

Universidad del Biobío

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



“EVALUACIÓN DE DISTANCIAS DE ADELANTAMIENTO EN CARRETERA DE DOS PISTAS”

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Civil.

ANIBAL GREGORIO TORRES DEL CAMPO

Profesor Guía: Dr. Sergio Vargas Tejeda

Concepción, Marzo del 2013

EVALUACION DE DISTANCIAS DE ADELANTAMIENTO EN CARRETERAS DE DOS PISTAS.

Anibal Torres Del Campo

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

anitorre@alumnos.ubiobio.cl

Sergio Vargas Tejeda

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

svargas@ubiobio.cl

RESUMEN

La provisión de visibilidad de adelantamiento afecta directamente la seguridad y nivel de servicio de las carreteras de dos pistas. En Chile, el Manual de Carreteras considera el modelo AASHTO para el cálculo de visibilidad de adelantamiento (D_a), sin embargo no se ha realizado una evaluación de campo de dichos valores, según los conductores nacionales. En este contexto, se hace necesario evaluar si las distancias de adelantamiento con las que se diseña satisfacen los requerimientos del conductor nacional. En el presente trabajo se evalúan en base a pruebas de campo, la distancia de adelantamiento (D_2) definida en el modelo AASHTO. Para ello se identificaron las principales variables que afectan a la distancia de adelantamiento y se diseñó una experiencia de campo para su obtención y comparación con los valores AASHTO.

Se seleccionaron tres conductores y tres velocidades para la realización de la maniobra de adelantamiento en campo. Con apoyo de cronometro y de un VBOX Mini se registró en forma continua la distancia, velocidad y el tiempo durante cada maniobra. Los datos fueron procesados estadísticamente, estableciendo distribuciones de D_2 , según cada velocidad definida en el diseño experimental. Se comparó los valores obtenidos por el experimento con los propuestos por el modelo AASHTO encontrándose que dicho modelo sobreestima la distancia de adelantamiento D_2 .

Palabras claves: Modelo AASHTO, Distancia Adelantamiento, VBOX Mini.

ABSTRACT

Providing visibility overtaking directly affects the security and service level of the two-track roads. In Chile, the Highway Manual considers the AASHTO model for calculating overtaking visibility (D_a), however it has not yet made a field evaluation of such securities as national drivers. In this context, it is necessary to evaluate if the overtaking distance that are used to designed satisfy the requirements of national driver. In this paper the evaluation i based on field tests, overtaking distance (D_2) defined in the AASHTO model. In order to do this the main variables that affect the distance of overtaking were identified and also a field experiment was design to obtain and compared with AASHTO values.

Three conductors and three speeds for performing - were selected for the realization of the overtaking maneuver. Supported by stopwatch and a VBOX Mini continuously recorded the distance, speed and time for each maneuver. The data were processed statistically, setting D_2 distributions, as each speed defined in the experimental design. The values obtained were compared by the experiment with the model proposed by AASHTO founding that this model overestimates the overtaking distance D_2 .

Keywords: AASHTO Model, Overtaking Distance, VBOX Mini.

NOMENCLATURA

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.

MOP: Ministerio de Obras Públicas.

MCV3: Manual de Carreteras, Volumen 3.

Da: Distancia de Visibilidad de Adelantamiento

D2: Distancia de Adelantamiento

d50: distancia de adelantamiento para una velocidad de 50 km/h.

d70: distancia de adelantamiento para una velocidad de 70 km/h.

d90: distancia de adelantamiento para una velocidad de 90 km/h.

km/h: kilómetros por hora.

EC: Experiencia en la conducción.

α : Nivel de significancia

INDICE

1.1 Justificación	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General:	2
1.3 Plan de Trabajo	3
2.1 Maniobra de adelantamiento	5
2.2 Definición de Distancia de Visibilidad de Adelantamiento.....	5
2.3 Modelo AASHTO de Distancia de Visibilidad de Adelantamiento.	6
2.4 Factores que influyen en la distancia de adelantamiento para el caso de vehículo liviano ...	8
2.5 Principales estudios descritos en la literatura.	10
3.1 Selección de Variables.....	14
3.2 Criterios de selección de tramos de carretera	15
3.3 Matriz factorial preliminar.....	16
3.4 Tamaño muestral.....	16
4.1 Equipos de Medición	18
4.2 Método de medición de datos	19
4.2 Recolección de Datos con VBOX Mini.....	21
4.3 Datos obtenidos de las pruebas de adelantamiento.....	22
4.4 Procedimiento de Bases de Datos Individuales.	22
4.4 Generación de Base de Datos Agregada.....	25
4.5 Identificación de datos anómalos.....	26
5.1 Análisis exploratorio.....	28
5.2 Comparación de Distancia de Adelantamiento v/s Velocidad.....	30
5.3 Comparación Distancia de Adelantamiento v/s Tipo de Conductor.....	31
5.4 Comparación con valores d2 del Modelo AASHTO.	32
5.5 Probabilidad de excedencia.	33

