa una área libre de obstáculos de la orilla de la calzada (incluyendo acotamientos) a las obstrucciones a lo largo del camino y la faja separadora central. Los obstáculos laterales, a una distancia mayor de 6 pies se consideran a 6 pies
- Ningún punto de acceso directo a lo largo del camino.
- Carretera dividida.
- Sólo vehículos ligeros en la corriente de tránsito.
- Una velocidad de flujo de 60 mph o mayor.

Estas condiciones son ideales sólo para la capacidad y los niveles de servicio y no están relacionadas con factores de seguridad u otros factores.

VI.2. Ajustes de velocidad de flujo libre

La capacidad para las carreteras de carriles múltiples está definida como el valor de flujo máximo horario en el cual, en forma razonable, puede esperarse que los vehículos pasen un tramo uniforme de un camino, en las condiciones prevalecientes del tránsito y del camino.

El nivel de servicio está basado en la densidad. Debido a que la velocidad de flujo libre es un dato directo para el cálculo de la densidad, los ajustes relacionados con los factores geométricos se hacen sobre la velocidad de flujo libre y no sobre la capacidad. Algunas condiciones de control, físicas y del tránsito, afectan la velocidad de flujo libre. Estas condiciones son:

- Limitación de la velocidad por vigilancia:

Los efectos de la vigilancia en la velocidad son limitadas, tanto en el tiempo como en el espacio. En general una vigilancia permanente afecta no más de 8 a 9 millas del camino. Después de pasar el sitio, el efecto decae en forma exponencial. Las velocidades pueden verse afectadas de 2 a 3 días después que se termine la actividad.

Si el camino en estudio se localiza en una comunidad donde la vigilancia de la velocidad se espera que afecte a la operación muy a menudo, habrá que calibrar la relación entre la velocidad del 85 porcentual y la velocidad de flujo libre.

- Datos de la Velocidad para el diseño:

El dato de la velocidad para el diseño de los principales elementos físicos de la carretera puede afectar los valores de las velocidades de viaje; particularmente, los alineamientos vertical y horizontal contribuyen a determinar las velocidades actuales de los vehículos.

- Límite de velocidad:

El límite de velocidad establecido tiene un efecto en la velocidad de flujo libre de los vehículos ligeros. Los datos obtenidos en las carreteras de carriles múltiples indican que este límite de velocidad tiene una correlación significativa con la velocidad a la cual circulan los vehículos.

- Ancho de carriles y obstáculos laterales:

En este capítulo se utilizan dos ajustes para predecir el efecto de una sección transversal restringida a las velocidades de flujo libre: El ancho promedio de los carriles en combinación con los obstáculos laterales a ambos lados del camino.

Cuando se presentan carriles menores a 12 pies combinados con obstáculos laterales dentro de los 12 pies en promedio, tienen un efecto negativo para definir las velocidades de viaje.

- Tipo de faja separadora central:

Existen tres tipos básicos de faja separadora central en las carreteras de carriles múltiples:

1. Una línea central.

2. Un carril para vueltas izquierdas en ambos sentidos.

3. Una barrera de concreto, cordones, terreno natural o jardines y las pavimentadas, en el mismo nivel.

Este capítulo contempla dos grupos de carreteras de carriles múltiples: las primeras que se consideran no divididas y las divididas que tienen cualquier faja separadora central descritas en los puntos 2 y 3.

Cualquier carretera con una faja separadora central deprimida o elevada o con un ancho de 10 pies (incluyendo las de vueltas izquierdas) se consideran divididas.

El cordón en la faja separadora central, aún cuando tenga aberturas a intervalos determinados debe considerarse como faja separadora central elevada.

Tramos cortos de faja separadora central en el nivel o elevada (con menos de 500 pies) no se considera como faja separadora central elevada.

Las velocidades en las carreteras de carriles múltiples no divididas son menores que las correspondientes a las divididas. Entonces, cuando se determina la velocidad de flujo libre, el tipo de faja separadora central (dividida o no dividida) tiene una gran influencia que debe considerarse.

- Puntos de acceso:

El número de accesos al lado derecho del camino influyen en la velocidad de flujo libre. Aunque la actividad de cada punto puede contribuir a los cambios de la velocidad de viaje, aparentemente los conductores ajustan su velocidad no solo por las entradas y salidas de vehículos en esos puntos, sino también por la sola existencia de estos puntos de acceso. Los procedimientos de este capítulo indican que por cada 10 puntos de acceso por milla que afecten un sentido dado, la velocidad de viaje se reducirá aproximadamente 2.5 mph.

Note que este procedimiento considera los puntos de acceso de un lado del camino y no los del lado opuesto al del estudio o las aberturas en la faja separadora central. Si se espera que afecten significativamente al flujo vehicular los accesos del lado opuesto o las aberturas en la faja separadora central para vueltas en U al sentido del estudio, deben incluirse para determinar la densidad de los puntos de acceso.

- Otros ajustes:

Aunque los datos sobre el efecto de la población conductora son muy pocos, se presume que el conductor frecuente y rutinario puede viajar a una velocidad mayor que los demás conductores; sin embargo, no hay datos que sugieran una relación significativa y consistente entre los cambios en el tipo de conductor que utiliza la vialidad y los cambios en las características del flujo como la velocidad de flujo libre.

Otro de los factores que no contempla este capítulo es la diferencia entre los entornos rurales y los suburbanos, considerados previamente. En este capítulo se toma en cuenta la cantidad de puntos de acceso de una manera más directa.

VI.3. Factores de volumen

El flujo es el segundo componente de los cálculos de la densidad. La estimación del volumen se ajusta mediante factores relacionados con la composición y la fluctuación del tránsito, dichos factores son:

- Factor horario de máxima demanda:

Este es el primer factor de ajuste en el volumen. Está definido como la relación entre el volumen horario total y el valor de flujo de los 15 minutos de más alto valor, en la hora. La conversión del volumen horario a valor de flujo se logra dividiendo los volúmenes horarios entre el factor horario de máxima demanda.

- Factores de vehículos pesados:

Este es el segundo factor de ajuste en el volumen, el cual convierte los camiones, los autobuses y los vehículos recreacionales a un número equivalente de vehículos ligeros. En este capítulo se consideran sólo dos categorías de vehículos pesados: los camiones y los vehículos recreacionales. Los autobuses son considerados como camiones.

Este impacto es importante, especialmente en las secciones de carreteras con pendientes ascendentes.

VI.4. El Método

- Velocidad de flujo libre:

En campo, la velocidad de flujo libre es la velocidad media de los vehículos ligeros medida en condiciones de flujo bajas a moderadas (hasta los 1400 vl/h/carr.) donde las velocidades no dependen de los valores de flujo como se muestra en la figura VI.1. Esta representa la velocidad promedio deseada, a la que un conductor desearía viajar. Las pendientes, las curvas horizontales, los límites de velocidad, la vigilancia de la velocidad, las características operacionales de los vehículos y las preferencias de manejo limitan la velocidad de flujo libre, que fluctúa entre los 40 y los 60 mph.

- Niveles de Servicio:

El nivel de servicio de las carreteras de carriles múltiples se define en términos de la densidad, ya que ésta considera la proximidad de los vehículos en la corriente vehicular e indica el grado de maniobrabilidad.

La figura VI.3 muestra las fronteras de los niveles de servicio que corresponden al valor constante de la densidad. La tabla VI.1 proporciona los criterios para los niveles de servicio. Para las velocidades de flujo libre promedio de 60, 55, 50 y 45 mph, la tabla nos da la velocidad promedio de viaje, el máximo valor v/c y el valor de flujo de servicio máximo correspondiente (MSF) para cada nivel de servicio. En condiciones ideales, se espera que las velocidades, las relaciones v/c, y el MSF tabulados, existan en la corriente del tránsito, operando en la densidad marcada para cada nivel de servicio.

Los niveles de servicio dependen de la velocidad del flujo libre en los elementos de la carretera en estudio.

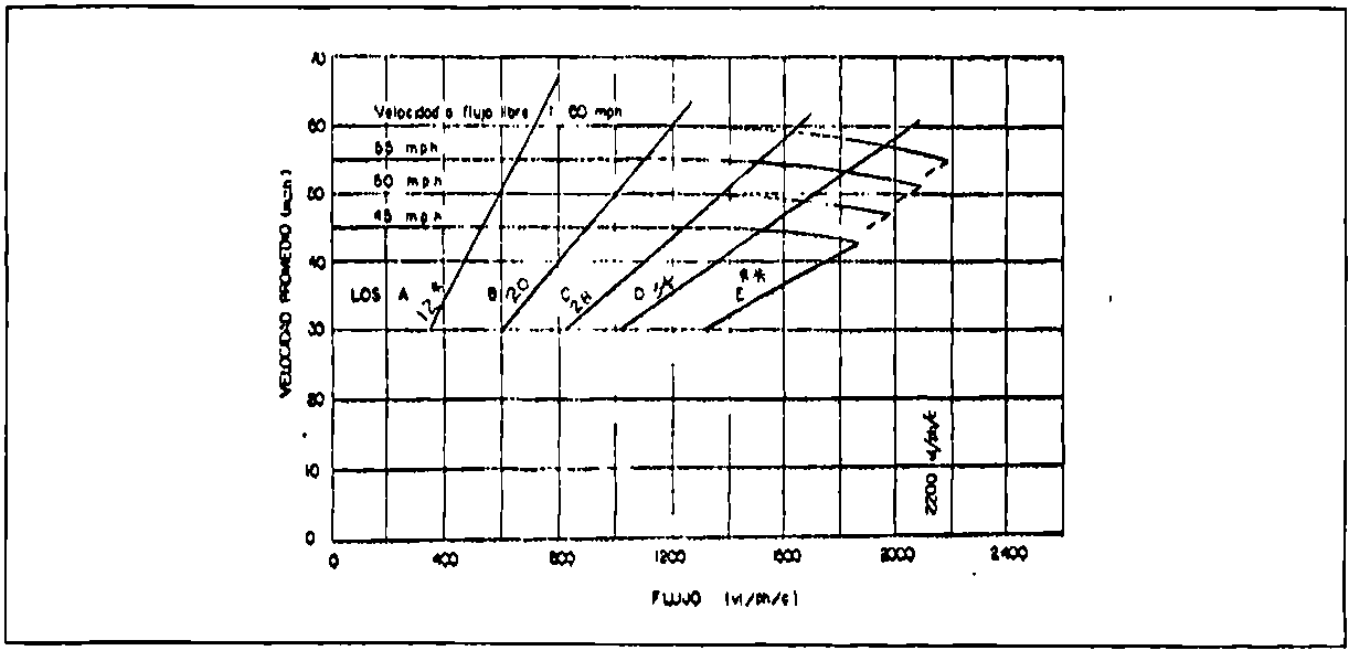


Figura VI.3. Curvas Flujo-Velocidad para criterio de Niveles de Servicio.

* Máxima densidad respecto al Nivel de Servicio.

** La máxima densidad para el Nivel de Servicio "E", ocurre cuando la relación volumen-capacidad es 1.0. Para los 40, 41, 43 y 45 vl/ml/c la curva de velocidad a flujo libre es 60, 55, 50 y 45 mph respectivamente.

Tabla N º 2

- Descripción de los Niveles de Servicio:

N. S.	*Descripción*	*Espacio entre vehículos (PIES)*	*Densidad (vl/m/carr)*	*Nivel de confort físico y psicológico*	*Libertad de maniobra*	*Incidentes*
A	Flujo libre	440	12	Alto	Buena	Fácilmente absorbidos
B	Flujo libre razonable	264	20	Alto	Libre restringido	Fácilmente absorbidos
C	Operación estable	189	28	Incrementa tensión	Restringido	Se aborden con dificultad
D	Frontera de operación estable	155	34	Drásticamente reducido	Severamente restringido	Producen colas
E	Operación inestable	Mínimo	40 45	Extremadamente pobre	Extremadamente restringido	Producen embotellamientos

Nivel de servicio F:

Representa el flujo forzado y los embotellamientos. Puede ocurrir en el punto donde los vehículos que llegan es mayor que los que salen o cuando la demanda pronosticada de un proyecto de vialidad excede a la capacidad calculada. En este nivel, las velocidades promedio de viaje generalmente son menores de 30 mph.

Los niveles de servicio para las carreteras de carriles múltiples generalmente se obtienen en tres pasos:

1. Determinación de la velocidad de flujo libre.
2. Ajuste del volumen.
3. Determinación del nivel de servicio.

- Determinación de la velocidad de flujo libre:

La velocidad de flujo libre se mide usando la velocidad media de los vehículos ligeros en condiciones de flujo de bajas a moderadas (hasta 1400 vl/h/carr.) La velocidad promedio es casi constante en todo este rango de valores de flujo.

Pueden utilizarse dos métodos para determinar la velocidad del flujo libre:

(a) Mediciones en el campo.
(b) Estimaciones por medio de una guía que se describe en este capítulo.

- Medición en el campo:

Se determina la velocidad directamente, de un estudio realizado en campo. Dado que estos no tendrán ningún ajuste posterior, deberá realizarse en un lugar representativo del tramo en estudio. Puede utilizarse cualquier método de obtención de velocidad.

Se recomienda que se lleve a cabo en un régimen estable, en condiciones de flujo de bajas a moderadas (hasta 1400 vl/h/carr.), y en horas de máxima demanda. Si el estudio se realiza con valores mayores a éste, se puede utilizar el modelo de curva Flujo-Velocidad, para encontrar la velocidad de flujo libre, suponiendo que los volúmenes de tránsito fueron obtenidos en el mismo tiempo.

El estudio de velocidad debe considerar las velocidades de todos los vehículos ligeros o cuantificarse mediante muestras sistemáticas de vehículos ligeros (por ejemplo cada décimo vehículo), o como lo indican los estudios de tránsito.

La velocidad promedio de todos los vehículos ligeros, medida en el campo, se usa directamente; como la velocidad de flujo libre, con valores de flujo de hasta los 1400 vl/h/carr. Esta velocidad refleja los efectos de todas las condiciones que influencian en el lugar a la velocidad, tales como: el ancho de los carriles, los obstáculos laterales, el tipo de faja separadora central y los puntos de acceso; así como otros, relacionados con el límite de velocidad y los alineamientos vertical y horizontal.

- Guía para estimar la velocidad de flujo libre:

La velocidad de flujo libre se puede estimar mediante la ecuación:

$$FFS = FFS_1 - F_M - F_{LW} - F_{LC} - F_A \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

FFS = Velocidad de flujo libre estimada (mph).

FFS_I = Velocidad de flujo libre estimada (mph) para condiciones ideales.

F_M = Ajuste por el tipo de faja separadora central (tabla VI.2).

F_{LW} = Ajuste por el ancho de carriles (tabla VI.3).

F_{LC} = Ajuste por obstáculos laterales (tabla VI.4)

F_A = Ajuste por puntos de acceso (tabla VI.5).

Velocidad de flujo libre estimada. Datos recientes, para las carreteras de carriles múltiples, indican que la velocidad de flujo libre, en condiciones ideales es aproximadamente 1 mph más baja, cuando la velocidad del 85 porcentual es de 40 mph, y 3 mph cuando la velocidad del 85 porcentual es de 60 mph.

El límite de velocidad es un factor que afecta la velocidad del flujo libre. Investigaciones recientes sugieren que la velocidad de flujo libre, en condiciones ideales es aproximadamente 7 mph más alta que el límite de velocidad de 40 y 45 mph (65 y 72 k/h) y 5 mph más alta para los límites de velocidad de 50 y 55 mph. (80 y 88 k/h).

Cuando no es posible usar datos de una carretera similar, se puede hacer una estimación basada en los datos disponibles, en la experiencia en la consideración de la variedad de los factores afectan la velocidad de flujo libre.

El primer ajuste es debido al tipo de faja separadora central. El analista debe considerar la división en tramos homogéneos que reflejen los cambios de las características que pudiesen presentar las fajas separadoras centrales. Según la tabla VI.2, las carreteras no divididas disminuyen la velocidad en 1.6 mph debido a la fricción causada por el tránsito opuesto en el carril adyacente.

El segundo se deberá al ancho de los carriles. La tabla VI.3 presenta el ajuste para modificar la velocidad de flujo libre en carriles menores, en una situación ideal. Para carriles de 10 pies de ancho, la velocidad de flujo libre es 6.6 mph menor que para el de 12 pies

El tercer ajuste se hace por causa de los obstáculos laterales. La tabla VI.4 muestra la reducción apropiada de la velocidad de flujo libre, basada en la suma de los obstáculos laterales, considerando tanto los que están en la faja separadora central como los del lado derecho. Estos incluyen: el alumbrado público, el señalamiento, los árboles, los puentes, las barreras y los muros de contensión. Los cordones de banqueta no se consideran como obstáculos.

La suma de la distancia a los obstáculos laterales está definida como:

$$TLC = LC_R + LC_L \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

TLC = Distancia lateral total (pies)

LC_R = Distancia lateral (pies) de la orilla derecha de los carriles de circulación al obstáculo (si es mayor de 6 pies,. use 6 pies).

LC_L = Distancia lateral (pies) de la orilla izquierda de los carriles de circulación a los obstáculos en la faja separadora central (si es mayor de 6 pies use 6 pies). Para las carreteras no divididas, no existe el ajuste por el lado izquierdo; por lo tanto, para utilizar la tabla VI.4 para este tipo de carreteras, la distancia lateral por el lado izquierdo siempre es de 6 pies La distancia lateral en la faja separadora central con vueltas a la izquierda en ambos sentidos, se considera 6 pies.

Entonces, la distancia total de 12 pies se utiliza cuando no existe ningún obstáculo en ambos lados.

El cuarto ajuste obedece los distintos niveles de densidad de los puntos de acceso. La tabla VI.5 presenta distintos niveles de densidad de los accesos. Los datos indican que cada acceso por milla disminuye la velocidad de flujo libre estimada aproximadamente 0.25 mph, a pesar del tipo de faja separadora central. La densidad de los puntos de acceso en una carretera dividida se encuentra dividiendo el número total de accesos (intersecciones y caminos) del lado derecho, en el sentido en estudio, entre la longitud de la sección en millas. Los accesos que son difíciles de identificar por el conductor o donde hay muy poca actividad (caminos privados a residencias o calles de servicio en las zonas comerciales) no deben incluirse en la determinación de la densidad de los accesos. Cuando no esté disponible este dato (cuando todavía no está construída la carretera), debe utilizarse la guía presentada en la tabla VI.6.

Las relaciones de velocidad de flujo libre que se presentan en este capítulo incluyen a todo tipo de conductores. Si existen diferencias significativas entre ellos, la velocidad de flujo libre debe obtenerse en el campo. Si no existe este dato de campo, el analista debe seleccionar la velocidad de flujo libre que refleje el efecto esperado.

- Determinación del valor del flujo:

Deben de realizarse dos ajustes en el volumen horario existente o asignado, para llegar al valor de flujo, en vehículos ligeros equivalentes utilizados en el análisis del nivel de servicio. Estos son: el factor horario de máxima demanda y el factor de ajuste por vehículos pesados. También se utiliza el número de carriles para que el flujo se exprese por carril.

Estos ajustes se hacen mediante la fórmula:

$$V_p = V / N * (PHF) * (f_{hv}) \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

v_p = Valor de flujo de servicio en vl/h/carr.

V = Volumen (número de vehículos que pasan un punto en una hora).

N = Número de carriles.

PHF = Factor horario de máxima demanda.

f_{hv} = Factor de ajuste para vehículos pesados.

- Factor horario de máxima demanda:

Este representa la variación temporal del flujo vehicular en una hora. Se han observado que estos factores, en las carreteras de carriles múltiples, fluctúan entre 0.76 y 0.99. Los más bajos son representativos de las condiciones rurales, mientras que los más altos reflejan a las condiciones urbanas y suburbanas.

Si no se dispone de este valor puede asignarse un valor de 0.85 para las carreteras rurales y 0.92 para las carreteras suburbanas.

- Ajustes causados por la presencia de vehículos pesados:

La presencia de vehículos pesados en la corriente del tránsito disminuye la velocidad de flujo libre, debido a que las condiciones ideales consideran sólo vehículos ligeros. El factor de ajuste considera tres tipos de vehículos pesados: los camiones, los autobuses y los vehículos recreacionales. Como el comportamiento de los dos primeros es muy similar, ambos se consideran camiones para el cálculo del f_{hv}

Se necesitan dos pasos para obtener el factor de ajuste de vehículos pesados:

1. Encontrar el factor equivalente de camiones y autobuses (E_T) y de vehículos recreacionales (E_R) para las condiciones prevalecientes.
2. Usando los valores del paso 1, calcule el factor de ajuste.

Equivalente de vehículos ligeros.

Pueden seleccionarse tomando en cuenta dos condiciones: tramos generales y pendientes específicas. Los valores se encuentran en las tablas VI.7, VI.8, VI.9 y VI.10.

Para los tramos largos de una carretera en donde no existe una pendiente significativa que impacte a la operación, se utiliza la tabla VI.7 para seleccionar el valor equivalente de vehículos ligeros correspondiente a los camiones y los autobuses (E_T) y para los vehículos recreacionales (E_R).

Para clasificar un tramo en forma general, se supone que no existe pendiente de 3% o mayor en más de 1/2 milla ni pendiente menor de 3% con longitud mayor de una milla, pudiendo considerar tales tramos como:

1. Terreno nivelado: Generalmente incluye pendientes pequeñas de no más de 1 al 2%, los vehículos pesados operan ahí casi como los vehículos ligeros.
2. Terreno de lomerío: No provoca que los vehículos pesados operen a velocidades sostenidas por un intervalo de tiempo significativo.
3. Terreno montañoso: Los vehículos pesados operan a velocidades sostenidas en distancias significativas o intervalos frecuentes.

Para determinar el valor equivalente de vehículos ligeros para los vehículos pesados (E_T) y (E_R), se utiliza la tabla VI.7.

Cualquier pendiente menor de 3% y mayor de una milla o cualquier pendiente del 3% o mayor y más larga de 1/2 milla debe considerarse como pendiente específica.

Las pendientes ascendentes y descendentes deben analizarse en forma separada debido a que el impacto debido a estas dos condiciones varía significativamente.

Las tablas VI.8 y VI.9 proporcionan los valores equivalentes de vehículos ligeros para camiones y autobuses (E_T) y para los vehículos recreacionales (E_R), respectivamente para pendientes ascendentes uniformes. La tabla VI.8 está basada en una relación de 167 lb/hp, típica de los camiones que utilizan las carreteras de carriles múltiples.

Cuando se presenten pendientes compuestas, puede utilizarse la técnica de la pendiente promedio para pendientes de cuatro mil pies de longitud o menores y no mayores del 4%.

Cuando se presenten pendientes descendentes para camiones y autobuses se utiliza la tabla VI.10. Para todas las pendientes menores del 4 % y para pendientes más pronunciadas, menores o iguales a 2 millas de longitud, se utiliza el valor equivalente para camiones y autobuses en terreno nivelado, dado en la tabla VI.7. Para pendientes de por lo menos el 4% y mayores de 2 millas, se utilizan los valores específicos de la tabla VI.10. Para los vehículos recreacionales utilice el valor de terreno nivelado que aparece dado en la tabla VI.7 para todos los casos.

Cálculo del factor de ajuste para vehículos ligeros.

Una vez que se determinan el E_T y el E_R se calcula el f_{hv} mediante:

$$f_{hv} = 1 / [1 + P_T (E_T - 1) + P_R (E_R - 1)] \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

f_{hv} = Factor de ajuste por el efecto combinado de camiones, autobuses y vehículos recreacionales.

E_T, E_R = Equivalentes a vehículos ligeros para camiones, autobuses y vehículos recreacionales.

P_T, P_R = Proporción de camiones, autobuses y vehículos recreacionales.

- Distribución del volumen por carril:

No es necesario saber el volumen por carril para determinar la capacidad y el nivel de servicio de las carreteras de carriles múltiples; sin embargo pueden existir situaciones en donde esta distribución sea útil. Algunos datos de campo han mostrado que a altos volúmenes (equivalentes a los niveles de servicio D y E), es subutilizado el carril derecho de la carretera.

Para una carretera de 4 carriles, se espera que, en un sentido, el 40% del tránsito circule por el carril derecho; y el 60 % restante lo haga por el carril izquierdo.

Para una carretera de 6 carriles, se espera que, en un sentido, el 25% del tránsito circule por el carril derecho; el 37.5 % lo haga por el carril central y el 37.5% por el carril izquierdo.

- Determinación del Nivel de Servicio:

El nivel de servicio puede determinarse directamente de la figura VI.3 mediante los valores de la velocidad de flujo libre (FFS) y el del flujo de servicio (v_p) en vl/h/carr. a través del procedimiento siguiente:

Paso 1.- Definir y dividir apropiadamente la carretera.

Paso 2.- Basándose en la velocidad de flujo libre actual, dibujar la curva Flujo-Velocidad de la misma forma que las curvas típicas. Esta curva debe interceptar el eje de las "y" a la velocidad de flujo libre.

Paso 3.- Encontrar el punto sobre el eje de las "x" que corresponde al valor de flujo apropiado (v_p) en vl/h/carr.

Paso 4.- Leer hacia la curva FFS (velocidad de flujo libre) identificada en el paso 2 y determine la velocidad de viaje promedio, en vehículos ligeros, correspondiente a ese punto.

Paso 5.- Determinar el nivel de servicio, al distinguir la región de densidad dentro de la cual cae el punto de la curva FFS. Estas regiones están marcadas en la figura VI.3. También se puede calcular la densidad mediante:

$$D = v_p / S \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde:

D = Densidad (vl/mill./carr.)

v_p = valor de flujo de servicio (vl/h/carr.)

S = Velocidad de viaje promedio en vehículos ligeros (mph).

El nivel de servicio puede derivarse de los rangos de densidad mostrados en la tabla VI.1.

En la figura VI.4 se muestra un ejemplo gráfico de estos pasos, para una carretera de carriles múltiples, con una velocidad de flujo libre igual a 52 mph y un valor de flujo igual a 1700 vl/h/carr.

También se puede obtener el nivel de servicio de la tabla VI.1, determinando el valor de flujo (MSF) para cada nivel de servicio para la velocidad de flujo libre (FFS) apropiada o por la interpolación entre las FFS adyacentes, (si es necesario) y el nivel de servicio, en el cual está el valor de flujo.

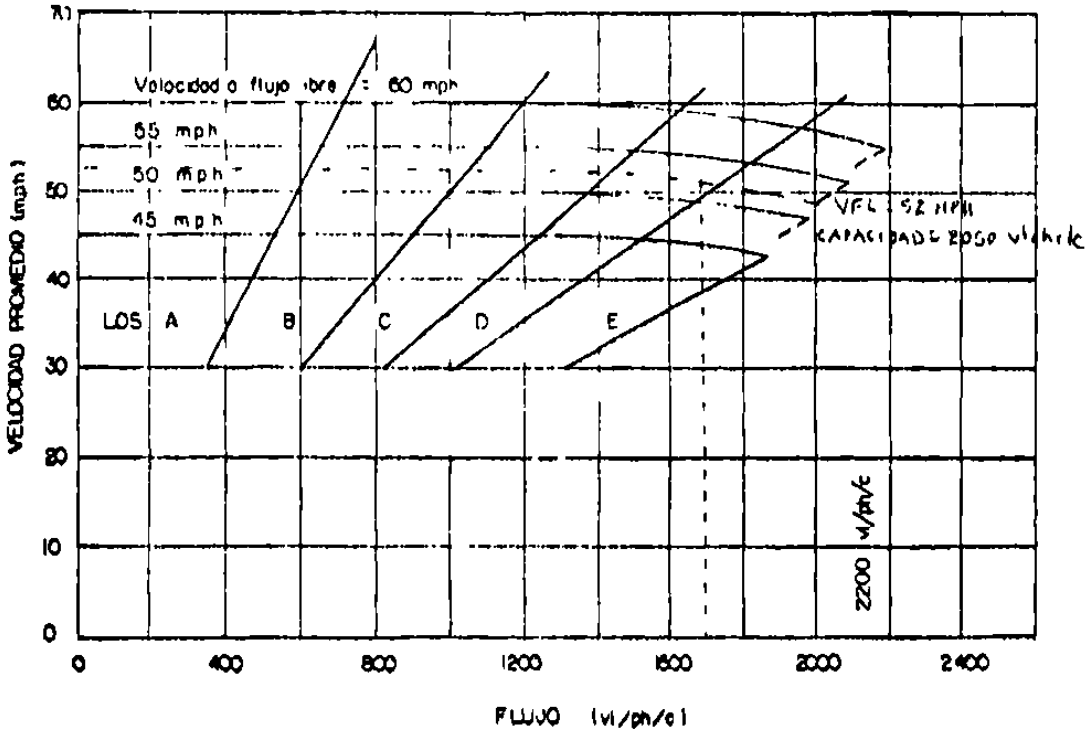


Figura VI.4. Ejemplo en el que se emplea la gráfica con curvas Flujo Velocidad.

- División de la carretera:

Las siguientes son situaciones que imponen la necesidad de dividir un tramo de carretera para su análisis:

* Un cambio en el número básico de carriles.
* Un cambio en la faja separadora central.
* Un cambio de pendiente de 2% o mayor o una pendiente constante de más de 4000 pies.
* La presencia de semáforos.
* Un cambio significativo en la densidad de accesos dentro de una área definida en la ruta.
* Diferentes límites de velocidad.
* La presencia constante de embotellamientos.

La longitud mínima para un tramo en estudio debe ser de 2500 pies El límite del estudio donde hay intersecciones semaforizadas no debe estar más cerca de 1/4 de milla de la intersección.

VI.5. Procedimientos de aplicación

Hay tres principales procedimientos para el análisis de capacidad: el análisis operacional, el de diseño y el de planificación.

- Análisis operacional:

En este caso, se deben conocer las condiciones geométricas y del tránsito para una carretera existente o estimadas, para una carretera futura. El objetivo es determinar el nivel de servicio y estimar la velocidad de viaje y la densidad del tránsito en una carretera de carriles múltiples.

Con este análisis se pueden realizar comparaciones de las condiciones de flujo para los diferentes niveles en los volúmenes y el número de carriles, para establecer los impactos del cambio del número de accesos, además de desarrollar varias alternativas que pudieran utilizarse para mejorar el nivel de servicio y la velocidad de viaje en una carretera de carriles múltiples.

- Datos necesarios:

1. **Geometría.** Deben estar especificados en detalle, e incluyen: (a) el número de carriles, (b) el ancho de carril, (c) la distancia de los obstáculos laterales, (d) el % de pendientes, (e) las longitud de las pendientes, (f) el tipo de terreno.
2. **Volumen.** Deben conocerse los volúmenes existentes o asignados en vehículos por hora (v/h) para la hora de interés (generalmente la hora de máxima demanda).
3. **Velocidad**. Debe conocerse la velocidad de flujo libre existente para los vehículos ligeros ya sea medida directamente o estimada para la hora de interés.
4. **Características del tránsito**. Se requieren, en forma detallada, por lo menos: (a) el factor horario de máxima demanda, (b) porcentaje de camiones y autobuses y (c) el porcentaje de vehículos recreacionales.
5. **Entorno de la carretera**. La carretera debe clasificarse, ya sea como dividida o no dividida y también debe establacerse el número de accesos (caminos e intersecciones no semaforizadas), para ambos lados del camino.

- División del camino:

El procedimiento del análisis se aplica mejor en tramos con características uniformes. Es necesario dividir la carretera en tramos donde existan cambios significativos, tanto en el camino como en las características del tránsito. Las

intersecciones semaforizadas deben ubicarse por lo menos a un cuarto de milla (400 mts.) de donde termina el tramo, debido a que éstas afectan la velocidad y el volumen. Una división adecuada del camino en tramos uniformes evitará obtener niveles de servicio erróneos.

- Pasos para el cálculo:

Puede lograrse un procedimiento general, usando las ecuaciones 1 y 3, para obtener la velocidad de flujo libre (FFS) y el valor de flujo de servicio (v_p) cuando no estén disponibles las velocidades medidas en el campo.

Los valores obtenidos se utilizan para encontrar la densidad y el nivel de servicio, en las figuras VI.2 y VI.3 y en la tabla VI.1.

Paso 1.- Se determina la velocidad de flujo libre del tramo en estudio, ya sea mediante mediciones directas en campo con vehículos ligeros o usando datos de un camino similar. Si se estima la velocidad de flujo libre, mediante la ecuación VI.1 debe convertirse la velocidad de flujo libre ideal en la velocidad de flujo libre actual. Los ajustes necesarios se encuentran en las tablas adecuadas:

F_M tipo de faja separadora central (tabla VI.2).

F_{LW} ancho de carriles (ecuación 2 y tabla VI.3)

F_{LC} distancia a obstáculos laterales (tabla VI.4).

F_A densidad de puntos de acceso (tabla VI.5 ó VI.6).

Paso 2.- Se calcula el valor de flujo horario en vl/h/carr. para cada sentido del flujo usando la ecuación 3. El factor de ajuste para vehículos pesados se calcula utilizando la ecuación 4 y las tablas de VI.7 a VI.10.

Paso 3.- Se utiliza la figura VI.3 para establecer la curva Velocidad-Flujo a la velocidad de flujo libre apropiada. Después se determina la velocidad de viaje y el nivel de servicio, leyéndolos en el valor de flujo (vl/h/carr.).

Paso 4.- Se determina la densidad usando la tabla VI.1 y la figura VI.2 o usando la ecuación VI.5 para una mayor exactitud.

Paso 5.- Usando la tabla VI.1 se determina el valor de flujo de servicio máximo (Mv_p), la relación v/c máxima y la densidad máxima para un nivel de servicio dado.

Aquí se muestra una hoja de trabajo para el análisis operacional y el de diseño.

- Interpretación de resultados:

El análisis operacional da como resultado una estimación de las características de la corriente vehicular para el segmento en estudio.

Las densidades marcadas en la figura VI.3 están expresadas en vl/h/carr. Cuando se utilizan datos de campo, la densidad para determinar el nivel de servicio, deben convertirse los datos de v/mill/carr. en vl/mill/carr., usando las equivalencias para vehículos pesados, antes de compararlos con los criterios de densidad de la tabla VI.1. Las velocidades mostradas en la figura VI.3 están tomadas de valores correspondiente a vehículos ligeros en la corriente del tránsito

Aunque el efecto de los volúmenes de vuelta no están considerados explícitamente en este análisis, algo de su efecto se evalúa en el ajuste de los puntos de acceso. La habilidad de los conductores para cambiar de carril y la presencia de acotamientos y carriles de vuelta juegan un papel importante para minimizar la demora asociada a los vehículos que dan vuelta. Si los volúmenes de vueltas afectan significativamente al flujo vehicular, ya sea por altos volúmenes o por características geométricas muy

pobres, deben realizarse estudios de campo para determinar un ajuste apropiado a la velocidad atribuible a un acceso en particular.

Debe considerarse con extremo cuidado el uso de límites de velocidad establecidos para determinar las velocidades de flujo libre. Las investigaciones para este procedimiento indican que los límites de la velocidad son generalmente más bajos que el 85 porcentual de las velocidades. Los límites de la velocidad, que generalmente se establecen más bajos, no deben ser el punto de partida para determinar la velocidad de flujo libre. Un cambio de velocidad no necesariamente causa un cambio a las velocidades de flujo libre o al nivel de servicio.

Cuando el análisis arroja un nivel de servicio F, es útil estimar la formación de colas en el embotellamiento.

- Análisis de diseño:

Para este análisis debe hacerse una asignación de los volúmenes de tránsito futuros y deben estimarse las condiciones geométricas y de control del tránsito, como los límites de velocidad. Con estos datos y con un nivel de servicio preestablecido, puede lograrse un número estimado de los carriles que se necesitan en cada sentido, para el tramo en estudio.

Otra aplicación del diseño es la identificación del nivel de servicio que se logra, si se diseña un número mínimo de carriles (en vez de incrementar los carriles para mantener el nivel de servicio).

- Datos necesarios:

Este análisis requiere de datos menos detallados que el análisis anterior. Los datos necesarios son:

1. Las condiciones geométricas: (a) el ancho de los carriles, (b) la distancia a obstáculos laterales y el tipo de faja separadora central, (c) el tipo de terreno, (d) las pendientes y (e) la longitud de las pendientes.
2. Volumen: (a) el volumen horario de diseño direccional, (b) la composición del tránsito y (c) el factor horario de máxima demanda.
3. Entorno del camino: el desarrollo del entorno: rural o suburbano.

Normalmente se da el dato del nivel de servicio deseado o esperado. Muchos de los datos anteriores pueden controlarse en el proceso de diseño, variando las condiciones geométricas y del entorno que pueden afectar el número de carriles necesarios para lograr el nivel de servicio preestablecido.

- Relación con el criterio de diseño de la AASHTO:

Los valores de los niveles de servicio en las políticas de la AASHTO no se aplican directamente en este capítulo; sin embargo, los criterios de diseño de la asociación para carreteras de carriles múltiples son afines al uso de los siguientes valores de v/c:

1. Diseño rural = 0.50 (NS_B, 1000 vl/h/carr. máximo).
2. Diseño suburbano = 0.75 (NS_C, 1500 vl/h/carr. máximo).

- División del camino:

El diseño de carretera debe separarse en tramos uniformes. Los cambios en el nivel del terreno, las pendientes significativas, las uniones en donde la demanda del volumen cambia significativamente, los cambios en el desarrollo del entorno y otras condiciones similares indican la necesidad de iniciar un nuevo tramo para el análisis de diseño. Dentro de las pendientes significativas, deben considerarse por separado las pendientes ascendentes y las descendentes.

- Pasos para el cálculo:

El procedimiento general del análisis de diseño incluye la determinación del número de carriles N que se necesitan para llevar los volúmenes de tránsito esperados en un nivel de servicio deseado. Los pasos a seguir son:

Paso 1.- Estimar la velocidad de flujo libre ideal, según las condiciones locales o en un límite de velocidad anticipado. Debe tenerse cuidado cuando se utiliza el límite de velocidad para estimar la velocidad de flujo libre.

Paso 2.- Usando la ecuación 1, determinar la velocidad de flujo libre actual considerando las condiciones geométricas y del entorno estimadas. Los ajustes necesarios son:

F_M El tipo de faja separadora central (tabla VI.2).

F_{LW} El ancho de carriles (tabla VI.3).

F_{LC} La distancia a obstáculos laterales (Ecuación 2 y tabla VI.4)

F_A La densidad de los puntos de acceso (tabla VI.5 ó VI.6).

Paso 3.- Usando la figura VI.3, dibujar la curva velocidad flujo correspondiente a la velocidad de flujo libre actual.

Paso 4.- Usando la figura VI.3, determinar el valor de flujo necesario para alcanzar el nivel de servicio deseado. Este valor de flujo puede ser máximo, mínimo o en algún punto medio, dentro del intervalo del nivel de servicio, dependiendo de las metas del diseño.

Paso 5.- Usando la ecuación 3, estimar el número de carriles necesario para lograr el nivel de servicio deseado. Calcular el factor de ajuste para los vehículos pesados, usando la ecuación 4 y las tablas del VI.7 al VI.10.

Se muestra una hoja de trabajo para el análisis operacional y el de diseño.

- Interpretación de los resultados:

Normalmente el valor de N no es un número entero. Para decidir se toman el número superior o el inferior entero, deben considerarse algunos factores de tipo económico, ecológico, etc.

Para lograr cierta continuidad, debe tenerse cuidado cuando el número de carriles obtenido sea diferente para tramos sucesivos o en cada sentido del mismo segmento. El aumento o la disminución de los carriles no es práctico; aunque pueden considerarse en tramos con condiciones críticas.

En algunas pendientes específicas, puede necesitarse un número de carriles mayor en el sentido ascendente que en el descendente. Esto indica que se requiere un carril de ascenso.

- Análisis de planificación:

Este análisis tiene la finalidad de estimar el número de carriles necesarios para acomodar las condiciones de tránsito dadas. Difiere del análisis anterior en que el analista sólo tiene el dato disponible del valor del *TPDA* y una definición mínima de la vialidad que se está planeando. En este nivel no existen detalles de pendientes específicas y otras características geométricas. Las predicciones de los volúmenes no son precisas; por lo tanto, este análisis es aproximado y sirve para dar una idea general de las características geométricas que se necesitan.

- Datos necesarios:

Este análisis presume que las condiciones geométricas son ideales y que la corriente vehicular está formada por vehículos ligeros y pesados. La densidad de los puntos

de acceso supuestos limita las condiciones, ya sea urbanas o suburbanas. Los datos necesarios incluyen:

1. El TPDA asignado para el año de diseño.
2. La asignación de un porciento de camiones.
3. La velocidad de flujo libre ideal esperada para el camino.
4. La clasificación general del tipo de terreno.

Usando las velocidades de flujo libre de 60 y 50 mph; en condiciones ideales se desarrolló la tabla VI.11.

En la ecuación 1, la velocidad de flujo libre fue ajustada para 20 accesos por milla (todas las otras condiciones son ideales). Los límites de los flujos para los niveles del A al E se obtuvieron de la figura VI.3, utilizando un PHF de 0.90. Estos valores están en vl/h/carr., sin la presencia de los vehículos pesados. Los flujos vehiculares con distintos porcentajes de camiones se determinaron utilizando apropiadamente el factor de vehículos pesados.

Carretera				Longitud	
Límites				Análisis	
Año de análisis				Fecha	
VELOCIDAD A FLUJO LIBRE				**VOLUMEN**	
Dirección	1	2		Dirección	1 / 2
Medición en campo o velocidad a flujo libre estimada				Volumen	
o					
Límite de velocidad				Factor hora pico	PHF / PHF
o					
85 Percentil				Número de carriles	N / N
Velocidad flujo libre (Condiciones ideales)					
Faja separadora	F_M	F_M		Terreno (N,L,M) o	
				Pendiente %	
Ancho de carril	F_{LW}	F_{LW}		Longitud	
Obstáculos laterales	F_{LC}	F_{LC}		Camiones y autobuses	
				E_T	
Accesos/milla	F_A	F_A		Recreativos	
				E_R	
Velocidad a flujo libre FFS (para curva) (2)				F_{HV} (3)	F_{HV} (3)
RESULTADOS				V_p (vl/ph/c) (4)	

Dirección	V_p (vl/ph/c)	Velocidad a flujo libre	Promedio de velocidad de viaje	Nivel de servicio (LOS)	Densidad (5)
1					
2					

1 La medida en campo no esta disponible
2 $FFS = FFS_1 - F_M - F_{LW} - F_{LC} - F_A$
3 $F_{HV} = 1/(1+P_T(E_T-1)+P_R(E_R-1))$
4. $V_p = V/(N \times PHF \times F_{HV})$
5 Densidad = V_p/Promedio de velocidad de viaje

Figura VI.5.
HOJA DE TRABAJO
ANALISIS OPERACIONAL Y DISEÑO

- Pasos para el cálculo:

Paso 1.- El *TPDA* se convierte a *DDHV* usando la ecuación:

$$VPH = TPDA * k * D \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

VPH = Volumen horario de proyecto direccional

TPDA = Tránsito promedio diario anual.

k = Porción de TPDA que ocurre en el sentido de máxima demanda.

D = Proporción del tránsito en la hora de máxima demanda en el sentido de máxima demanda.

Los valores de k y D corresponden a las características regionales o locales.

Paso 2.- Se selecciona de la tabla VI.11 el valor de flujo máximo de servicio Mv_i para el porcentaje de camiones prevaleciente y el tipo de terreno para un nivel de servicio deseado.

Paso 3.- Se calcula el número de carriles necesarios en cada sentido, usando la ecuación:

$$N = VPH / (Mv_i)$$

Existe una hoja de trabajo para este análisis (figura VI.6)

CARRETERAS MULTICARRILES RURALES Y SUBURBANAS

HOJA DE TRABAJO ANALISIS DE PLANEACION

CARRETERA _____ ANALISTA _____
FECHA _____ LIMITES _____
AÑO DE ANALISIS _____

ASIGNATURA DE DATOS

TPDA _____ (vpd)
LIMITE DE VELOCIDAD _____ (mph)
TERRENO (N,L,M) _____
PORCENTAJE DE CAMIONES _____

	ZONA DE SERVICIO	
	SUBURBANA	*RURAL*
K	0 10	0 15
D	0 60	0 65

ANALISIS

VHP = TPDA x K x D VHP = _____ vph
VOLUMEN POR CARRIL·
N.S.
CARRETERA DE 4 CARRILES = _____ vph/2= _____ _____
CARRETERA DE 6 CARRILES = _____ vph/3= _____ _____

NIVEL DE SERVICIO											
VELOCIDAD A FLUJO LIBRE = 50 MPH Porcentaje de camiones							VELOCIDAD A FLUJO LIBRE = 50 MPH Porcentaje de camiones				
TERRENO	N.S.	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20
NIVEL (N)	A	590	580	570	550	540	490	470	460	450	440
	B	990	970	940	920	900	810	790	770	750	740
	C	1360	1330	1290	1260	1240	1130	1110	1080	1050	1030
	D	1620	1580	1540	1510	1470	1350	1320	1290	1260	123[illegible]
	E	1890	1840	1800	1760	1720	1710	1670	1630	1590	1550
LOMERIO (L)	A	590	540	500	460	420	490	440	410	370	350
	B	990	900	830	760	710	810	740	680	620	580
	C	1360	1240	1130	1050	970	1130	1030	950	870	810
	D	1620	1470	1350	1250	1160	1350	1230	1130	1040	960
	E	1890	1720	1580	1450	1350	1710	1550	1430	1320	1220
MONTAÑOSO (M)	A	590	480	[illegible]	[illegible]	[illegible]	490	390	320	280	24[illegible]
	B	990	[illegible]	660	[illegible]	[illegible]	[illegible]	650	540	[illegible]	[illegible]
	C	1360	1090	[illegible]	80[illegible]	680	[illegible]	910	[illegible]60	650	5[illegible]
	D	1620	1300	[illegible]	930	810	[illegible]	1080	900	[illegible]77	680
	E	1890	1510	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]13	1140	980	[illegible]

DATOS SUPUESTOS TODOS LOS VEH PESADOS SON CAMIONES
ANCHO DE CARRIL 12 pies
OBSTACULOS LATERALES > 6 pies

PHF= 0 90
PUNTOS DE ACCESO 20 POR MILLA
CARRETERA DIVIDIDA

Figura VI.6.
HOJA DE TRABAJO
ANALISIS DE PLANEACION

- Interpretación de resultados:

El número estimado de N procede de información general. Durante el proceso de diseño se necesitará ir definiéndose con mayor precisión la información.

Las carreteras de carriles múltiples, de 3 carriles por sentido, son raras y las de 4 carriles prácticamente no existen. Si los cálculos prescriben más de 4 carriles, esto significaría que una carretera de este tipo será inapropiada y que los accesos deben limitarse adecuadamente.

- Carreteras de tres carriles:

Las carreteras de tres carriles incluyen:

1. El uso del tercer carril central como un carril de vueltas izquierdas continuas (comúnmente usadas en las zonas suburbanas).
2. La asignación alternada del carril central, proporcionando carriles exclusivos de rebase alternado para cada sentido.
3. La operación permanente de una carretera de tres carriles con dos carriles en un sentido y uno en el sentido opuesto.

El tercer carril se utiliza principalmente para rebasar vehículos pesados (particularmente en pendientes) y para realizar las vueltas izquierdas. Este carril aumenta la capacidad de las carreteras de dos carriles, pero nunca se llegará a tener la capacidad de una carretera de 4 carriles.

VI.6. Ejemplos

Cálculo 1. Análisis operacional de unc autopista no dividida (sin faja separadora)

- Descripción:

Una sección de autopista no dividida de 3.25 millas en un terreno plano; generalmente tiene una velocidad de flujo libre de 46 mph medida en un índice de flujo de 1,000 vl/hr/c. A una distancia de 6,000 pies de la sección está un segmento de 3,200 pies con una pendiente de 2.5 por ciento.

Hay 14 entradas en cada lado del camino, en el segmento de 3,200 pies y aproximadamente 21 entradas por milla durante todo el resto de la sección. La sección transversal para el camino entero está compuesta de 4 carriles de 11 pies, con un hombro de 4 pies en cada lado. El volumen del tránsito es, durante toda la tarde de 1,900 vph., en ambas direcciones, con un 8% de vehículos pesados, un 3% de autobuses y un 2% de vehículos recreacionales (RV_r) El factor de hora pico es de 0.90.

- Objetivo:

Determinar la velocidad promedio de viaje para vehículos ligeros, la densidad del tránsito y el nivel de servicio para el flujo, en ambas direcciones

- Solución:

La velocidad, en flujo libre fué tomada en condiciones de volumen bajo, es por esto que esta velocidad no necesita ajuste.

El valor de 46 mph es la velocidad en flujo libre; ésta se gráfica sobre una copia de la figura VI.3 (ver figura VI.7).

El único cálculo requerido corresponde al índice de flujo de servicio. Una solución inicial se obtiene usando un segmento de terreno generalmente plano.

$$Vp = \frac{V}{(N)(PHF)(f_{HV})} \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

El factor de ajuste para vehículos pesados, f_{HV}, se calcula usando la ecuación 4.

$$f_{HV} = 1/\left[1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)\right] \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

E_T, es el equivalente a vehículos ligeros para camiones (vehículos pesados) y Autobuses, y está determinado por 1.5, (ver tabla VI.7). Esta equivalencia corresponde a un segmento amplio de terreno plano. Similarmente, E_R es 1.2. El resultado del factor de vehículos pesados es:

$$f_{HV} = 1/\left[1 + 0.11(1.5 - 1) + 0.02(1.2 - 1)\right]$$
$$f_{HV} = 0.94$$

El valor del flujo se calcula mediante:

$$Vp = (1900vph/(2.X0.90.X0.94) = 1,123vehs/hr/c$$

Como se muestra en la figura VI.4, el promedio de la velocidad de viaje en la sección total es de 46.0 mph y el nivel de servicio es "C". La densidad se calcula como 24.4 vl/mi/c. La figura VI.7, muestra esta parte de la solución y los cálculos trabajando en el análisis operacional. El único segmento que puede tener un diferente resultado es el de 3,200 pies y una pendiente de 2.5% analizando como una pendiente ascendente en una dirección y una descendente en la otra.

Para pendientes ascendentes del 2.5%, en aproximadamente 0.6 millas, el valor de E_T es 2.2. de la Tabla VI.8, por interpolación para 11% de camiones y autobuses en una pendiente ascendente entre 2 y 3% en ½ ó ¾ millas. E_R es 2.0 de la Tabla VI.9, para 2% de RV_S es una pendiente entre 2 y 3% y mas de ½ milla del longitud. Usando la ecuación 5, f_{HV} es 0.87.

El valor del flujo en pendientes ascendentes es:

$$Vp = (1{,}900vph)\ \ (2X0\,90X0\,87)\ \ \ 1{,}213pcphpl$$

En la gráfica de velocidad de flujo libre, la velocidad promedio esta aún en 46.0 mph, con un Nivel de Servicio "C", y una densidad de 26.4 vl/ml/c.

Para pendientes descendentes del 2.5%, en la misma distancia, resulta un valor diferente f_{HV}. Debido a que la pendiente es menor del 4%, los valores de E_T y E_R, son aquéllos usados en el análisis general de un terreno. El factor para vehículos pesados f_{HV}, ha sido obtenido como un valor alrededor de 0 94 y Vp como 1,123 pcphpl. El promedio de la velocidad de viaje en las pendientes descendentes es de 46.0 mph con un Nivel de Servicio "C" y una densidad de 24.4 vl/mi/c. La figura VI.8, muestra la solución para las pendientes descendentes.

Carretera: L-80	Longitud 3.25 mi
Límites: Milla 17 a la 21	Análisis U.E.I.T.
Año de análisis: 1996	Fecha Dic.-96

VELOCIDAD A FLUJO LIBRE

Dirección		1		2
Medición en campo o velocidad a flujo libre estimada		46		46
o				
Límite de velocidad				
o				
85 Percentil				
Velocidad flujo libre (Condiciones ideales)				
Faja separadora				
	F_M	-	F_M	-
Ancho de carril				
	F_{LW}	-	F_{LW}	-
Obstáculos laterales				
	F_{LC}	-	F_{LC}	-
Accesos/milla				
	F_A	-	F_A	-
Velocidad a flujo libre FFS (para curva 2)		46		46

VOLUMEN

Dirección	1		2	
Volumen		1900		1900
Factor hora pico	PHF	0.9	PHF	0.9
Número de carriles	N	2	N	2
Terreno (N,L,M) o	N		N	
Pendiente %				
Longitud				
Camiones y autobuses	11		11	
E_T	1.5		1.5	
Recreativos	2		2	
E_R	1.2		1.2	
	F_{HV} (3)	0.94	F_{HV} (3)	0.94
V_p (vl/ph/c) (4)	1123		1123	

RESULTADOS

Dirección	V_p (vl/ph/c)	Velocidad a flujo libre	Promedio de velocidad de viaje	Nivel de servicio	Densidad (5)
1	1123	46	46	C	24.4
2	1123	46	46	C	24.4

1. La medida en campo no esta disponible
2. $FFS = FFS_i - F_M - F_{LW} - F_{LC} - F_A$
3. $F_{HV} = 1/(1+P_T(E_T-1)+P_R(E_R-1))$
4. $V_p = V/(N \times PHF \times F_{HV})$
5. Densidad = V_p/Promedio de velocidad de viaje

Figura VI.7.A. Solución del cálculo Nº 1 (segmento general).

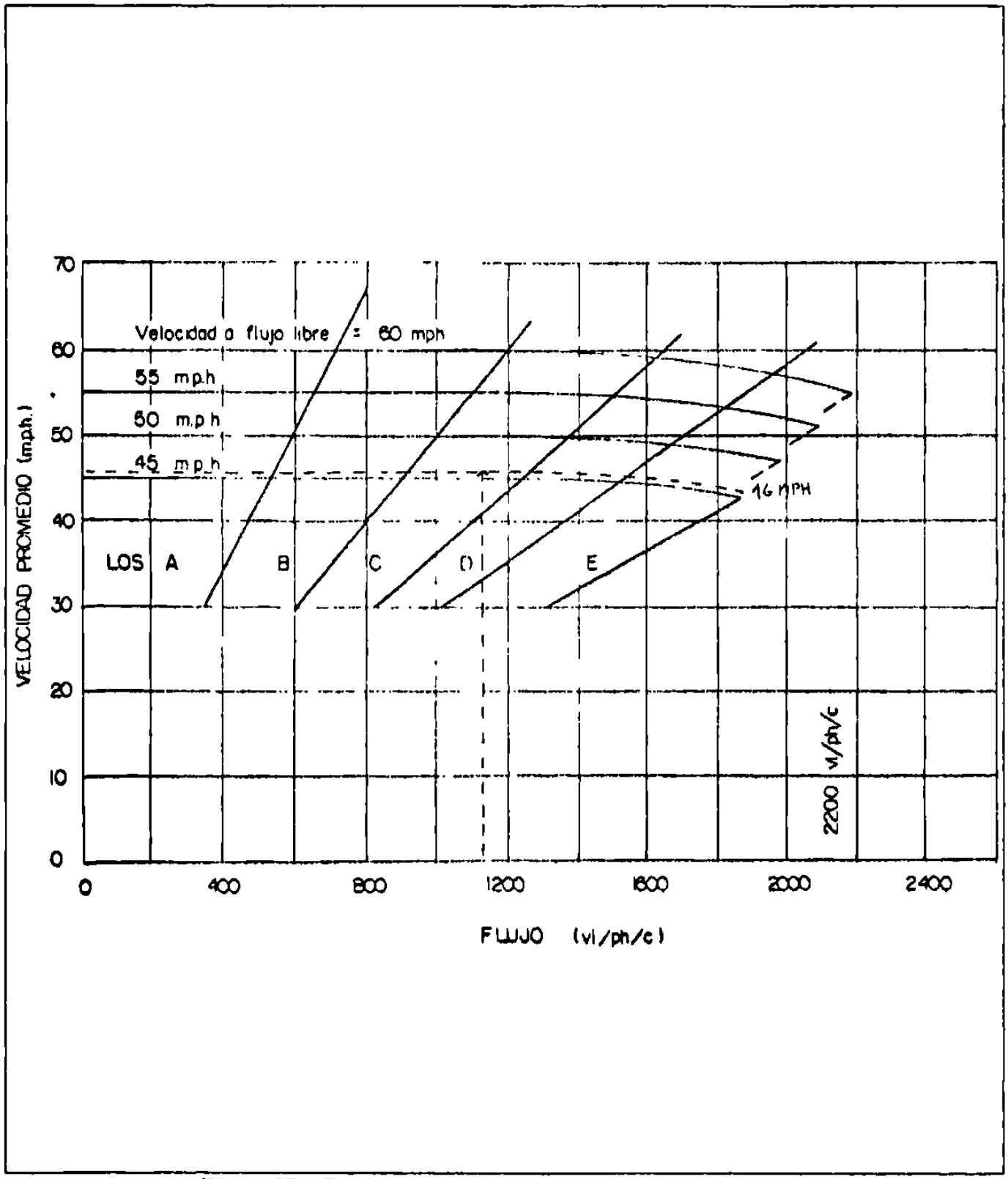


Figura VI.7.B. Solución del cálculo Nº 1 (segmento general).

HOJA DE TRABAJO

ANALISIS OPERACIONAL Y DISEÑO

Carretera N° 90	Longitud 3200
Límites:	Análisis U.L.J.T.
Año de análisis: 1996	Fecha Dic. 96

VELOCIDAD A FLUJO LIBRE					VOLUMEN				
Dirección		1		2	Dirección		1		2
Medición en campo o velocidad a flujo libre estimada		46		46	Volumen		1900		1900
o									
Límite de velocidad					Factor hora pico	PHF	0.9	PHF	0.9
o									
85 Percentil					Número de carriles	N	2	N	2
Velocidad flujo libre (Condiciones ideales)									
Faja separadora					Terreno (N,L,M) o				
	F_M	-	F_M		Pendiente %	+2.5		2.5	
Ancho de carril					Longitud	0.6 milla		0.6 milla	
	F_{LW}	-	F_{LW}	-					
Obstáculos laterales					Camiones y autobuses	11		11	
	F_{LC}	-	F_{LC}	-	E_T	2.3		1.5	
Accesos/milla									
	F_A	-	F_A	-	Recreativos	2		2	
Velocidad a flujo libre					E_R	2.0		1.2	
FFS (para curva (2))		46		46		F_{HV} (3)	0.84	F_{HV} (3)	0.91

RESULTADOS							
						V_p (vl/ph/c) (4)	1213 / 1123
Dirección	V_p (vl/ph/c)	Velocidad a flujo libre	Promedio de velocidad de viaje	Nivel de servicio (LOS)	Densidad (5)		
1	1213	46	46	C	26.4		
2	1123	46	46	C	24.4		

1 La medida en campo no esta dieponible

2 $FFS = FFS_1 - F_M - F_{LW} - F_{LC} - F_A$

3 $F_{HV} = 1/(1+P_T(E_T-1)+P_R(E_R-1))$

4 $V_p = V/(N \times PHF \times F_{HV})$

5 Densidad = V_p/Promedio de velocidad de viaje

Figura VI.8.A. Solución del cálculo N° 1 (segmento con pendiente).

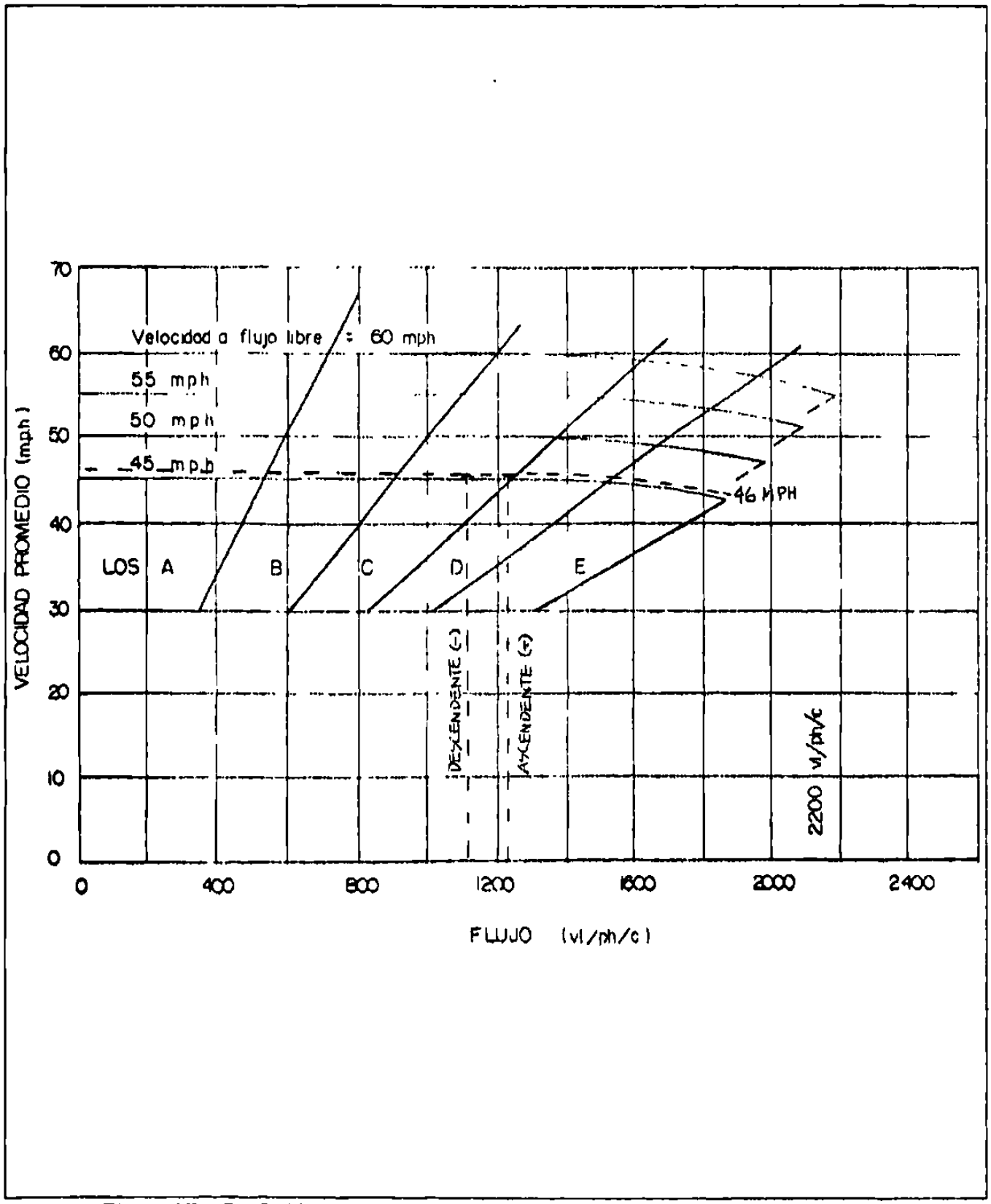


Figura VI.8.B. Gráfica de la solución del cálculo Nº 1 (segmento con pendiente).

Cálculo 2. Análisis operacional de una autopista dividida.

- Descripción:

Una autopista multicarril de este-oeste, tiene una sección transversal de 5 carriles y está compuesta por dos carriles, en cada dirección, separados por dos vías para carriles de vuelta izquierda. Los carriles miden 12 pies y hay suficiente espacio lateral en cada lado de la carretera. El área de estudio es cerca de 2 millas de longitud y contiene unos 6,000 pies de longitud, un 4% de pendiente ascendente, con rumbo al oeste, seguido por un terreno plano de 5,000 pies. La sección tiene un volumen de 1,500 vph en cada dirección con un 4% de camiones y un 4% d autobuses. El lado norte de la autopista tiene 27 puntos de acceso distribuidos igualmente, separadas, aproximadamente, en 300 pies en toda la sección. El lado sur tiene solo 10 puntos de acceso, todos localizados en la sección de terreno plano. La velocidad de los vehículos ligeros para el 85 percentil en la pendiente ascendente (rumbo al oeste) es de 48 mph y 54 mph en la pendiente descendente (rumbo al este). En la sección plana, la velocidad para el 85 percentil es de 52 mph, en ambas direcciones. El PHF es 0.90.

- Objetivo:

Determinar el nivel de servicio en el área propuesta

- Solución:

Propiamente, el análisis requiere que el área de 2 millas estudiada sea separada en dos segmentos; el segmento plano y el segmento con pendiente prolongada. Note que debido a que el número de puntos de acceso varía en cada dirección, el segmento nivelado debe ser evaluado en ambas direcciones. Las figuras VI.9 y VI.10, presentan el formato usado en este problema. El primer paso es determinar

el nivel de servicio para cada segmento, y calcular la velocidad del flujo libre para las condiciones ideales, por cada segmento, siguiendo el método práctico para las velocidades correspondientes al 85 percentil

Estas velocidades son; para:

* El segmento nivelado (ambas direcciones): 50 mph
* El segmento con pendiente prolongada:
* El segmento al oeste (pendiente ascendente), 49 mph
* El segmento al este (pendiente descendente), 52 mph.

La velocidad de flujo libre puede calcularse usando la Ecuación 1.

$$FFS = FFSI - FM - FLW \quad FLC - FA$$

FM= Ajuste por faja separadora, se determina usando la Tabla VI.2; incluye el *TWLTL*

FM= 0.0

FMZ= Ajuste por ancho de carril, y el *FLC*= Ajuste por obstáculos laterales, son ambos 0.0, son obtenidos de las Tablas VI.3 y VI.4

FA= Ajuste por la densidad en los puntos de acceso, se obtiene usando la Tabla VI.5.

Las densidades de los puntos de acceso por cada segundo son:

* Segmento plano:
    - Rumbo al oeste, 13 puntos de acceso por milla
    - Rumbo al este, 10 puntos de acceso por milla
* Segmento con pendiente prolongada:
    - Rumbo al oeste (pendiente ascendente), 13 puntos acceso por milla
    - Rumbo al este (pendiente descendente), 0 puntos de acceso por milla.

HOJA DE TRABAJO

ANALISIS OPERACIONAL Y DISEÑO

Carretera: N. 50	Longitud: 5 000 Pies
Limites:	Analista: O. E. L. T.
Año de análisis: 1996	Fecha:

VELOCIDAD A FLUJO LIBRE					VOLUMEN				
Dirección	1		2		Dirección	1		2	
Medición en campo o velocidad a flujo libre estimada					Volumen		1500		1500
o									
Límite de velocidad					Factor hora pico	PHF	0.9	PHF	0.9
o									
85 Percentil		52		52	Número de carriles	N	2	N	2
Velocidad flujo libre (Condiciones ideales)		50		50					
Faja separadora	5'		5'		Terreno (N,L,M) o	N		N	
	F_M	- 0	F_M	0	Pendiente %				
Ancho de carril	12'		12'		Longitud				
	F_W	- 0	F_W	0					
Obstáculos laterales	12'		12'		Camiones y autobuses	6		6	
	F_{LC}	- 0	F_{LC}	- 0	E_T	1.5		1.5	
Accesos/milla	13		10						
	F_A	- 3.3	F_A	- 2.5	Recreativos				
Velocidad a flujo libre FFS (para curva 2)		46.7		47.5	E_R				
						F_{HV} 3	0.97	F_{HV} 3	0.97
					V_p (vl/ph/c) 4	859		859	

RESULTADOS

Dirección	V_p (vl/ph/c)	Velocidad a flujo libre	Promedio de velocidad de viaje	Nivel de servicio (LOS)	Densidad 5
1	859	46.1	46.1	B	18.4
2	859	47.5	47.5	B	18.1

1. La medida en campo no esta disponible
2. $FFS = FFS_1 - F_M - F_W - F_{LC} - F_A$
3. $F_{HV} = 1/(1+P_T(E_T-1)+P_R(E_R-1))$
4. $V_p = V/(N \times PHF \times F_{HV})$
5. Densidad = V_p/Promedio de velocidad de viaje

Figura VI.9.A.. Solución del cálculo Nº 2 (segmento en nivel).

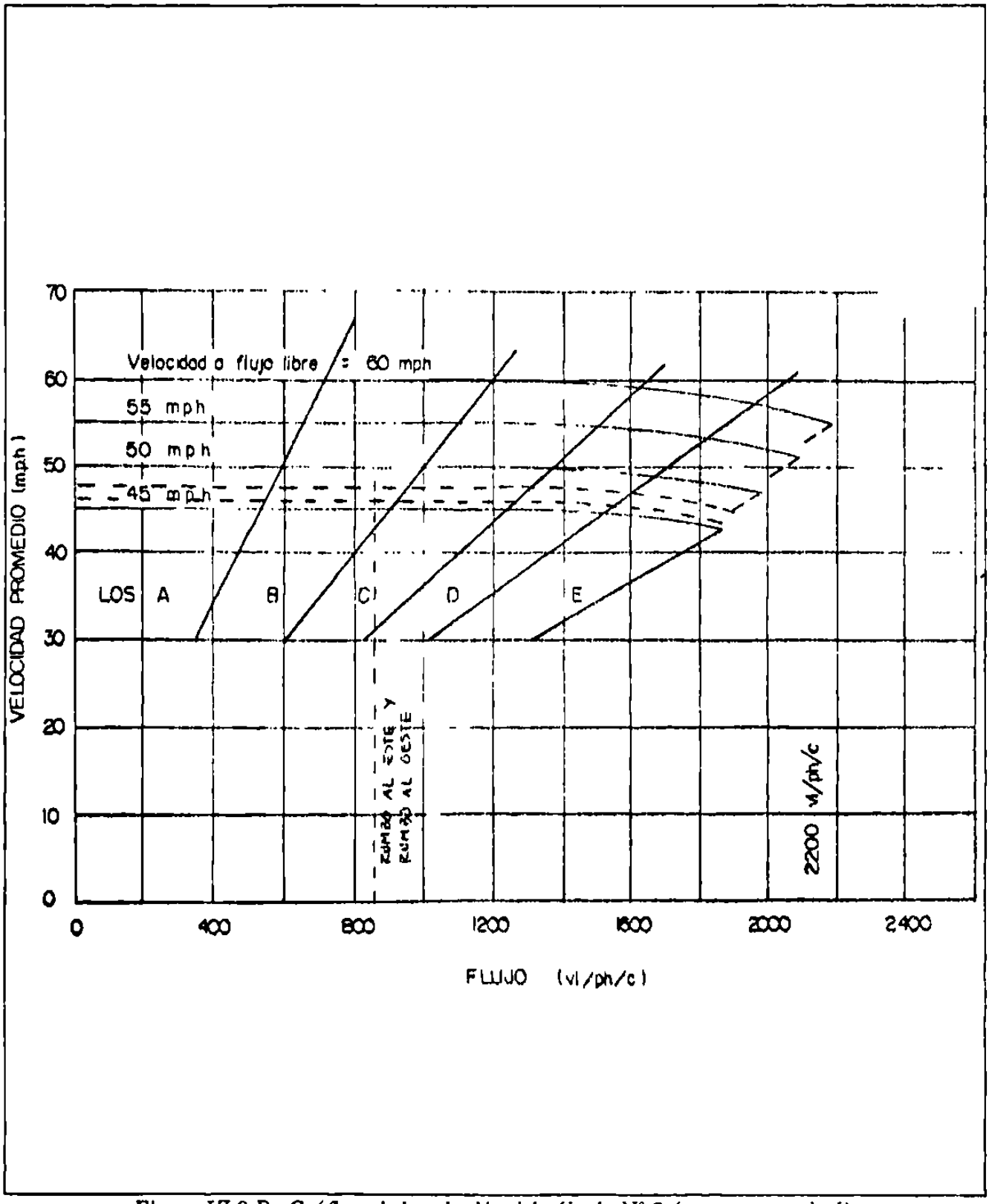


Figura VI.9.B. Gráficos de la solución del cálculo Nº 2 (segmento a nivel).

HOJA DE TRABAJO

ANALISIS OPERACIONAL Y DISEÑO

Carretera No. 30	Longitud 6000 Pies
Límites: Calle 40 a Calle 50	Analista D.L. I.
Año de análisis: 1996	Fecha Nov. 96

VELOCIDAD A FLUJO LIBRE					VOLUMEN				
Dirección	1 (RO)		2 (RL)		Dirección	1		2	
Medición en campo o velocidad a flujo libre estimada					Volumen		1500		1100
o									
Límite de velocidad					Factor hora pico	PHF	0.9	PHF	0.9
o									
85 Percentil		48		54	Número de carriles	N	2	N	2
Velocidad flujo libre (Condiciones ideales)		46		52					
Faja separadora	S		S		Terreno (N,L,M) o				
	F_M	- 0	F_M	- 0	Pendiente %	+4		-4	
Ancho de carril	12'		12'		Longitud	1.1 milla		1.1 milla	
	F_{LW}	- 0	F_{LW}	- 0					
Obstáculos laterales	12'		12'		Camiones y autobuses	6		6	
	F_{LC}	- 0	F_{LC}	- 0	E_T	7.0		1.0	
Accesos/milla	13		0						
	F_A	- 3.3	F_A	- 0	Recreativos	0		0	
Velocidad a flujo libre					E_R				
FFS (para curva 2)		42.7		52.0		f_p (3)	0.74	f_p (3)	0.91
RESULTADOS					V_p (vl/ph/c) (4)	1126		850	

Dirección	V_p (vl/ph/c)	Velocidad a flujo libre	Promedio de velocidad de viaje	Nivel de servicio (LOS)	Densidad (5)
1	1126	42.7	42.7	C	26.4
2	850	52.0	52.0	B	16.3

1 La medida en campo no esta disponible

2 $FFS = FFS_1 - F_M - F_{LW} - F_{LC} - F_A$

3 $F_{HV} = 1/(1+P_T(E_T-1)+P_R(E_R-1))$

4 $V_p = V/(N \times PHF \times f_{HV})$

5 Densidad = V_p/Promedio de velocidad de viaje

Figura VI.10.A. Solución del cálculo Nº 2 (segmento a nivel).

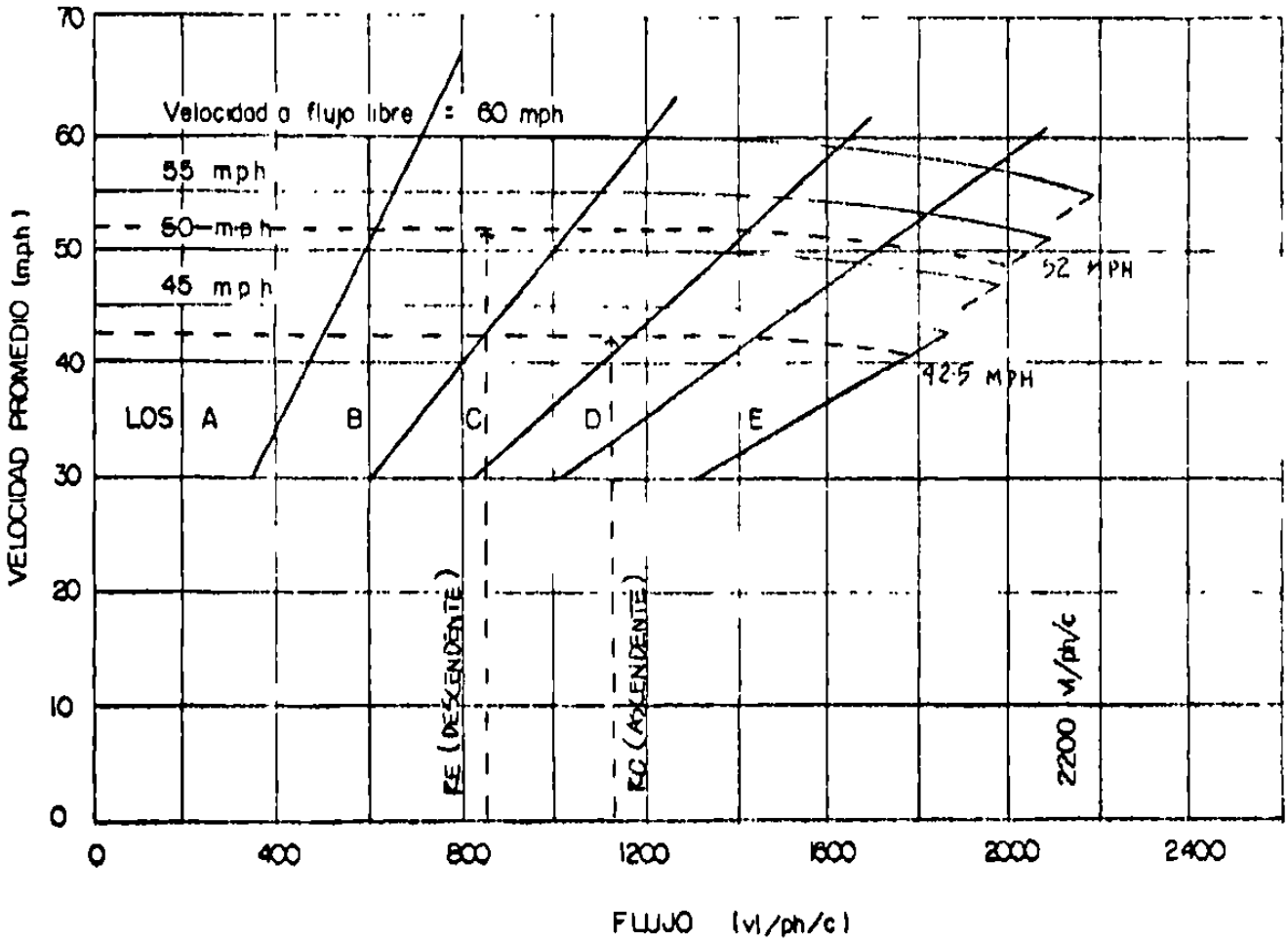


Figura VI.10.B. Gráfica de la solución del calculo N° 2 (segmento con pendiente).

De la Tabla VI.5, el ajuste por puntos de acceso para el segmento nivelado son 3.3 y 2.5 mph en las direcciones con rumbo al oeste y este, respectivamente es una reducción de 0.25 mph por punto de acceso. En el segmento con pendiente, *FA* para la pendiente (rumbo al oeste) es 3.3 mph y 0.0 mph para la pendiente descendente (rumbo al este).

Las velocidades del flujo libre, que resultaron después de los ajustes apropiados son 46.7 y 47.5, en las direcciones con rumbo al oeste y este del segmento nivelado; 42.7 en la pendiente ascendente (rumbo al oeste) y 52.0 en la pendiente descendente (rumbo al este). Las curvas de velocidad del flujo libre, apropiadas, pueden entonces trazarse en la figura VI.3.

El siguiente paso sería calcular el valor del flujo de servicio (Vp), por dirección; usando la Ecuación 3. El factor de ajuste por vehículos pesados se estima usando la Ecuación 4 Para el segmento nivelado E_T es 1.5 de la Tabla VI.10, reporta un E_T de 1.5, en la dirección de la pendiente ascendente. Los valores del flujo de servicio son colocados como:

* Segmento nivelado (ambas direcciones)= 859 vl/hr/c
* Segmento con pendiente (pendiente ascendente):
    - Rumbo al oeste (pendiente ascendente)= 1,126 vl/hr/c
    - Rumbo al este (pendiente descendente) = 859 vl/hr/c

Utilizando estos valores del flujo y de la velocidad del flujo libre se obtiene de las curvas flujo-velocidad, que el segmento nivelado opera en un nivel de servicio "B", en ambas direcciones. En la sección de pendiente constante, la pendiente ascendente opera en un nivel de servicio "C", mientras que la sección de pendiente descendente lo hace en el nivel de servicio "B".

HOJA DE TRABAJO

ANALISIS OPERACIONAL Y DISEÑO

CARRETERA NO. 10		Longitud 2.0 MILLAS	
LIMITES: CALLE 30 A LA 50		ANALISIS D.E.I.T.	
AÑO DE ANÁLISIS: 1996		FECHA NOV-96	

VELOCIDAD A FLUJO LIBRE					VOLUMEN				
DIRECCION		1 (IDEAL)		2 (A CRITERIO)	DIRECCION		1		2
Medición en campo o velocidad a flujo libre estimada					Volumen		3300		2300
o									
Límite de velocidad		50		50	Factor hora pico	PHF	0.9	PHF	0.9
o									
85 Percentil					Número de carriles	N	3	N	3
Velocidad flujo libre (Condiciones ideales)		55.0		55.0					
Faja separadora	5		3		Terreno (N, M) o	L		L	
	F_M	0	F_M	0	Pendiente %				
Ancho de carril	12'		11'		Longitud				
	F_W	0	F_W	1.9					
Obstáculos laterales	12'		10'		Camiones y autobuses	5		5	
	F_{LC}	0	F_{LC}	0.4	F	3.0		3.0	
Accesos/milla	10								
	F_A	2.5	F_A	2.5	Peatones	0		0	
Velocidad a flujo libre					E_R				
FFS (para curva (2))		52.5		50.2		F_{HV} (3)	0.91	F_{HV} (3)	0.91

RESULTADOS						V_p (vl/ph/c) (4)	1,343		1,343

Dirección	V_p (vl/ph/c)	Velocidad a flujo libre	Promedio de velocidad de viaje	Nivel de servicio (LOS)	Densidad (5)
1	1,343	52.5	52.5	C	25.6
2	1,343	50.2	50.2	C-D	26.8

1. La medida en campo no esta disponible
2. FFS = 55 − F_M − F_W − F_{LC} − F_A
3. F_{HV} = 1/(1 + P[illegible] + P_R([illegible]))
4. V_p = V/(N x PHF x F_{HV})
5. Densidad = V_p/Promedio de velocidad de viaje

Figura VI.11.A. Ilustración de la Solución del cálculo Nº 3.

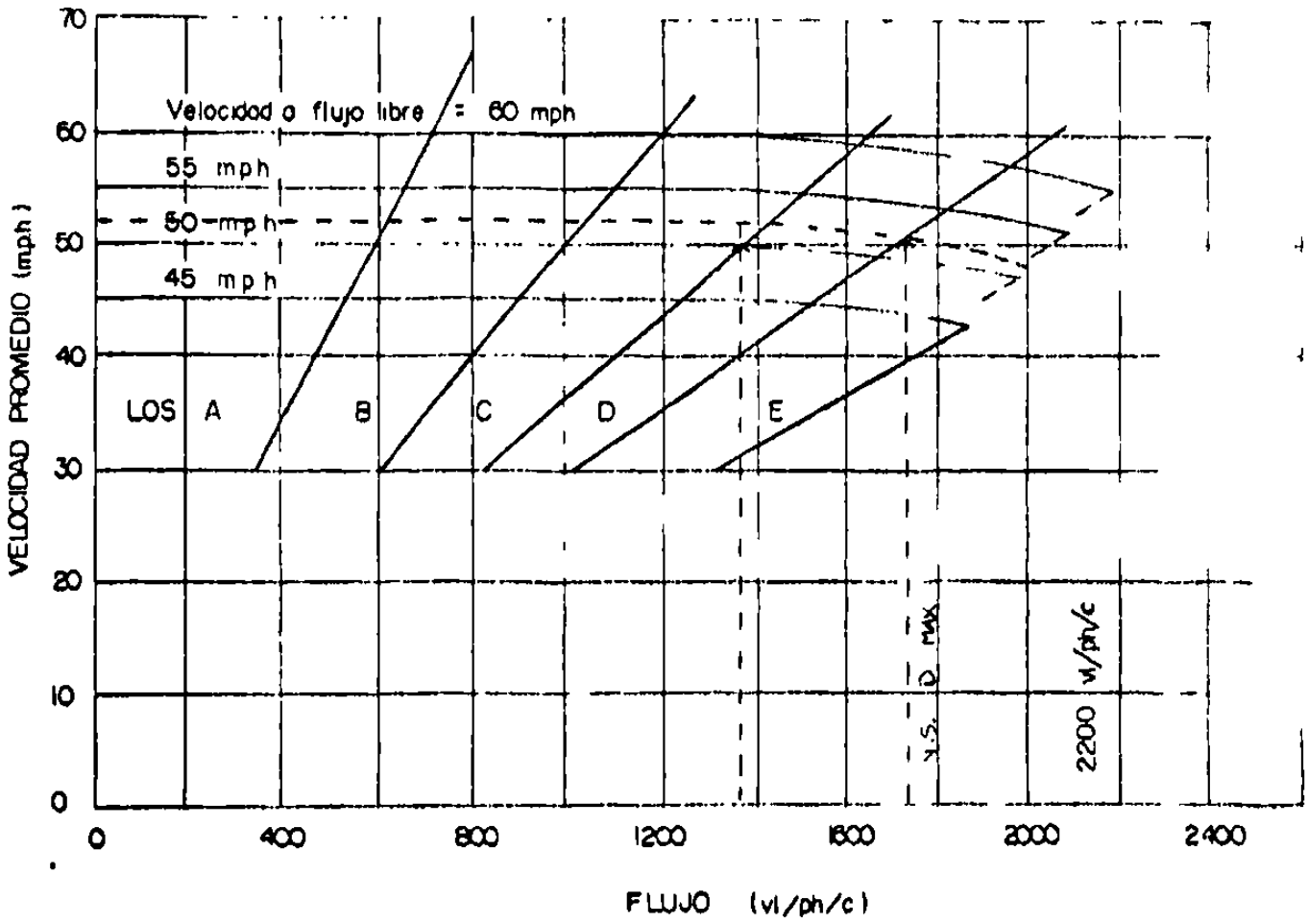


Figura VI.11.B. Gráfica de la Solución del cálculo Nº 3.

Cálculo 3. Diseño de una autopista multicarriles.

- Descripción:

Se pretende diseñar una sección de 2 millas de una autopista multicarriles, para obtener un volumen de tránsito promedio diario de 60,000 vehículos, en un nivel de servicio "D". Tomando en cuenta los datos de otras autopistas multicarriles locales. El volumen de horario de proyecto debe ser del 10%, con un 55/45 en la división direccional un *PHF* de 0.9 y un 5% de camiones.

Se espera que la autopista tenga un límite de velocidad de 50 mph y, aproximadamente, 10 puntos de acceso por milla, localizados en terreno montañoso. Existen derechos de vía por 90 pies.

- Objetivo:

Determinar la sección transversal correspondiente a un diseño crítico y encontrar la velocidad de viaje que se especificarán a los conductores en esta autopista

- Solución:

Un análisis de diseño permite al diseñador determinar, por el método de ensayo y error, la geometría apropiada, necesaria para proporcionar un nivel de servicio dado. Inicialmente, se asume que la sección transversal tendrá carriles de 12 pies, una elevación media y hombros de 6 pies o más, en cada dirección. Las restricciones impuestas para la validez del derecho de paso pueden investigarse La figura VI.11, muestra la hoja de trabajo a emplear, para resolver este problema.

Aplicando los porcentajes para el diseño del volumen horario y la distribución direccional resulta un volumen de 3,305 vph en la dirección hora pico. Se usa la Ecuación 3 y un factor de ajuste de vehículos pesados por dirección, de 2.4.

Asumiendo unas condiciones geométricas ideales, de 3 carriles por sentido, sera necesario prescribir una sección transversal de 6 carriles.

Según el más recto criterio de diseño, se estima que se requiere una faja separada de 12 pies, para permitir dar vuelta a los que lo necesiten; carriles de 12 pies y acotamientos de 10 pies, una sección transversal de 6 carriles podría requiere 104 pies de derecho de vía. Si la existencia de 90 pies de derecho de vía es el máximo permitido, una solución podría ser reducir el ancho de cada carril a 11 pies, permitiendo sólo 6 pies de faja separadora, 4 pies de acotamiento y 5 pies para contrarrestar el derecho de vía. El resultado es un espacio lateral total menor de 10 pies en cada sentido de circulación. La densidad de los puntos de acceso serían igual. Este particular diseño daría la velocidad del flujo libre de 50.2 mph. Una sección transversal de 6 carriles de este reducido diseño dará un nivel de servicio "D" y algunas veces un "C", para un valor del flujo de servicio estimado de 1,343 pcphpl. La velocidad de viaje promedio anterior sería 50.2 mph para esta sección transversal de 6 carriles.

De este modo, una carretera de seis carriles, dimensiones menores que las especificadas cumple los requerimientos de diseño y operación, para un nivel de servicio "D". Este diseño es sólo uno de tantos; sin embargo, este producira los requerimientos del nivel de servicio deseado. Además, el analisis no considera las señales de seguridad lo cual debe ser muy significativo

Cálculo 4. Análisis y rediseño de una carretera multicarriles existente.

- Descripción:

Una carretera dividida de 6 carriles, localizada en un lugar urbano, está sujeta a un programa de rehabilitación, para el mejoramiento de las operaciones del tránsito. La sección es de 2.5 millas, localizadas en terreno plano; tiene intersecciones semaforizadas en cada extremo y un semáforo a medio tramo. Esta última señal está siendo reemplazada por un paso en desnivel .

- Localización:

El índice del flujo actual para la hora pico es de 1,400 vl/hr/c y el tiempo de recorrido promedio, a través de la sección, es de 3.0 minutos. El acceso a la pendiente se da sólo en las intersecciones semaforizadas. La carretera actual tiene carriles de 11 pies, separados por una faja de 16 pies. El acotamiento en cada lado de la carretera mide 4 pies.

- Objetivo:

Determinar la velocidad de viaje esperado, debido al mejoramiento de la carretera cuando el paso a desnivel esté terminado. ¿Cuánto tránsito adicional puede ser esperarse al mejorar el nivel de servicio?.

HOJA DE TRABAJO

ANALISIS OPERACIONAL Y DISEÑO

CARRETERA	NO. 35	Longitud	2.5 MILLA
LIMITES:		Analista	D.E.I.T
AÑO DE ANÁLISIS	1996	Fecha	DIC-96

VELOCIDAD A FLUJO LIBRE					VOLUMEN				
Dirección		1		2	Dirección		1		2
Medición en campo o velocidad a flujo libre estimada	(ACTUAL)	50	(FUTURO)	60	Volumen				
o									
Límite de velocidad					Factor hora pico	PHF		PHF	
o									
85 Percentil					Número de carriles	N		N	
Velocidad flujo libre (Condiciones ideales)									
Faja separadora					Terreno (N,L,M) o				
	f_M	-	f_M	-	Pendiente %				
Ancho de carril					Longitud				
	F_{LW}	-	F_{LW}	-					
Obstáculos laterales					Camiones y autobuses				
	F_{LC}	-	F_{LC}	-	E_T				
Accesos/milla									
	F_A	-	F_A	-	Recreativos				
Velocidad a flujo libre FFS (para curva 2)		50		60	E_R				
						f_p (3)		f_p (3)	
RESULTADOS					V_p (vl/ph/c) (4)		1,400		1400

1. La medida en campo no esta disponible
2. $FFS = FFS_1 - F_M - F_{LW} - F_{LC} - F_A$
3. $F_{HV} = 1/(1+P_T(E_T-1)+P_R(E_R-1))$
4. $V_p = V/(PHF \times N \times f_{HV} \times f_p)$
5. Densidad = V_p / Promedio de velocidad de

Dirección	V_p (vl/ph/c)	Velocidad a flujo libre	Promedio de velocidad de viaje	Nivel de servicio (10%)	Densidad (5)
1	1400	50	50	D	28.0
2	1400	60	60	C	23.3

Figura VI.12.A. Solución del cálculo Nº 4.

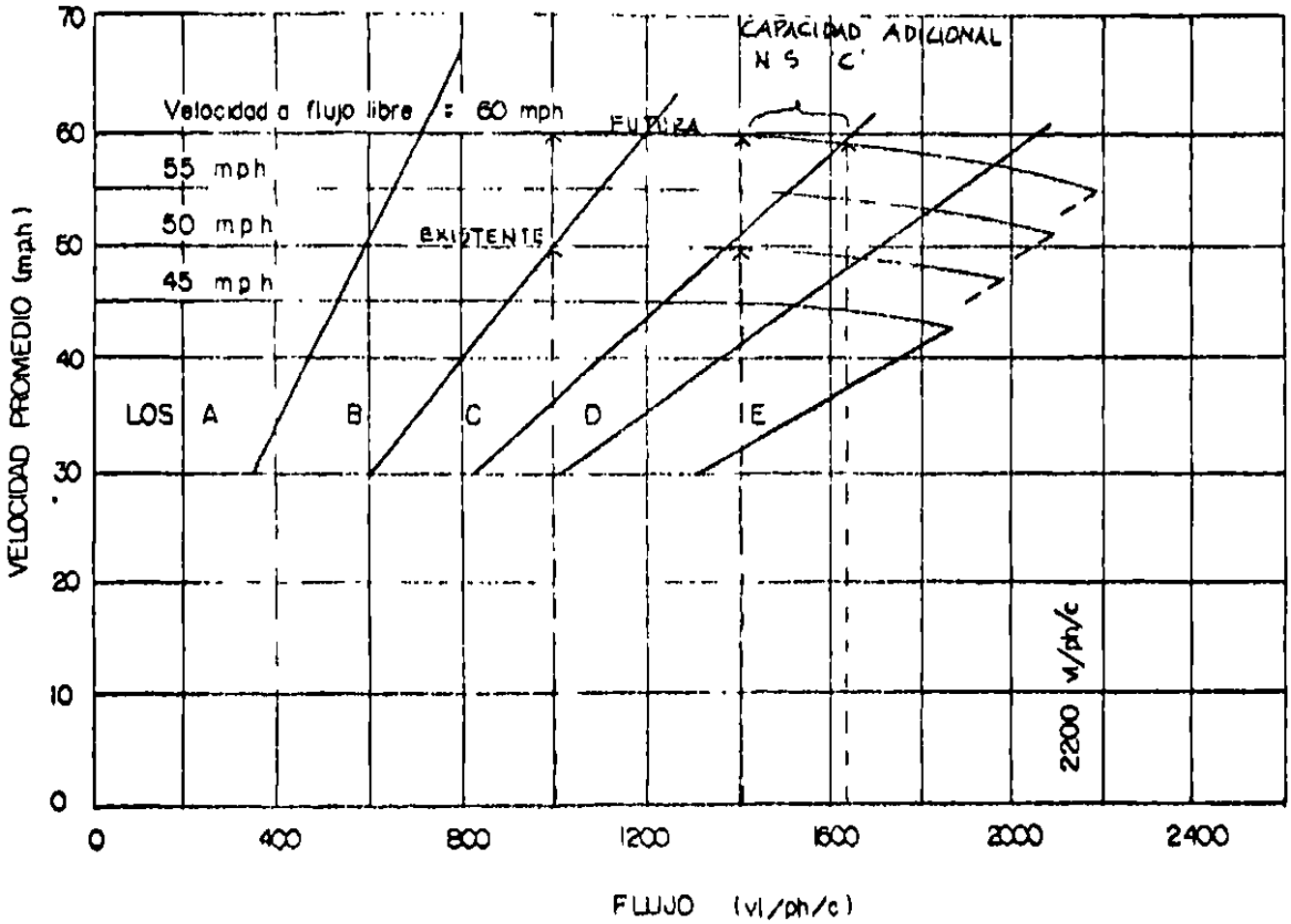


Figura VI.12.B. Gráfica de la Solución del cálculo Nº 4.

- Solución:

Encontrar la nueva velocidad del flujo libre, como resultado del cambio en el tiempo de recorrido. La existencia del paso en desnivel no es una razón para seccionar la carretera. La figura VI.12, muestra el resultado del análisis.

Antes de remover la señal, el tiempo promedio para atravesar la sección de 2.5 millas era de 180 segundos, en condiciones de flujo libre o a una velocidad promedio de 50 mph. Para el índice del flujo de 1,400 vl/hr/c el nivel de servicio es "D". Se cree que al remover la señal de tránsito se reducirá el tiempo de recorrido promedio, de 30 a 150 segundos Esto corresponde a una velocidad del flujo libre de aproximadamente 60 mph (no se espera un incremento en el volumen del tránsito, como resultado de la construcción del paso en desnivel).

Al marcar la nueva velocidad del flujo libre en la gráfica se lee un índice del flujo de 1,400 vl/hr/c y una velocidad de viaje promedio esperada de 60 mph en las condiciones del nivel de servicio 'C' De la lectura en la parte derecha de la curva de densidad y marcando los límites entre nivel de servicio "C' y "D", el valor de flujo máximo para un nivel de servicio "C" en 60 mph se estima, de 1,620 vl/hr/c. Del mismo modo, podrían añadirse 220 vehículos por carril y mantenerse el nivel de servicio "C".

Cálculo 5. Análisis de planeación para una nueva carretera.

- Descripción:

Se está desarrollando un nuevo corredor en las afueras del área metropolitana. La autopista será construida en aproximadamente 10 años. Las predicciones del tránsito futuro indican que la autopista deberá ser diseñada para que en ella circulen 42,000 vehículos por día, con un 5 a un 10% de camiones. Se anticipa que el corredor tendrá las condiciones de diseño ideales, atravesando terreno montañoso. De forma similar a las carreteras multicarriles, se espera que la velocidad del flujo libre en esta autopista sea de 50 mph.

- Objetivo:

Determinar el número de carriles necesarios par dar un nivel de servicio "C".

- Solución:

Por carecer de más información específica sobre la autopista y sobre el tránsito previsto, se puede proceder de la siguiente forma:

Designar el volumen horario de proyecto (VPH), usando la Ecuación 7.

$$VHP = TPDAxKxD$$

Donde:

TPDA= Refleja el comportamiento promedio en un año.

K = Representa el porcentaje del TPDA en la hora de diseño.

D = Refleja la distribución direccional del tránsito vehicular en una hora.

Para áreas suburbanas convienen asignar un valor de K=0.10, y uno de D=60/40. con estos valores:

$$VHP = 42{,}000 * 0.10 * 0.60$$
$$VHP = 2520 vhp$$

La hora de trabajo, figura VI.13, indica que con 6 carriles de sección y una velocidad del flujo libre de 50 mph, en condiciones ideales, se puede soportar un tráfico de 2850 a 3090 vph con un nivel de servicio "C". Los cálculos del análisis de planeación se pueden ver en la hoja de trabajo figura VI.13.

CARRETERAS MULTICARRILES RURALES Y SUBURBANAS

HOJA DE TRABAJO ANALISIS DE PLANEACION

CARRETERA Al corredor Industrial ANALISTA O.E.I.T.
FECHA D.C. - 96 LIMITES
AÑO DE ANALISIS 2.000

ASIGNATURA DE DATOS

TPDA 12 000 (vpd)
LIMITE DE VELOC DAD 50 (mph)
TERRENO (N,L M) L
PORCENTAJE DE CAM ONES 5-10

ZONA DE SERVICIO		
	SUBURBANA	RURAL
K	0 10	0 15
D	0 60	0 65

ANALISIS

VHP= 42000x0.1x0.6

VHP = TPDA x K x D VHP = 2520 vph

VOLUMEN POR CARRIL:

CARRETERA DE 4 CARRILES = 2520 vph/2= 1260 N.S. D
CARRETERA DE 6 CARRILES = 2520 vph/3= 840 B/C

NIVEL DE SERVICIO											
		VELOCIDAD A FLUJO L BRE = 60 MPH Porcentaje de cam ones					VELOC DAD A FLUJO LIBRE = 50 MPH Porcentaje de camiones				
TERRENO	N S	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20
NIVEL (N)	A	590	580	570	550	540	490	470	460	450	440
	B	990	970	940	920	900	810	790	770	750	740
	C	1360	1330	1290	1260	1240	1130	1110	1080	1050	1030
	D	1620	1580	1540	1510	1470	1350	1320	1290	1260	1230
	E	1890	1840	1800	1760	1720	1710	1670	1630	1590	1550
LOMERIO (L)	A	590	540	500	460	420	490	440	410	370	350
	B	990	900	830	760	710	810	740	680	620	580
	C	1360	1240	1130	1050	970	1130	1030	950	870	810
	D	1620	1470	1350	1250	1160	1350	1230	1130	1040	960
	E	1890	1720	1580	1450	1350	1710	1550	1430	1320	1220
MONTAÑOSO (M)	A	590	480	400	340	300	490	390	320	280	240
	B	990	790	660	570	500	810	650	540	460	410
	C	1360	1090	910	780	680	1130	910	760	650	570
	D	1620	1300	1080	930	810	1350	1080	900	770	680
	E	1890	1510	1260	1080	950	1710	1370	1140	980	860

DATOS SUPUESTOS TODOS LOS VEH PESADOS SON CAMIONES
ANCHO DE CARR L 12 pies
OBSTACULOS LATERALES > 6 pies

PHF= 0 90
PUNTOS DE ACCESO 20 POR MILLA
CARRETERA DIVIDIDA

Figura VI.13. Solución del cálculo Nº 5.

Tabla VI.1. Criterio del nivel de servicio para carreteras multicarriles.

	Velocidad a flujo libre															
	60 mph				*55 mph*				*50 mph*				*45 mph*			
N. S	*Máxima densidad (u/mi)*	*Veloc. promedio (mph)*	*Máx. v/c*	*Flujo máx. de servicio (u/ph)*	*Máxima densidad (u/mi)*	*Veloc. promedio (mph)*	*Máx. v/c*	*Flujo máx. de servicio (u/ph)*	*Máxima densidad (u/mi)*	*Veloc. promedio (mph)*	*Máx. v/c*	*Flujo máx. de servicio (u/ph)*	*Máxima densidad (u/mi)*	*Veloc. promedio (mph)*	*Máx. v/c*	*Flujo máx. de servicio (u/ph)*
A	12	60	0.33	720	12	55	0.31	600	12	50	0.30	600	12	45	0.28	540
B	20	60	0.55	1,200	20	55	0.52	1,100	20	50	0.50	1,000	20	45	0.47	900
C	28	59	0.75	1,650	28	54	0.75	1,510	28	50	0.70	1,400	28	45	0.66	1,260
D	34	57	0.89	1,940	34	53	0.86	1,800	34	49	0.84	1,670	34	44	0.79	1,500
E	40	55	1.00	2,200	41	51	1.00	2,100	43	47	1.00	2,000	45	42	1.00	1,900

Nota: *La relación matemática exacta entre la densidad no siempre se mantiene en los límites de los niveles de servicio, debido a los valores redondeados. La densidad es el principal determinante de los niveles de servicio. El nivel de servicio "F", se caracteriza por un flujo del tránsito inestable y variable. Es difícil predecir el índice del flujo exacto, y la densidad velocidad en el nivel de servicio "F".*

Tabla VI.2. Ajuste por tipo de faja separadora.

TIPO DE FAJA	REDUCCION EN VELOCIDAD DE FLUJO LIBRE (MPH)
Carreteras no divididas	1.6
Carreteras divididas	0.0

Tabla VI.3. Ajuste por ancho de carril.

ANCHO DE CARRIL (PIES)	REDUCCION EN VELOCIDAD DE FLUJO LIBRE (MPH)
10	6.6
11	1.9
12	0.0

Tabla VI.4. Ajuste por obstáculos laterales.

CARRETERAS DE 4 CARRILES		CARRETERAS DE 6 CARRILES	
Distancia del obstáculo lateral (pies)	*Reducción en velocidad del flujo libre (mph)*	*Distancia del obstáculo lateral (pies)*	*Reducción en velocidad del flujo libre (mph)*
12	0.0	12	0.0
10	0.4	10	0.4
8	0.9	8	0.9
6	1.3	6	1.3
4	1 8	4	1.7
2	3.6	2	2.8
0	5.4	0	3.9

Nota: *La distancia del obstáculo lateral total es la suma de la distancia del obstáculo lateral de la faja (si es mas grande que 6 pies, usar 6 pies) y el acotamiento (si es mas grande que 6 pies, usar 6 pies). Por lo tanto, para el análisis propuesto, la distancia de obstáculo lateral total no puede exceder de 12 pies.*

Tabla VI.5. Ajustes por densidad de puntos de acceso.

PUNTOS DE ACCESO POR MILLA	REDUCCION EN VELOCIDAD DE FLUJO LIBRE (MPH)
0	0.0
10	2.5
20	5.0
30	7.5
40 ó más	10.0

Tabla VI.6. Número de puntos de acceso según el nivel de desarrollo esperado.

TIPO DE DESARROLLO	PUNTOS DE ACCESO POR MILLA (EN UN SENTIDO DE LA CARRETERA)
Rural	0-10
Suburbano de bajo desarrollo	11-20
Suburbano de alto desarrollo	21 ó más

Tabla VI.7. Vehículos ligeros equivalentes en un tramo de una carretera multicarril.

	TIPO DE TERRENO		
Factor	*Plano*	*Lomerio*	*Montañoso*
E_T (autobuses y camiones)	1.5	3.0	6.0
E_R (vehículos recreativos)	1.2	2.0	4.0

Tabla VI.8. Vehículos ligeros equivalentes para autobuses y camiones en pendientes ascendentes (E_T).

Pendiente %	Longitud (mi)	E_T [a]								
Porcentaje de autobuses y camiones		*2*	*4*	*5*	*6*	*8*	*10*	*15*	*20*	*25*
<2	Todo	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
2	0-¼	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	¼-½	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	½-¾	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	¾-1	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	1-1½	4.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	>1½	4.5	3.5	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
3	0-¼	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	¼-½	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5
	½-¾	6.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.0
	¾-1	7.5	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0
	1-1½	8.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0
	>1½	8.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0
4	0-¼	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	¼-½	5.5	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5
	½-¾	9.5	7.0	6.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5
	¾-1	10.5	8.0	7.0	6.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0
	> 1	11.0	8.0	7.5	7.0	6.0	6.0	5.0	5.0	4.5
5	0-¼	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	¼-1/3	6.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.0
	1/3-½	9.0	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5
	½-¾	12.5	9.0	8.5	8.0	7.0	7.0	6.0	6.0	5.0
	¾-1	13.0	9.5	9.0	8.0	7.5	7.0	6.5	6.0	5.5
	> 1	13.0	9.5	9.0	8.0	7.5	7.0	6.5	6.0	5.5
6	0-¼	4.5	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0
	¼-1/3	9.0	6.5	6.0	6.0	5.0	5.0	4.0	3.5	3.0
	1/3-½	12.5	9.5	8.5	8.0	7.0	6.5	6.0	6.0	5.5
	½-¾	15.0	11.0	10.0	9.5	9.0	8.0	8.0	7.5	6.5
	¾-1	15.0	11.0	10.0	9.5	9.0	8.5	8.0	7.5	6.5
	> 1	15.0	11.0	10.0	9.5	9.0	8.5	8.0	7.5	6.5

Nota: *Si una longitud de pendiente cae en una condición límite, se usa el equivalente de la pendiente más grande de la división.*

[a] Carreteras de cuatro a seis carriles.

Tabla VI.9. Vehículos ligeros equivalentes para vehículos recreativos en pendientes ascendentes (E_R).

Pendiente %	Longitud (mi)	E_R [a]								
Porcentaje de recreativos		*2*	*4*	*5*	*6*	*8*	*10*	*15*	*20*	*25*
≤2	Todo	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
3	0-½	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	> ½	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2
4	0-¼	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	¼-½	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	>½	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5
5	0-¼	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	¼-½	4.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> ½	4.5	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0
6	0-¼	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5
	¼-½	6.0	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0
	> ½	6.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.0

Nota: *Si una longitud de pendiente cae en una condición limite, es usado el equivalente de la pendiente mas grande de la división.*

[a] Carreteras de cuatro a seis carriles.

Tabla VI.10. Vehículos ligeros equivalentes para vehículos pesados (camiones) en pendiente descendente E_T

Pendiente %	Longitud (mi)	E_T [a]			
Porcentaje de camiones		*5*	*10*	*15*	*20*
<4	Todo	1.5	1.5	1.5	1.5
4	≤4	1.5	1.5	1.5	1.5
4	>4	2.0	2.0	2.0	1.5
5	≤4	1.5	1.5	1.5	1.5
5	>4	5.5	4.0	4.0	3.0
6	≤2	1.5	1.5	1.5	1.5
6	>2	7.5	6.0	5.5	4.5

[a] *Carreteras de 4 ó 6 carriles*

Tabla VI.11. Flujo vehicular por carril, según el nivel de servicio usado para el análisis de planeación (proyecto).

TIPO DE TERRENO	NIVEL DE SERVICIO	VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE (CONDICIONES IDEALES)= 60 MPH					VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE (CONDICIONES IDEALES)= 50 MPH				
% Camiones		*0*	*5*	*10*	*15*	*20*	*0*	*5*	*10*	*15*	*20*
Plano	A	590	580	570	550	540	490	470	460	450	440
	B	990	970	940	920	900	810	790	770	750	740
	C	1,360	1,330	1,290	1,260	1,240	1,130	1,110	1,080	1,050	1,030
	D	1,620	1,580	1,540	1,510	1,470	1,350	1,320	1,290	1,260	1,230
	E	1,890	1,840	1,800	1,760	1,720	1,710	1,670	1,630	1,590	1,550
Lomerio	A	590	540	500	460	420	490	440	410	370	350
	B	990	900	830	760	710	810	740	680	620	580
	C	1,360	1,240	1,130	1,050	970	1,130	1,030	950	870	810
	D	1,620	1,470	1,350	1,250	1,160	1,350	1,230	1,130	1,040	960
	E	1,890	1,720	1,580	1,450	1,350	1,710	1,550	1,430	1,320	1,220
Montañoso	A	590	480	400	340	300	490	390	320	280	240
	B	990	790	660	570	500	810	650	540	460	410
	C	1,360	1,090	910	780	680	1,130	910	760	650	570
	D	1,620	1,300	1,080	930	810	1,350	1,080	900	770	680
	E	1,890	1,510	1,260	1,080	950	1,710	1,370	1,140	980	860

Nota: *Anchos de carril de 12 pies y acotamientos de 6 pies, PHF=0.9; Número de acceso =20 por milla, Carretera dividida.*

VII. DETERMINACION DE LA INFLUENCIA DEL ESTADO SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO EN LA CAPACIDAD VIAL DE LAS CARRETERAS MULTICARRILES

VII.1. Estudios de Ingeniería de Tránsito

a) Inventario

El conocimiento de la situación física actual, del lugar donde se encuentra alojada una obra vial en estudio es uno de los elementos de juicio importante para el ingeniero de tránsito, pues le permite ubicar los obstáculos y las dificultades que se presentarán en las diferentes alternativas a elegir, intentando adaptar lo mejor posible las soluciones, a las condiciones del lugar

Los inventarios para este estudio pueden ser:

- Físicos
- Geométricos
- De Señalamiento.

Entre los inventarios de señalamiento encontramos:

- Verticales
- Horizontales
- Semáforos.

Otros inventarios que aportan una rápida información sobre algunas rutas especiales de vehículos y otros tópicos relacionados con los anteriores son los Mapas.

Datos que pueden encontrarse en los mapas:

- La clasificación funcional de las calles.
- El control de las intersecciones (señales de alto, ceda el paso, etc.).
- Las identificación del sentido único del tránsito.
- Las rutas y los límites de paso del transporte de carga.
- La altura libre y las estructuras, en los pasos en desnivel.
- Las rutas y las paradas del transporte público de pasajeros.
- Los límites de velocidad permitidos.
- Las rutas de emergencia.
- Los aforos de tránsito.
- Los mapas de las frecuencias de accidentes.
- Los usos del suelo oficiales.
- Etc.

Además, se deben de elaborar mapas específicos para mostrar los siguientes datos:

- Los sistemas de semáforos interconectados.
- Las restricciones de estacionamiento en la vía pública.
- La localización de estacionamientos fuera de la vía pública.
- La distribución de alumbrado público
- El ancho de las calles.
- Los mapas del catastro o los planos de lotificación en los fraccionamientos.
- La clasificación operacional de la red vial.
- Los estudios de accidentes de tránsito.
- Etc.

Inventario Geométrico

En las intersecciones estudiadas, se elaboró un inventario geométrico, el cual tiene como finalidad la de conocer la estructura básica de la red vial, para así poder definir un marco de referencias, en el cual pudiesen quedar inscritas todas las acciones inherentes al tránsito. El mencionado inventario consiste, generalmente, en obtener el dimencionamiento de los elementos viales y de las propiedades aledañas. Las características a conocer son:

- Las distancias horizontales

→Ancho de carriles
→Zona de cruce peatonal
→Banquetas.
→Rayas separadoras.

- Las distancias a postes, semáforos, señales, límites de propiedad, etc.

A continuación, se presentan ejemplos de localización general, en algunas zonas, así como un inventario geométrico del cada segmento analizado de carretera.

Figura VII.1.
Localización General de la carretera Monterrey - Linares.

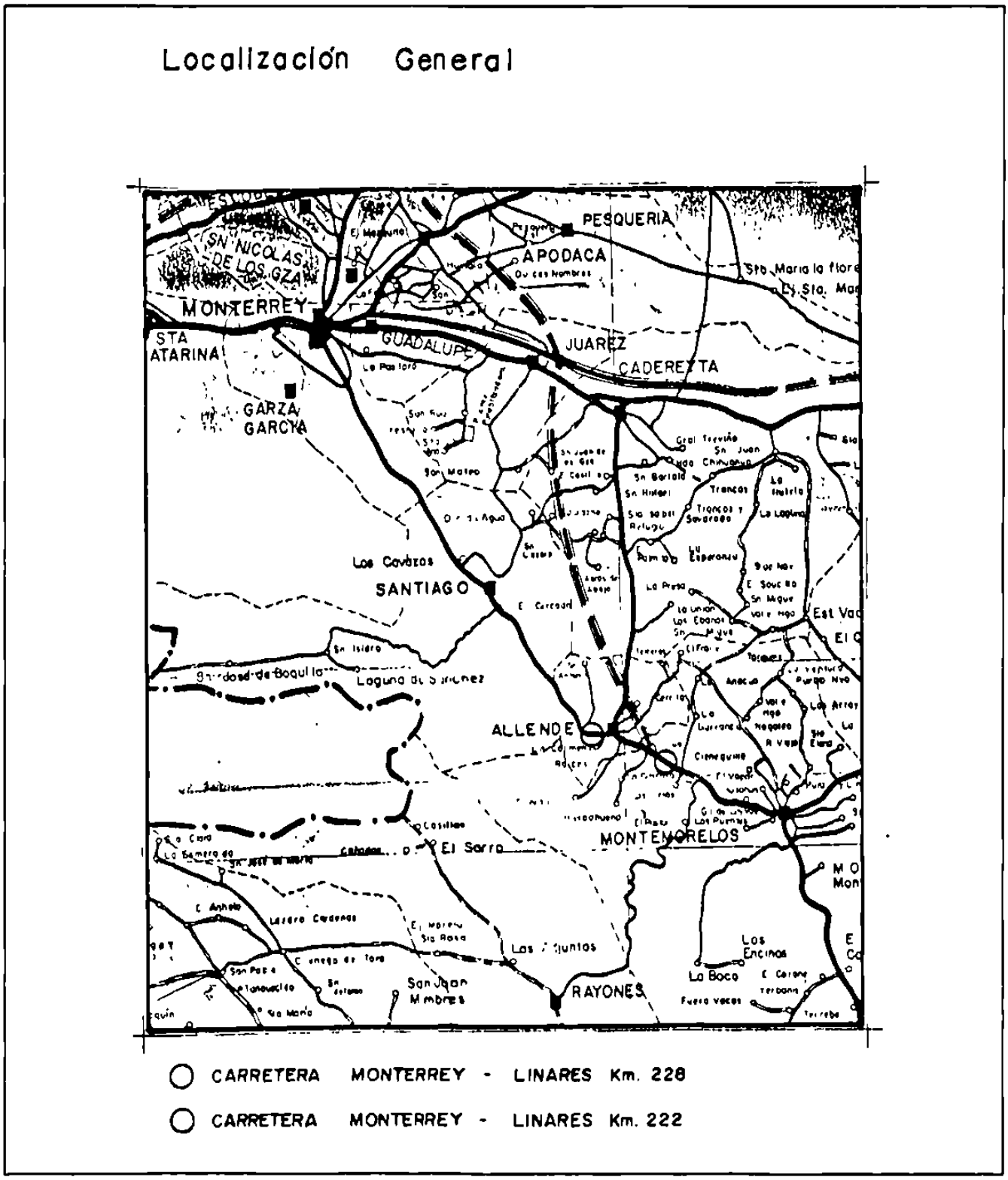


Figura VII.2.
Dimensiones de la carretera Monterrey - Linares.

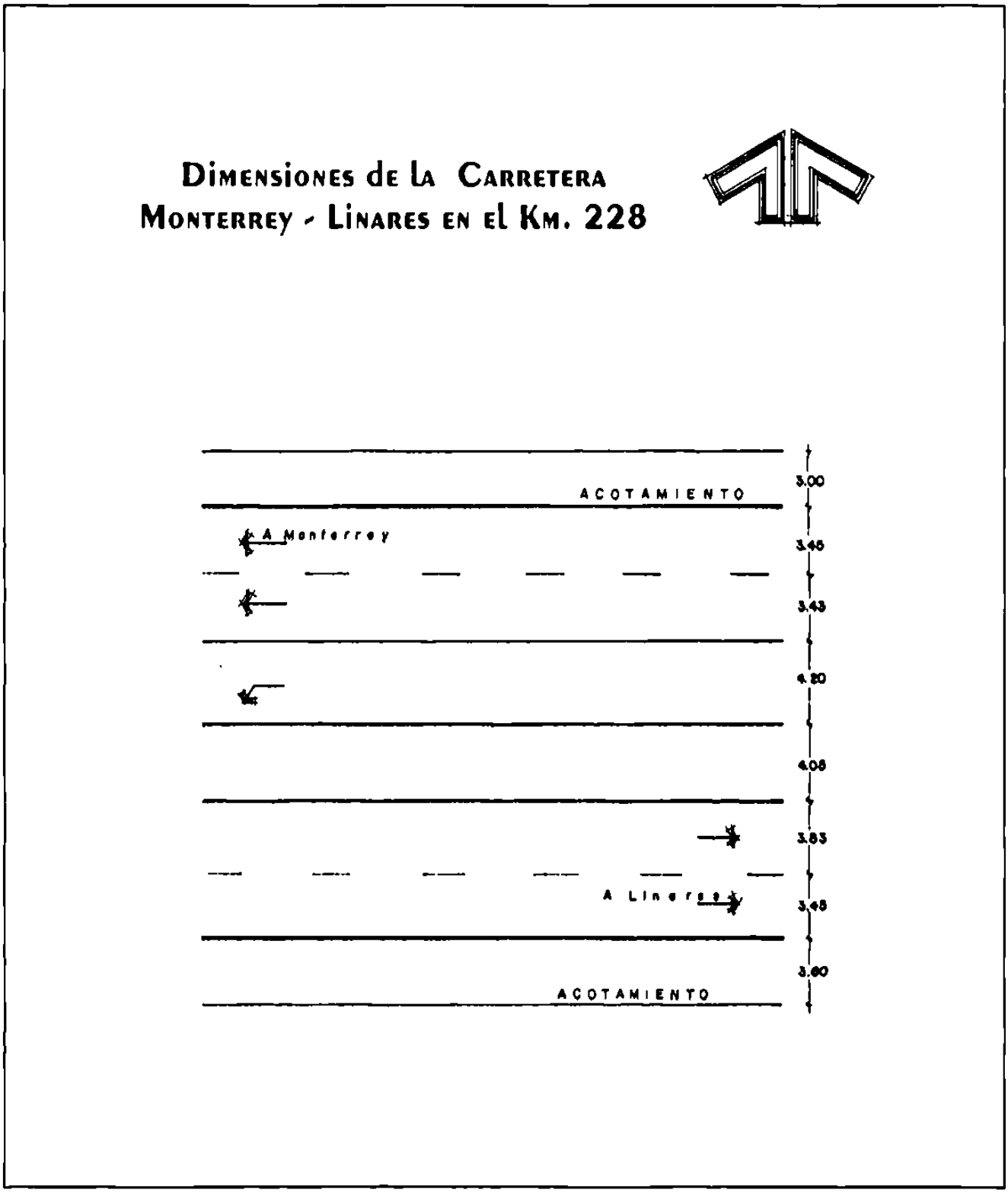


Figura VII.3.
Dimensiones de la carretera Monterrey - Linares.

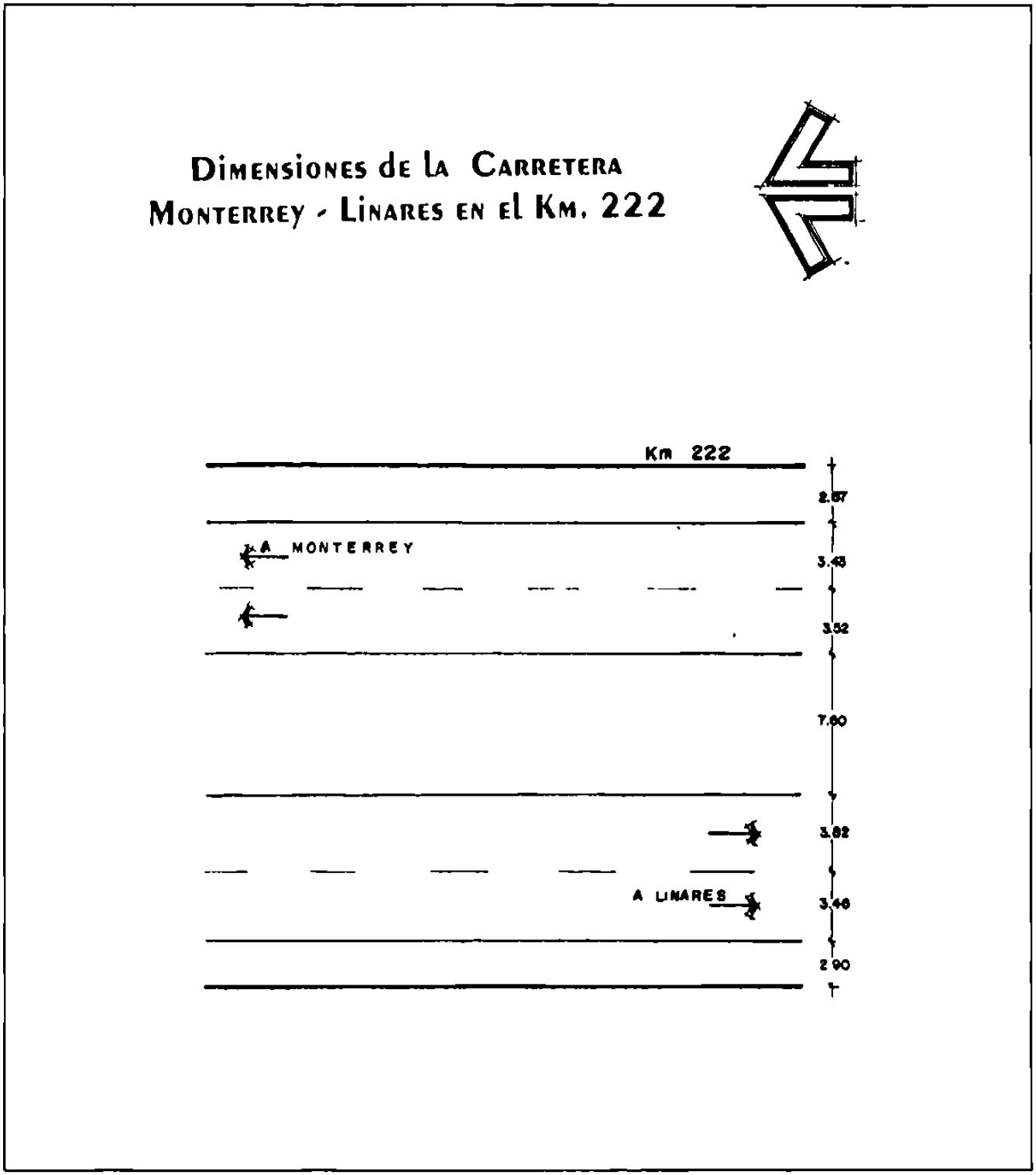


Figura VII.4.
Localización General de la carretera Monterrey - Reynosa.

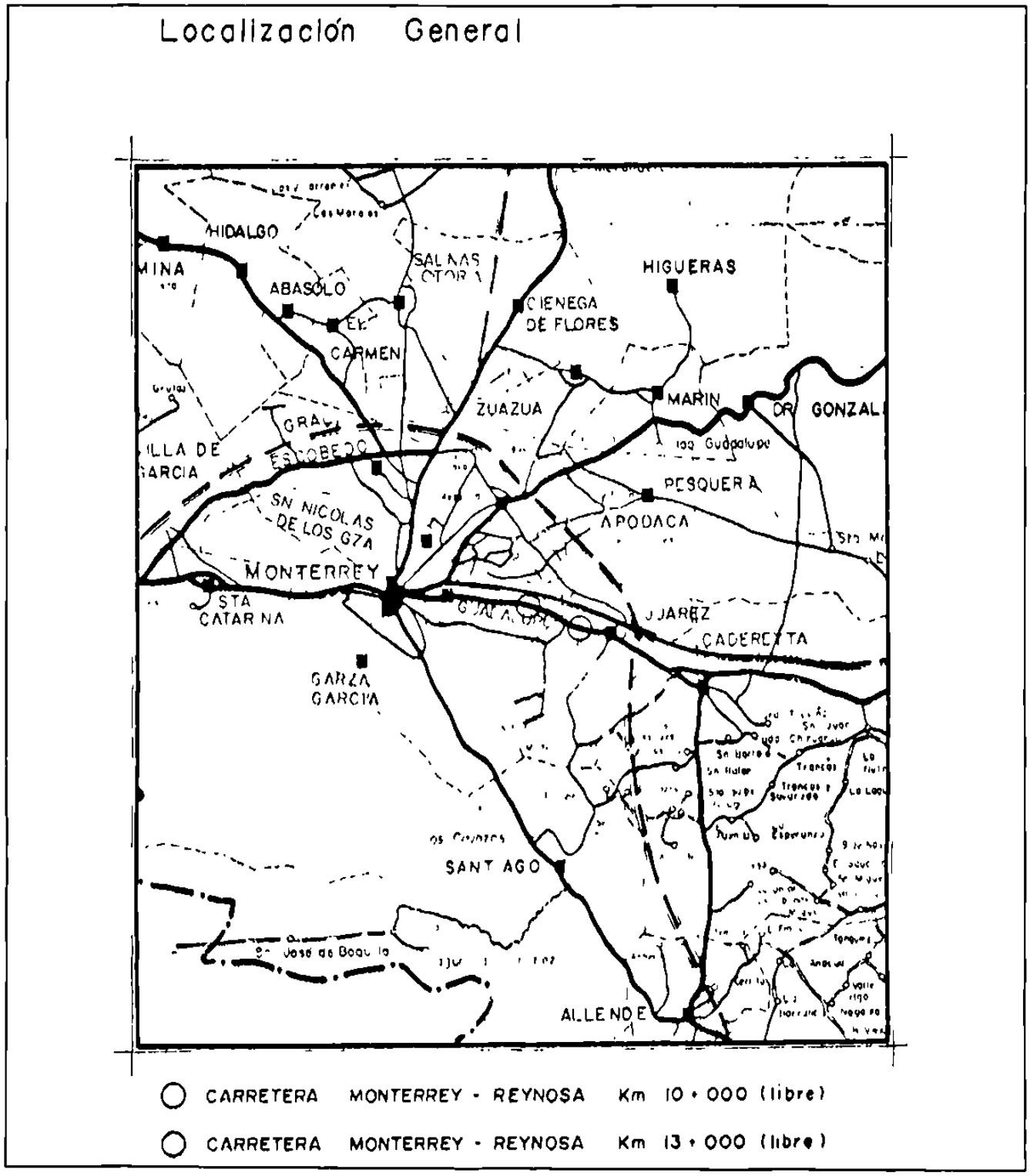


Figura VII.5.
Dimensiones de la carretera Monterrey-Reynosa.

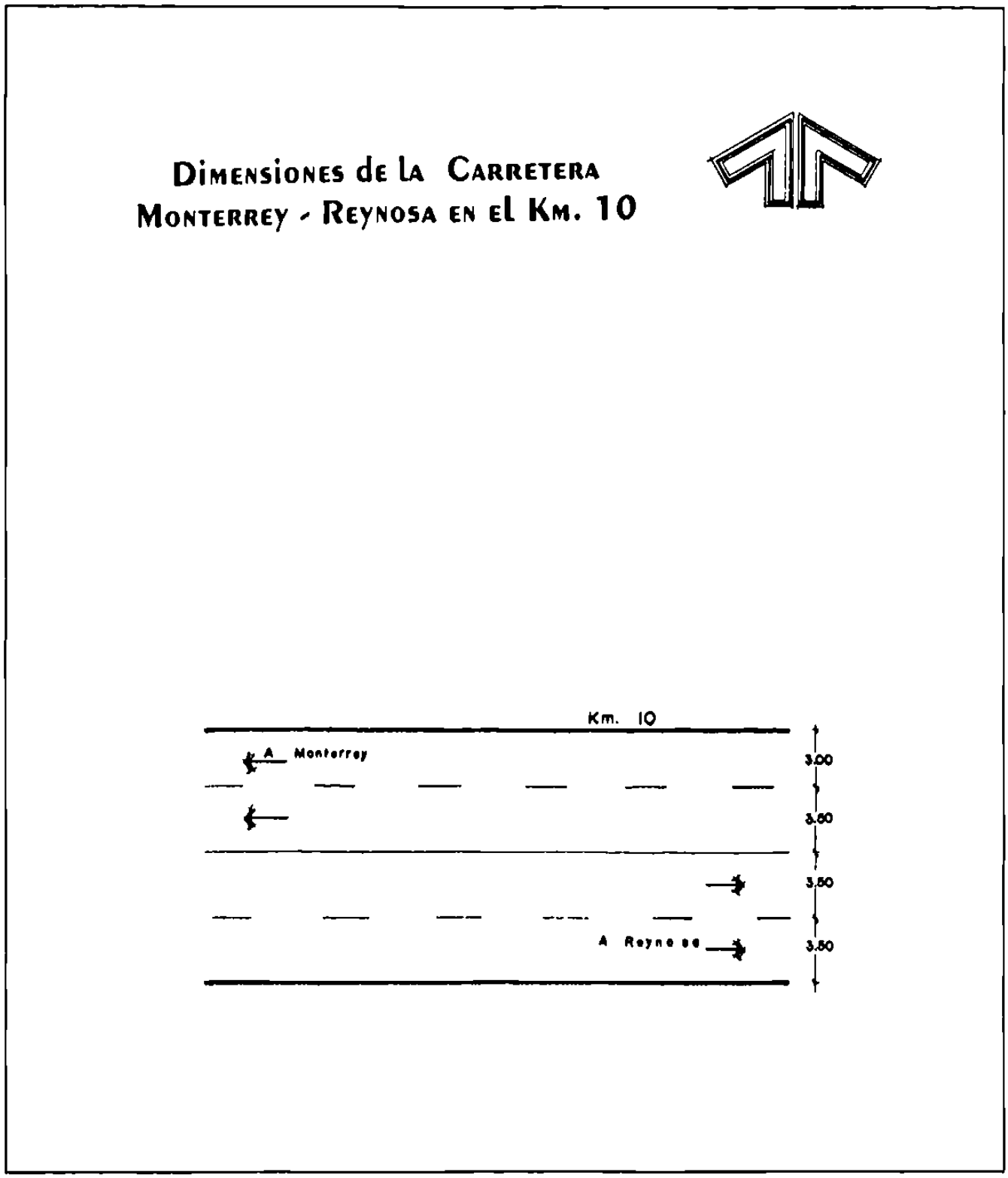


Figura VII.6.
Dimensiones de la carretera Monterrey - Reynosa(libre)

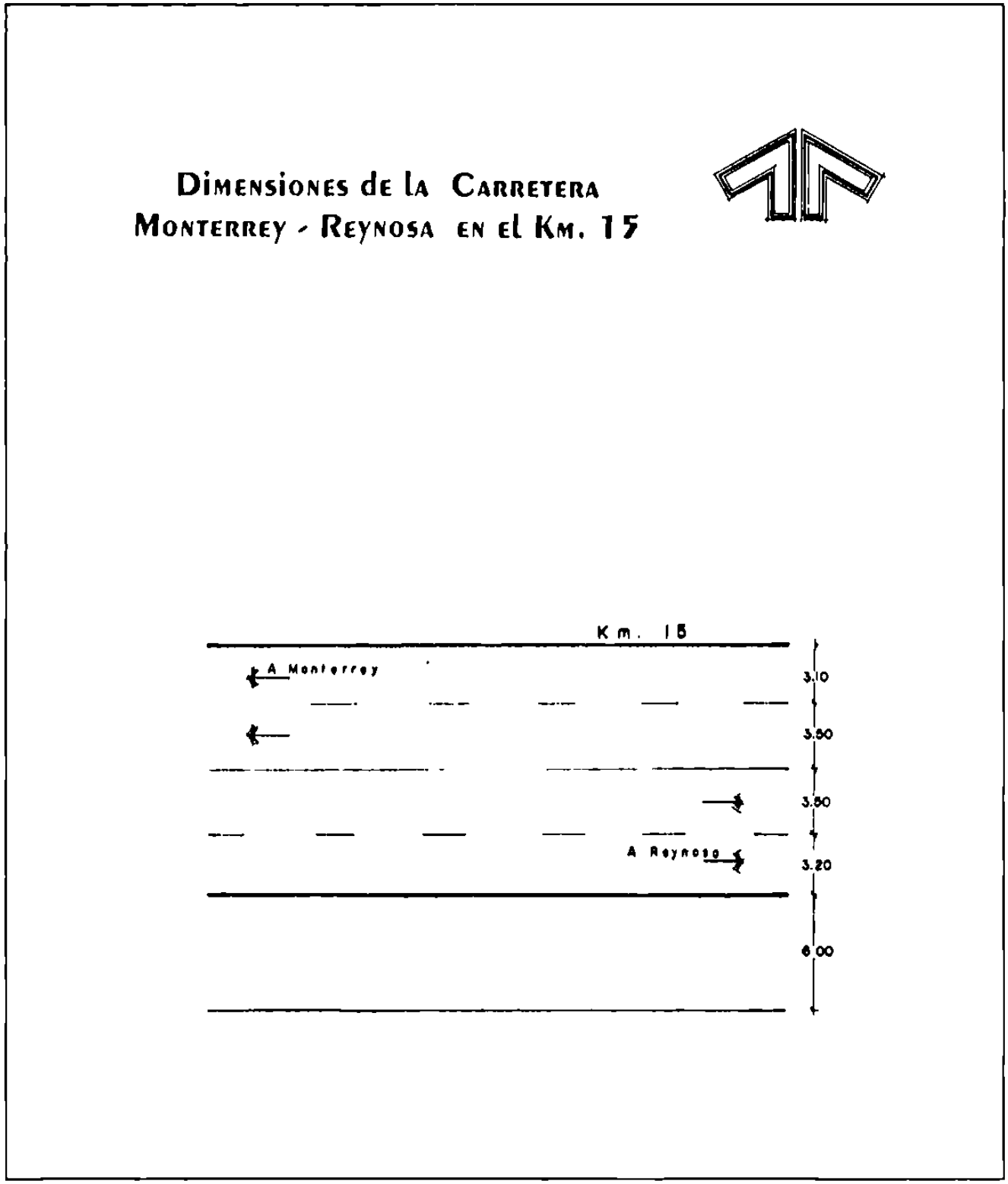


Figura VII.7.
Localización General de varias carreteras.

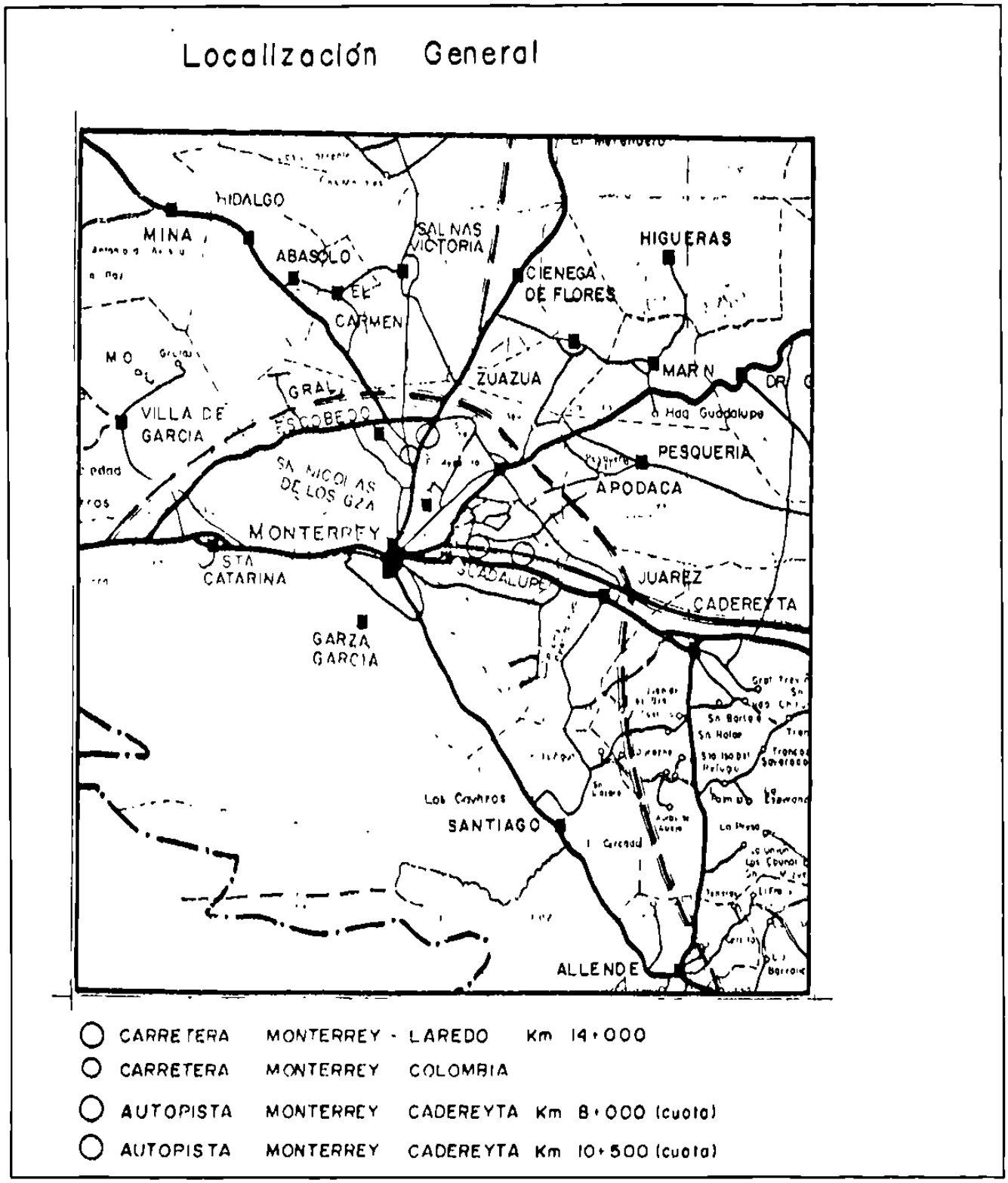


Figura VII.8.
Dimensiones de la carretera Monterrey - Nuevo Laredo.

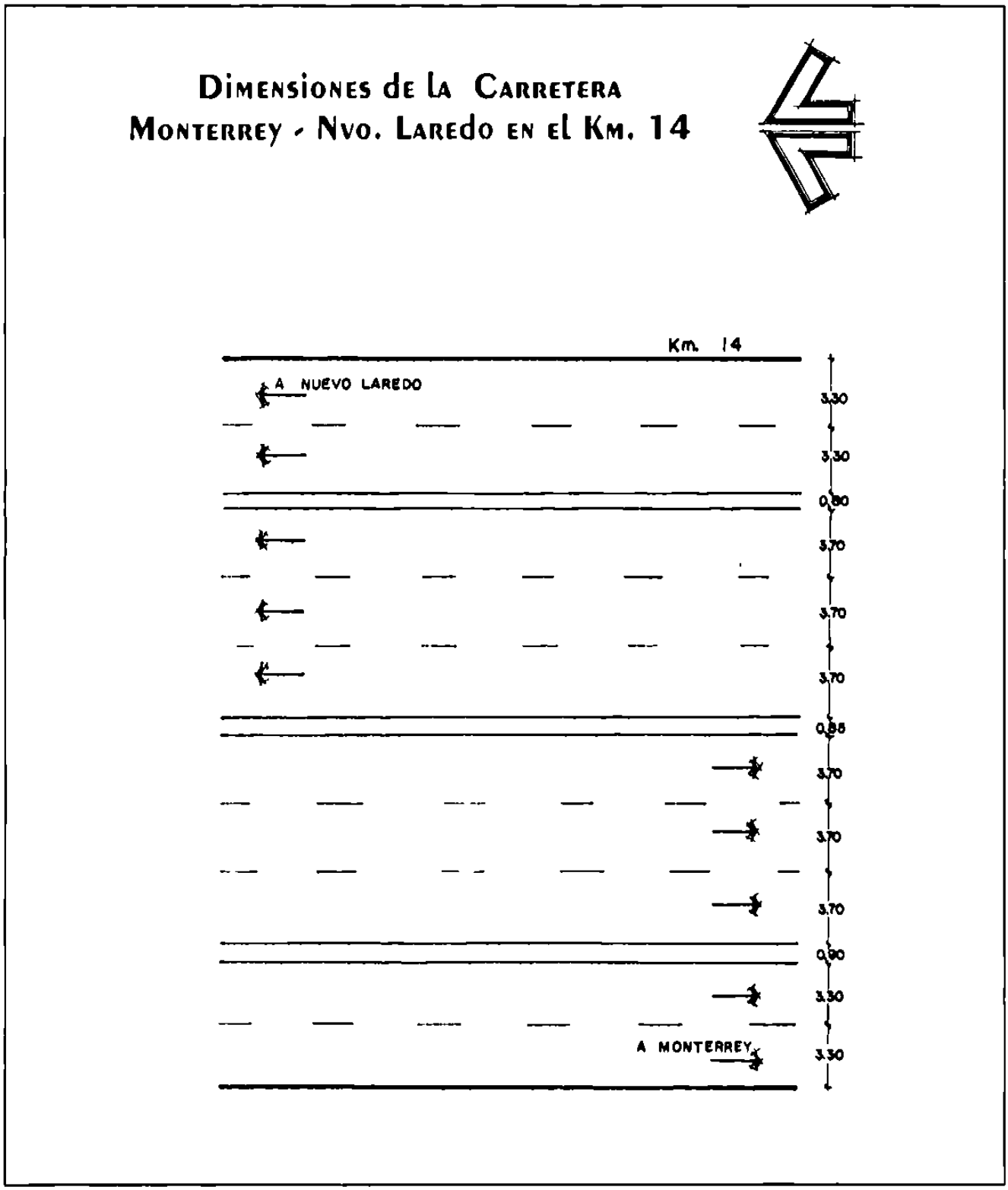


Figura VII.9.
Dimensiones de la carretera Monterrey - Colombia..

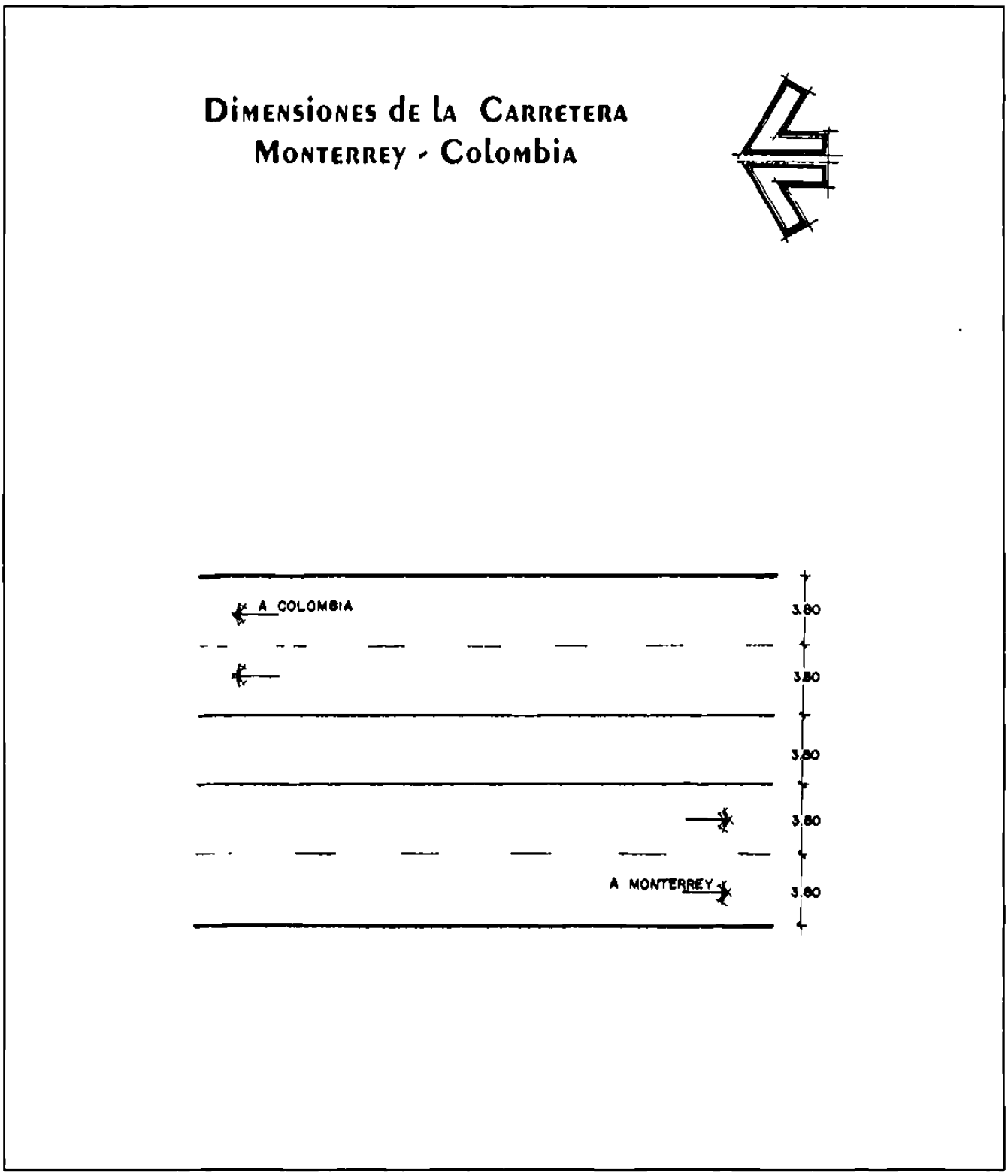


Figura VII.10.
Dimensiones de la carretera Monterrey - Cadereyta (cuota).

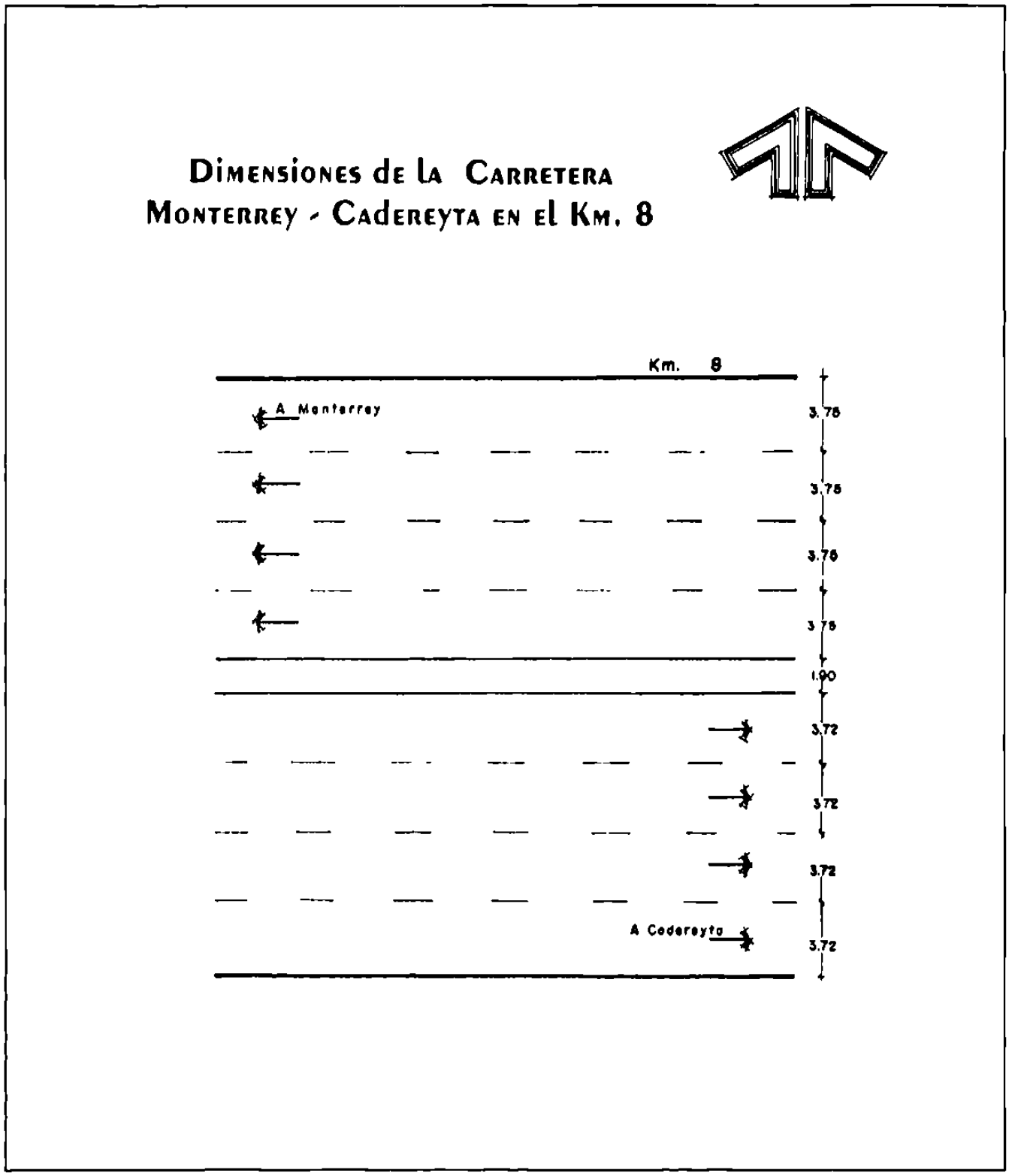


Figura VII.11.
Dimensiones de la carretera Monterrey - Cadereyta (cuota).

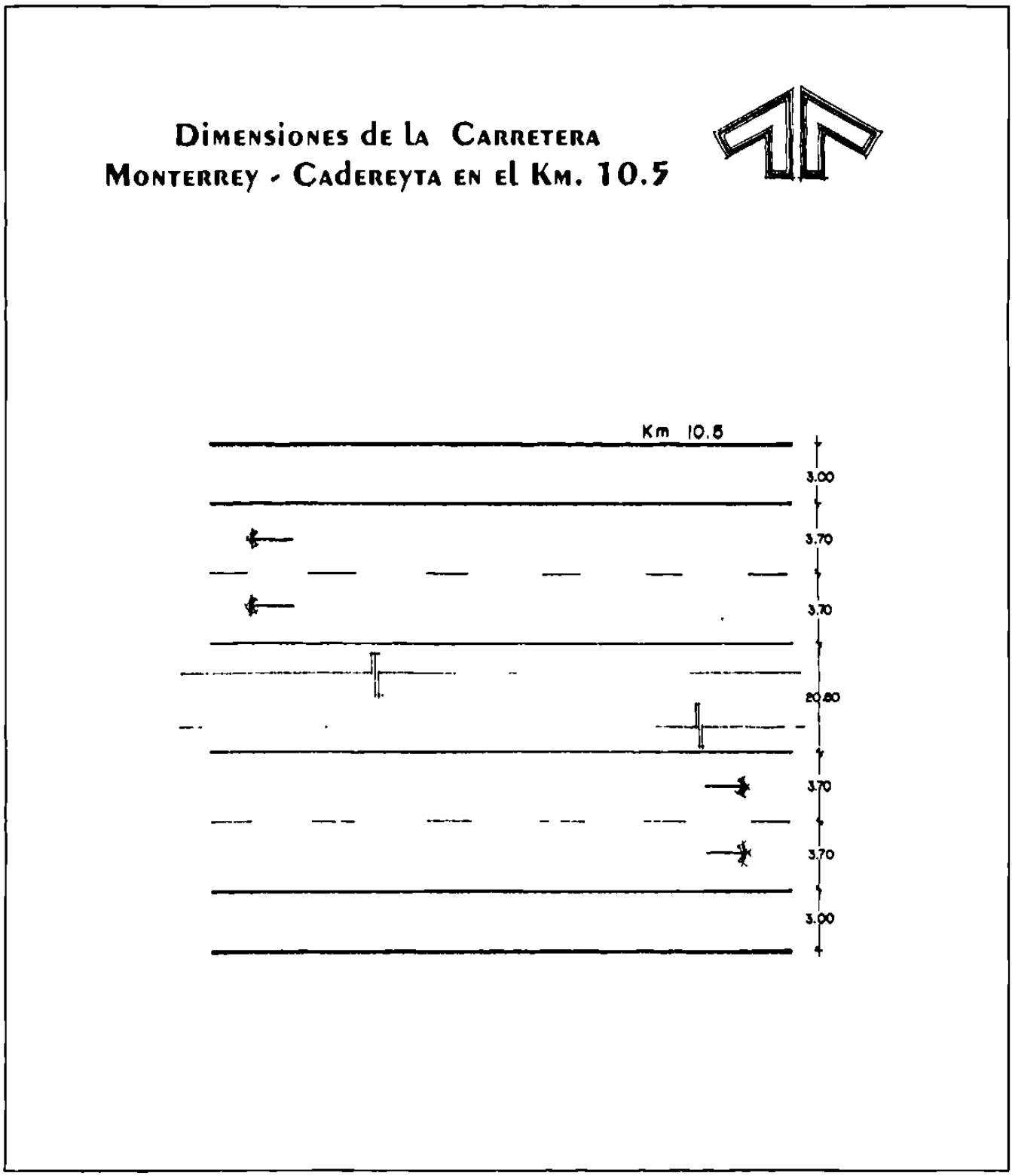


Figura VII.12.
Localización General de la carretera Monterrey - Villa de García.

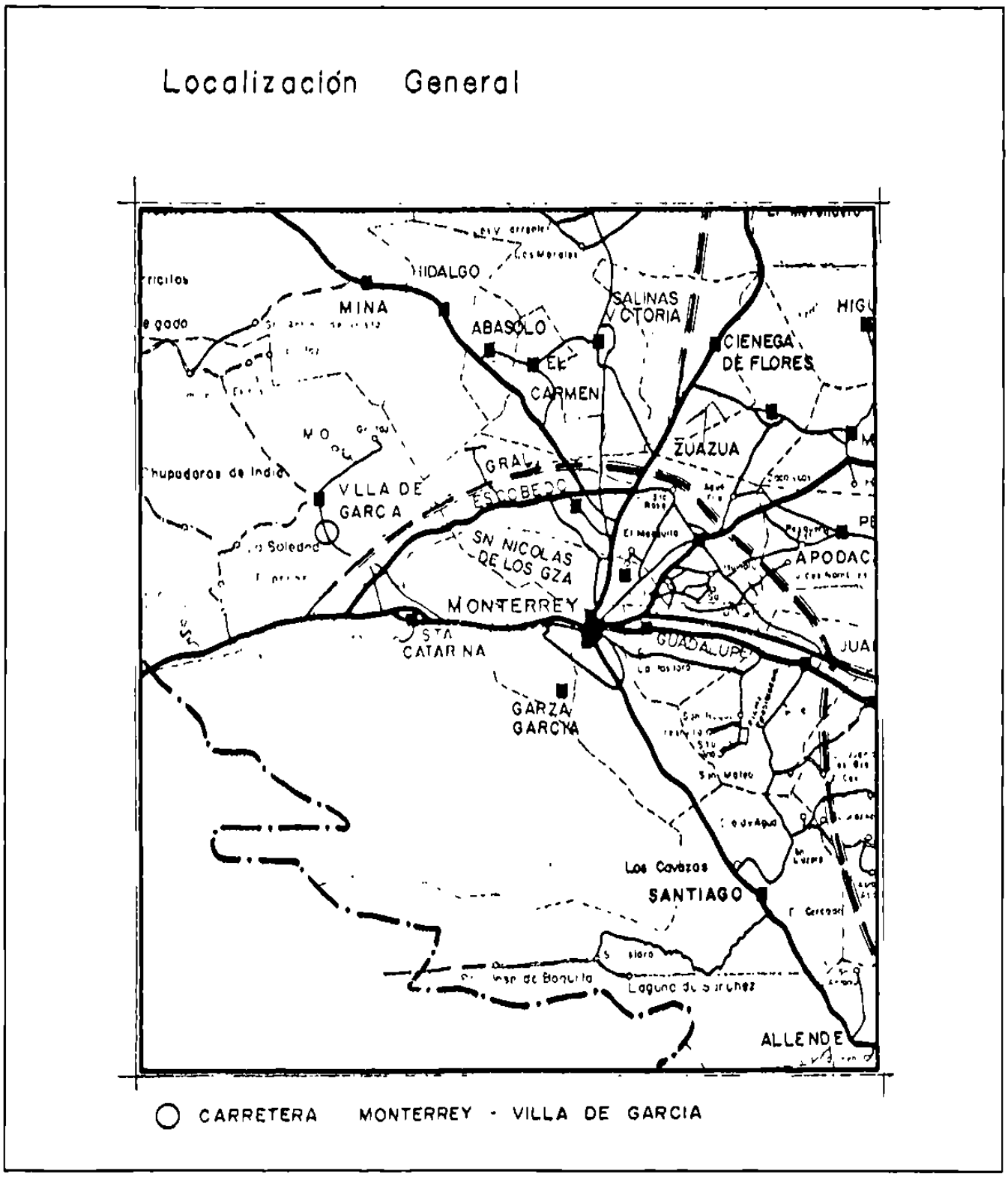
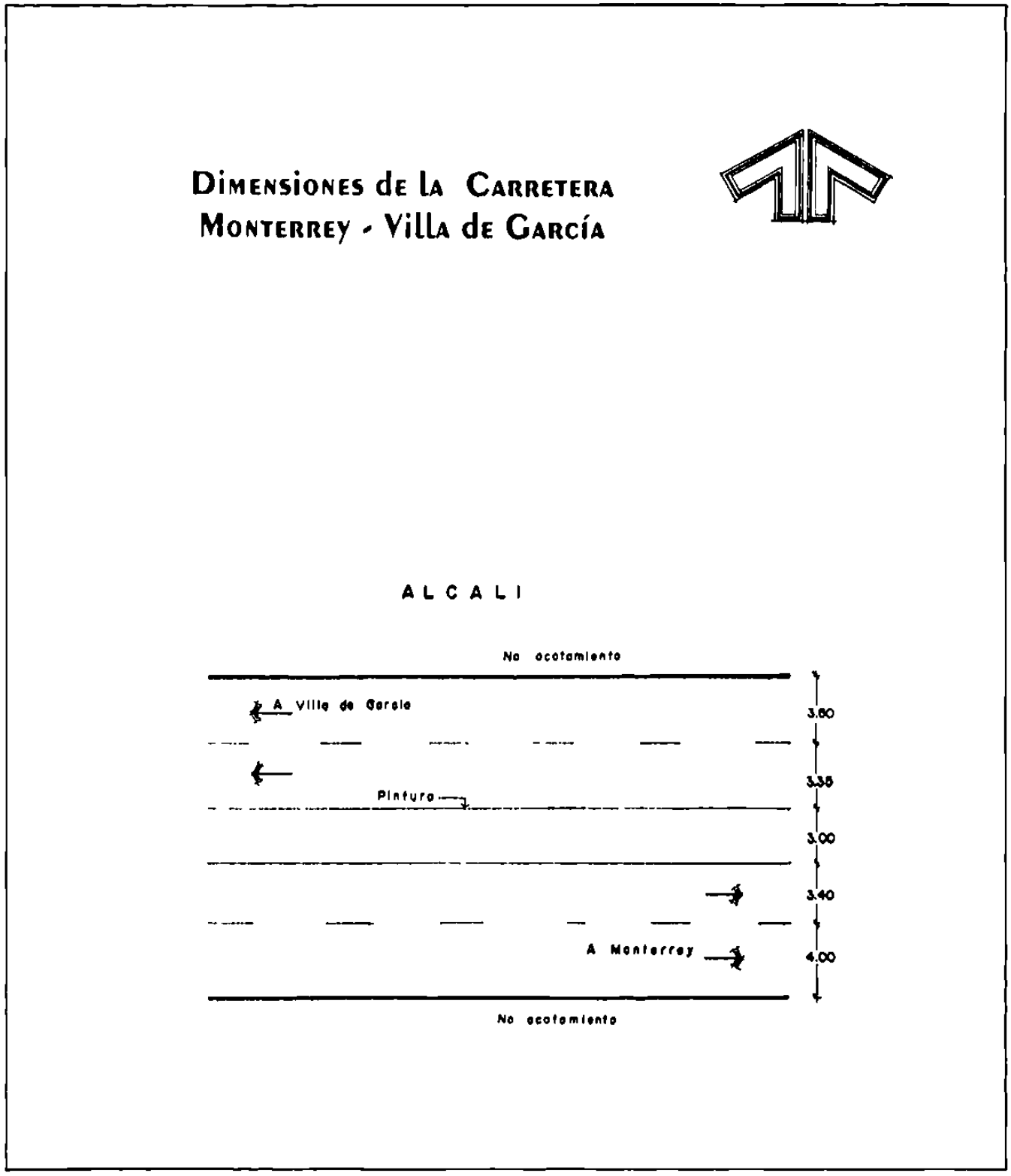


Figura VII.13.
Dimensiones de la carretera Monterrey - Villa de García.



b) El Indice Internacional de Rugosidad

Como se mencionó en el capítulo V, un método utilizado para estimar la rugosidad en el campo consiste en colocar manualmente una regla de unos dos o tres metros de largo (se usó la de 3 metros), a lo largo de una de las huellas del camino, y medir la desviación máxima bajo la regla, en mm y repetir la operación a distancias convenientemente espaciadas. Con los datos de las mediciones, se han de calcular las frecuencias acumuladas y sustituir el valor del 95 percentil resultante, en la formula siguiente que corresponda, para conocer el valor del Indice Internacional de Rugosidad (IIR) en m/km:

IIR(m/km)= 0.35 DMR_3

DMR_3 = 95 percentil de las desviaciones máximas bajo una regla de 3 mts. de largo.

IIR (m/km) = 0.437 DMR_2

DMR_2 = 95 percentil de las desviaciones máximas bajo una regla de 2 mts. de largo.

Las mediciones de la deflexión del pavimento, recabadas en el campo, se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla VII.1.
DEFELIXIONES TRANSVERSALES SOBRE EL PAVIMENTO (mm)
Resumen

CARRETERA	SENTIDO	Nº DE MUESTRAS (n)	DEFLEXIONES EN (mm)									S_{n-1}
			Máx.	*Mín.*	*Otras muestras*						*Promedio* $\bar{x}$	
Monterrey	Mty Villa de García	8	29.5	10	12	11.5	19	12.5	12.5	11	14.75	6.55
Villa de García	Villa de García-Mty.	6	43	10	16.5	14	13.5	16	-		18.83	12.06
Monterrey	Reynosa-Monterrey	5	35	14	16	19	26	-	-	-	22	8.57
Reynosa Km. 10	Monterrey-Reynosa	6	38	17	24	26	30	20	-	-	25.83	7.49
Monterrey	Monterrey-Reynosa	4	27	6	8	10	-	-	-	-	12.75	9.639
Reynosa Km 15	Reynosa-Monterrey	4	21	11	11	19					15.05	5.26
Monterrey	Linares-Monterrey	8	29	8	15	20	15	15	14	14	16.25	6.08
Linares Km. 228	Monterrey-Linares	8	22	8	11	14	15	11	18	20	14.875	4.85
Monterrey	Linares-Monterrey	8	12	6	8	8	10	9	12	9	9.25	2.05
Linares Km. 222	Monterrey-Linares	8	20	3	12	14	15	9	8	8	11.125	5.25
Monterrey	Mty.-Nuevo Laredo	8	38	8	16	11	12	10	8	8	13.875	10.12
Nvo.Laredo Km 14	Nuevo Laredo-Mty.	8	27	12	18	18	15	18	14	15	17.125	4.55
Monterrey	Colombia-Monterrey	8	19	9	12	19	16	13	13	13	14.25	3.49
Colombia	Monterrey - Colombia	8	33	11	26	18	16	23	16	15	19.75	7.13
Monterrey	Poniente-Oriente	8	6	4	6	5	5	6	6	5	5.375	0.74
Cadereyta Km 8+00	Oriente-Poniente	8	7	3	5	4	4	5	5	5	4.75	1.16
Monterrey	Poniente-Oriente	8	13	9	12	13	10	12	12	10	11.38	1.51
Cadereyta Km.10+500	Oriente-Poniente	8	12	6	6	10	10	9	8	6	8.38	2.26

Donde:

n = Número de muestras

$\bar{x}$ – Promedio $\frac{\sum x}{n}$

S_{n-1} = Desviación típica = $\sqrt{\frac{\sum\left(xi-\bar{x}\right)^2}{n-1}}$

Tabla VII.2.

Carretera	Sentido	Nº de muestras (n)	Promedio $\bar{x}$	S_{n-1}	t_{95}	$t_{95}(S)/n^{1/2}$	$P_{95\%}$ (mm)	IIR 0.35 (m/km)
Monterrey	Mty. Villa de García	8	14.75	6.55	1.90	4.4	19.15	6.7
Villa de Garcia	Villa de García-Mty.	6	18.83	12.06	2.02	9.95	28.78	10.07
Monterrey	Reynosa-Monterrey	5	22	8.57	2.13	8.16	30.16	10.56
Reynosa Km. 10	Monterrey-Reynosa	6	25.83	7.49	2.02	6.18	32.01	11.20
Monterrey	Monterrey-Reynosa	4	12.75	9.639	2.35	11.33	24.08	8.43
Reynosa Km. 15	Reynosa-Monterrey	4	15.5	5.26	2.35	6.18	21.68	7.59
Monterrey	Linares-Monterrey	8	16.25	6.08	1.90	4.08	20.33	7.12
Linares Km. 228	Monterrey-Linares	8	14.875	4.85	1.90	5.27	20.145	7.05
Monterrey	Linares-Monterrey	8	9.25	2.05	1.90	1.38	10.63	3.72
Linares Km 222	Monterrey-Linares	8	11.125	5.25	1.90	3.53	14.655	5.13
Monterrey	Mty -Nuevo Laredo	8	13.875	10.12	1.90	6.8	20.675	7.24
Nvo.Laredo Km. 14	Nuevo Laredo-Mty.	8	17.125	4.55	1.90	3.06	20.185	7.06
Monterrey	Colombia-Monterrey	8	14.25	3.49	1.90	2.34	16.59	5.81
Colombia	Monterrey - Colombia	8	19.75	7.13	1.90	4.19	24.54	8.59
Monterrey	Poniente-Oriente	8	5.375	0.75	1.90	0.50	5.88	2.06
Cadereyta Km.8+00	Oriente-Poniente	8	4.75	1.16	1.90	0.78	5.53	1.94
Monterrey	Poniente-Oriente	8	11.38	1.51	1.90	1.01	12.39	4.34
Cadereyta Km.10+500	Oriente-Poniente	8	8.38	2.26	1.90	1.52	9.9	3.46

Donde:

n= Número de muestras $\bar{x} = \text{Promedio} = \dfrac{\sum x}{n}$ S_{n-1} = Desviación típica = $\sqrt{\dfrac{\sum\left(xi - \bar{x}\right)^2}{n-1}}$

$$P_{95} = \bar{x} + \frac{t_{95}(S_{n-1})}{\sqrt{n}}$$

t_{95} = Valor "t" de Student para el 95% con grado de libertad n-1 (ver apéndice D).
P_{95} = 95% percentil de las desviaciones máximas bajo una regla de 3 m de largo.
IIR = (mm/km) - 0.35 P35 (Indice Internacional de Rugosidad)

c) *La Velocidad de Punto*

La velocidad es un factor importante en el transporte terrestre; ya que el movimiento vehicular tiene una participación considerable en la economía, la seguridad, el tiempo y el servicio (comodidad y conveniencia), tanto para los conductores como para el público en general.

La velocidad es la relación del movimiento de tránsito, o de los vehículos específicos y se expresa, generalmente en kilómetros por hora o en millas por hora. Existen dos tipos diferentes de medidas de velocidad promedio. El primer tipo de promedio es la velocidad media, referido al tiempo o velocidad media de punto, que es el valor central de un grupo de velocidades vehiculares instantáneas, medidas en un lugar dado de una vía. La segunda expresión de velocidad promedio es la velocidad media, referida a la distancia, o velocidad de recorrido.

El estudio de la velocidad de punto está diseñado para medir las características de la velocidad en un lugar específico, en las condiciones de tránsito y atmosféricas prevalecientes a la hora de llevar a cabo el estudio. Para tener una evaluación estadística confiable se deben registrar las velocidades de un número adecuado de vehículos.

- Aplicaciones:

Las características de la velocidad se utilizan en los casos:

1. Determinación de los dispositivos para el control y para reglamentar el tránsito.

   a) Límites de velocidad, máximos y mínimos

   b) Velocidades recomendadas

   c) Zonas de rebase prohibido

   d) Rutas, zonas y cruces escolares

   e) Ubicación de las señales de tránsito

   f) Ubicación y programación de los semáforos.

2. Estudio de lugares con alto índice de accidentes.
3. Evaluación de la eficacia de las mejoras al tránsito, mediante la aplicación de estudios de "antes y después".
4. Análisis de lugares críticos, donde los problemas son evidentes o por haberse recibido quejas del público.
5. Determinación de lugares específicos para ejercer mayor vigilancia judicial.
6. Selección de los elementos para el proyecto geométrico de la vialidad.
7. Establecimiento de tendencias de la velocidad, para los diferentes tipos y características de los vehículos, mediante muestras periódicas, en lugares seleccionados, con flujos de tránsito continuos.
8. Cálculos de los costos usuario - vía, para el análisis económico y de mejoras al tránsito.
9. Ejecución de estudios de investigación que involucren flujos de tránsito.

- Personal y equipo:

Los datos de velocidad pueden recopilarse por métodos manuales o automáticos. Para nuestra investigación se utilizó un método automático.

El método automático normalmente emplea dispositivos electrónicos y/o mecánicos para medir las velocidades de los vehículos al pasar. El radar es el dispositivo automático comúnmente empleado (el cual fue utilizado en esta investigación). Basados en el principio Doopler, estos medidores utilizan ondas de radio o rayos ultrasónicos, que están dirigidos a los vehículos en movimiento. La señal reflejada es convertida en una frecuencia, que es proporcional a la velocidad del vehículo.

Personal:	*Equipo:*
* Encargado de campo	* Una Pistola radar
* Aforador	* Tablas de apoyo(Nomogramas)
	* Formatos impresos
	* Lápices afilados
	* Vehículo para transportarse.

- Ubicación del estudio:

Ordinariamente, se seleccionan las ubicaciones para el estudio de las tendencias del tránsito o la investigación de datos similares. En las carreteras, los estudios de tendencia se hacen en tramos rectos, a nivel y que no estén cerca de intersecciones o accesos. En las calles urbanas, las ubicaciones a media cuadra son las mas adecuadas siempre y cuando no existan entradas y salidas de estacionamientos que influyan en el flujo vehicular.

Las ubicaciones especiales se eligen para establecer límites de velocidad de tramos específicos, de calles o carreteras; para evaluar algunas mejoras en el tránsito o para estudiar lugares de accidentes.

Para obtener una estimación imparcial y precisa de las velocidades de punto, en un lugar específico, deben observarse los siguientes aspectos:

* El equipo no debe ser percibido por los conductores.
* El investigador debe llamar la atención de lo menos posible.
* Debe evitarse la influencia de curiosos.
* Debe medirse un número adecuado de velocidades de los vehículos.

- Tamaño necesario de la muestra:

El tamaño de las muestras tomadas fué de 150 vehículos, en promedio.

La siguiente ecuación puede usarse para calcular el número de casos de velocidad que deben medirse:

$$N = (SK/E)^2$$

Donde:

N = Tamaño mínimo de muestra.

S = Desviación normal de la muestra (km/h o m/h).

K = Constante correspondiente a nivel de confiabilidad deseado.

E = Error permitido en la estimación en la velocidad de punto (km/h o mi/h).

Si no se ha determinado la desviación normal de las velocidades de punto del lugar en estudio, por medio de un análisis anterior de la velocidad; entonces puede obtenerse un valor estimado razonable; de la Tabla Nº 1, de acuerdo con el tipo del tránsito del área y de la vía de que se trate. Se sugiere una desviación normal promedio de 8.0 km/h (5.0 mi/h), como valor empírico para velocidades de punto en cualquier tipo de camino y de tránsito.

El uso de la constante "*K*", depende del nivel de confiabilidad deseado (probabilidad de que la velocidad media, sea una estimación válida). Con frecuencia se utiliza el valor 2.00 que proporciona un nivel de confiabilidad del 95.5%. En la Tabla Nº 2 se muestran valores de esta constante y sus correspondientes niveles de confiabilidad.

El error "E" permitido, en la estimación de la velocidad, depende de la precisión requerida en la estimación de su valor medio. El error permitido puede fluctuar de ± 8.0 km/h (± 5 mi/h) a ± 1.5 km/h (+1.0 mi/h) o ser menor.

En ningún caso debe de medirse un conjunto menor de 30 vehículos diferentes.

Si el interés estadístico es algún valor distinto de la velocidad media, tal como el 85 porcentual, entonces usar la siguiente formula:

$$N = \left\{ S^2 K^2 (2 + U^2 \right\} / 2E^2$$

Donde:

N = Tamaño mínimo de la muestra.

S = Desviación normal de la muestra (km/h o m/h).

K = Constante correspondiente al nivel de confiabilidad deseado.

E = Error permitido en la estimación de la velocidad (km/h o mi/h).

U = Constante correspondiente a la velocidad estadística deseada para velocidad media use 0.00; para el 15 o el 85 porcentual use 1.04; para el 5 o el 95 porcentual use 1.64.

Tabla VII.3.

Desviaciones normales de velocidad de punto para la determinación del tamaño de la muestra.

TIPO DE TRANSITO	TIPO DE CAMINO	DESVIACION NORMAL PROMEDIO	
		Km/h	*mi/h*
Rural	Dos carriles	8.5	5.3
Rural	Cuatro carriles	6.8	4.2
Intermedio	Dos carriles	8.5	5.3
Intermedio	Cuatro carriles	8.5	5.3
Urbano	Dos carriles	7.7	4.8
Urbano	Cuatro carriles	7.9	4.9
Valor redondeado		**8.0**	**5.0**

Tabla VII.4.

Constante correspondiente al nivel de confiabilidad

CONSTANTE K	NIVEL DE CONFIABILIDAD (POR CIENTO)
1.00	68.3
1.50	86.6
1.64	90.0
1.96	95.0
2.00	95.5
2.50	98.8
2.58	99.0
3.00	99.7

A continuación se muestra la hoja de campo utilizada.

Figura VII.14.

Forma para anotar observaciones de Velocidad de Punto, con pistola radar.

VELOCIDAD DE PUNTO CON PISTOLA DE RADAR

Fecha _____ Lugar _____ Direccion _____

Hora _____ Condiciones atmosfericas _____

Edo. del pavimento _____

Observador _____

Velocidad en Km/h / Grupo de velocidades (Li - L) en Km/h	Automoviles	Autobuses	Camiones	Total
10.5 - 15.5				
15.5 - 20.5				
20.5 - 25.5				
25.5 - 30.5				
30.5 - 35.5				
35.5 - 40.5				
40.5 - 45.5				
45.5 - 50.5				
50.5 - 55.5				
55.5 - 60.5				
60.5 - 65.5				
65.5 - 70.5				
70.5 - 75.5				
75.5 - 80.5				
80.5 - 85.5				
85.5 - 90.5				
90.5 - 95.5				
95.5 - 100.5				
100.5 - 105.5				
105.5 - 110.5				
110.5 - 115.5				
115.5 - 120.5				
120.5 - 125.5				
125.5 - 130.5				
130.5 - 135.5				
135.5 - 140.5				
140.5 - 145.5				

Figura VII.15.
Forma para anotar observaciones de Velocidad de Punto.

VELOCIDAD DE PUNTO

Fecha_____ Lugar_____ Direccion_____
Hora_____ Condiciones atmosfericas_____
Edo. del pavimento_____ Distancia base elegida_____
Observador_____

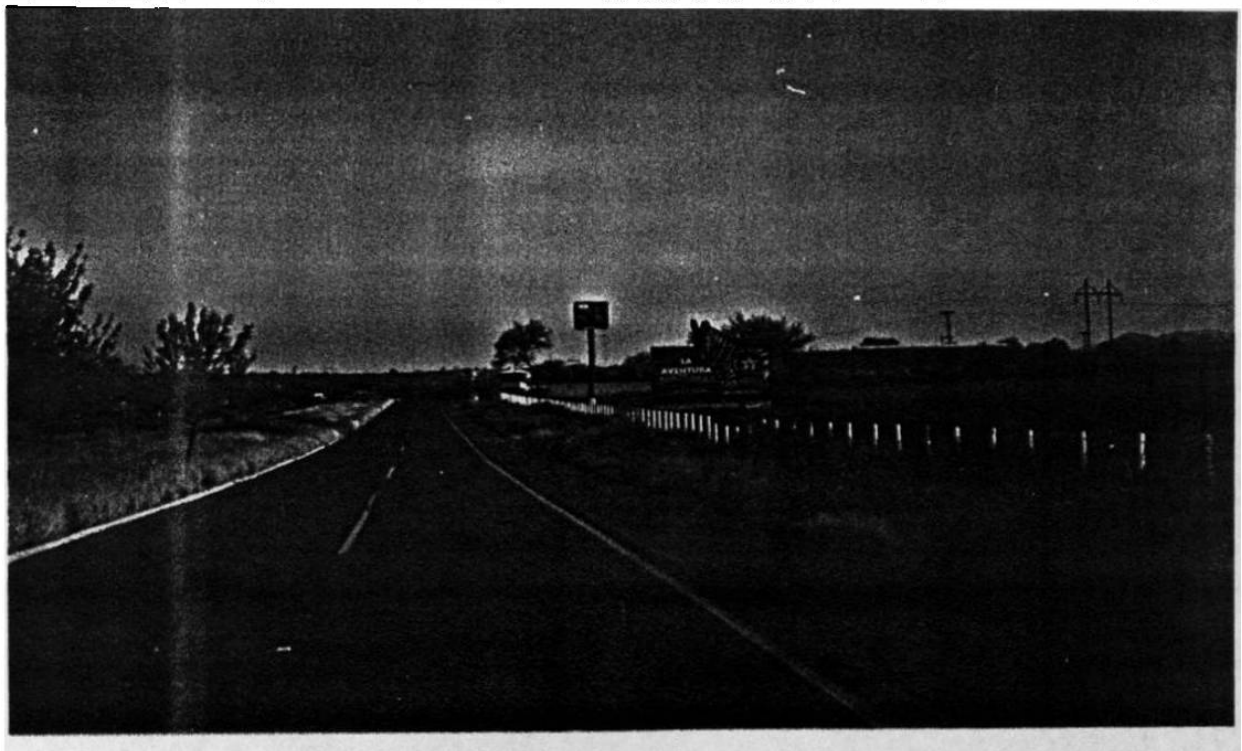
Velocidad en km/h Grupo de velocidades L1 – L (km/h)	Punto intermedio (x)	No de veces (f)	(x) (f)	%	% acum.
10.5 – 15.5	13				
15.5 – 20.5	18				
20.5 – 25.5	23				
25.5 – 30.5	28				
30.5 – 35.5	33				
35.5 – 40.5	38				
40.5 – 45.5	43				
45.5 – 50.5	48				
50.5 – 55.5	53				
55.5 – 60.5	58				
60.5 – 65.5	63				
65.5 – 70.5	68				
70.5 – 75.5	73				
75.5 – 80.5	78				
80.5 – 85.5	83				
85.5 – 90.5	88				
90.5 – 95.5	93				
95.5 – 100.5	98				
100.5 – 105.5	103				
105.5 – 110.5	108				
110.5 – 115.5	113				
115.5 – 120.5	118				
120.5 – 125.5	123				
125.5 – 130.5	128				
130.5 – 135.5	133				
135.5 – 140.5	138				
140.5 – 145.5	143				
TOTAL			$\Sigma(x)(f)=$	100.0	

d) Información fotográfica de las diferentes zonas de estudio

Figura VII.16.

Carretera Monterrey - Linares Km 222 + 000

Vistas parciales que muestra la zona en estudio, donde se puede apreciar un pavimento en buenas condiciones.



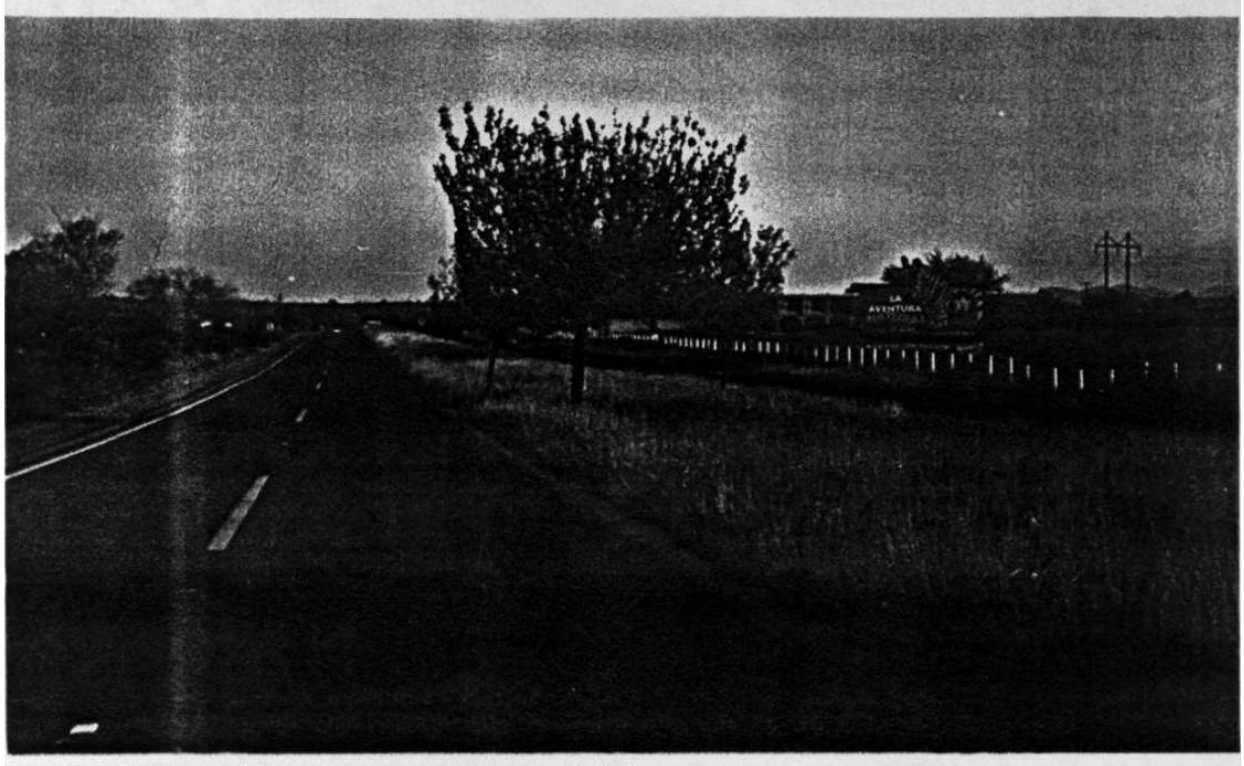


Figura VII.17.

Carretera Monterrey - Linares Km 222 + 000

Fotografía que muestra un acercamiento de la carpeta asfáltica, en la cual se puede apreciar el buen estado de la misma, brindándole al conductor una mayor comodidad y seguridad.

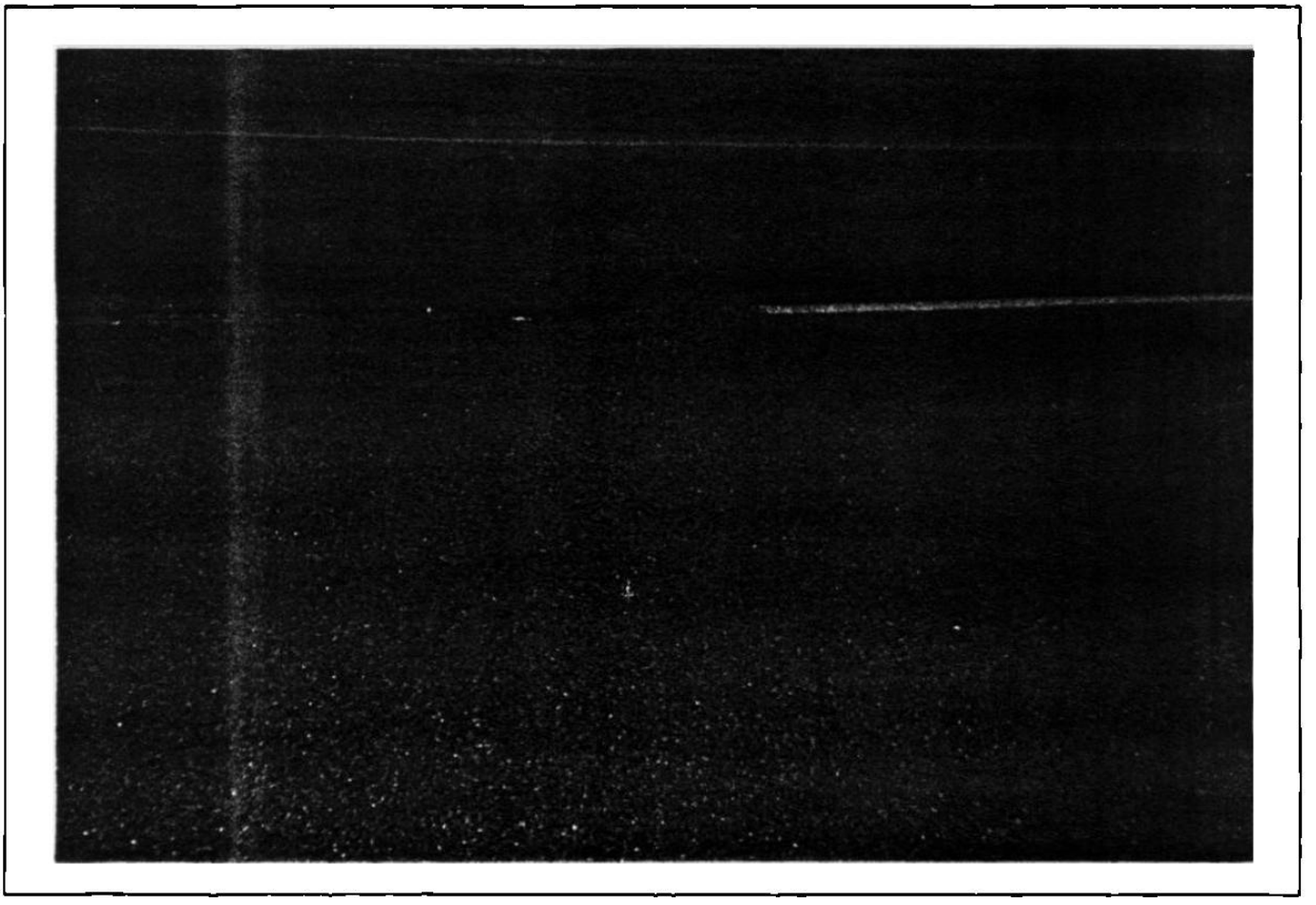


Figura VII.18.

Carretera Monterrey - Linares Km 222 + 000

Fotografía que muestra un acercamiento de la carpeta asfáltica, en la cual se puede apreciar el buen estado de la misma, brindándole al conductor una mayor comodidad y seguridad.