6.1 Conclusiones	34
6.2 Recomendaciones	35

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables consideradas en el diseño factorial.....	14
Tabla 2. Matriz factorial preliminar.	16
Tabla 3. Estimación del tamaño muestral ANOVA.	16
Tabla 4: Extracto base de datos para una distancia de adelantamiento	24
Tabla 5: Extracto base de datos agregada para una distancia de adelantamiento.....	26
Tabla 6. Resultados para para medición con cronometro.....	29
Tabla 7. Resultados para medición con VBOX Mini.	29
Tabla 8. Resultados Test de Igualdad de Medias	32
Tabla 9. Comparación de la distancia D2 normado.....	32
Tabla 10. Probabilidad de excedencia	33
Tabla 11. Resumen valores estadísticos para los diferentes niveles de velocidad.	35

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de plan de trabajo.....	3
Figura 2. Distancia de visibilidad de adelantamiento (AASHTO, 2004).....	6
Figura 3. Tramo de Prueba. Ruta Interportuaria, entre Km 5.0 y 7.0.....	15
Figura 4. Relación entre la potencia estadística ($1-\beta$) y el tamaño de muestra (n) para $\alpha=0.1$	17
Figura 5. VBOX Mini (izquierda) y Cronometro (derecha).....	18
Figura 6. Vehículo utilizado, Hyundai 2008.	20
Figura 7. VBOX Mini en vehículo liviano (Sepúlveda, 2011).....	21
Figura 8. Ejemplo de gráfica velocidad v/s tiempo (VBOX Mini)	23
Figura 9. Acercamiento zona de adelantamiento (VBOX Mini).....	23
Figura 10. Identificación de maniobras de adelantamientos con la opción Heading.	24
Figura 11. Ejemplo de identificación de datos anómalos, $V = 90$ km/h.	27
Figura 12. Distribución normal para la velocidad superada de 90 km/h.....	28
Figura13. Diagrama de Cajas, para mediciones con Cronómetro.	30
Figura14. Diagrama de Cajas de D2, para mediciones con VBOX MINI	31
Figura 15. Diagrama de cajas de D2, por tipo de conductor	31
Figura 16. Probabilidad de excedencia para velocidad de 90 km/h	33

CAPITULO I: INTRODUCCION

1.1 Justificación

La provisión de distancia de adelantamiento afecta directamente el nivel de servicio de las carreteras de dos pistas (Polus et al, 2000), principalmente en aquellas donde la participación de tránsito pesado es relevante.

Por lo anterior en el diseño geométrico de una vía es necesario incorporar zonas en las cuales esta maniobra pueda ser realizada en forma cómoda y segura (MOP, 2002). El parámetro de diseño en este caso corresponde a la distancia de visibilidad de adelantamiento (D_a), la cual es calculada en base a modelos empíricos que describen e interpretan esta maniobra.

En la literatura es posible encontrar diversos modelos de adelantamiento que permiten definir las distancias mínimas necesarias y que deben ser provistas en el diseño. En Chile, el modelo incorporado en la normativa es el modelo AASHTO, el cual posee la distancia de visibilidad de adelantamiento D_a , y esta a su vez se subdivide en cuatro distancias parciales, D_1 es la distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción del conductor, D_2 distancia de adelantamiento, D_3 es la distancia de seguridad y D_4 es la distancia recorrida por el vehículo que circula por la pista opuesta.

En Chile no se han realizado experiencias de campo que permitan validar en terreno la aplicación de este modelo y/o los parámetros propuestos. Por tanto, el objetivo de este trabajo es diseñar e implementar una experiencia de terreno para evaluar la distancia de adelantamiento (D_2), dado diferentes conductores y velocidades, comparándolo con las distancias recomendadas por el modelo AASHTO.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General:

Diseñar e implementar una experiencia de campo para la evaluación de la distancia de adelantamiento (D2) requerida por los conductores nacionales.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Identificar las variables relevantes que influyen en la maniobra de adelantamiento así como su forma de medición en campo.
- Diseñar una experiencia de terreno para la medición de la distancia de adelantamiento.
- Recolectar y procesar los datos obtenidos a partir de las pruebas de terreno.
- Comparar la distancia de adelantamiento (D2) requerida con la recomendada por el modelo AASHTO.
- Calcular la probabilidad de excedencia de las distancia de adelantamiento obtenidas en terreno, respecto de los valores propuestos por el modelo AASHTO.

1.3 Plan de Trabajo

En el plan de trabajo diseñado para el cumplimiento de los objetivos, se consideró 4 etapas, con sus correspondientes sub etapas. Al final de cada etapa se definieron hitos de cumplimiento que describen y sintetizan el logro de cada una de ellas. La Figura 1 presenta esquemáticamente el plan de trabajo utilizado.

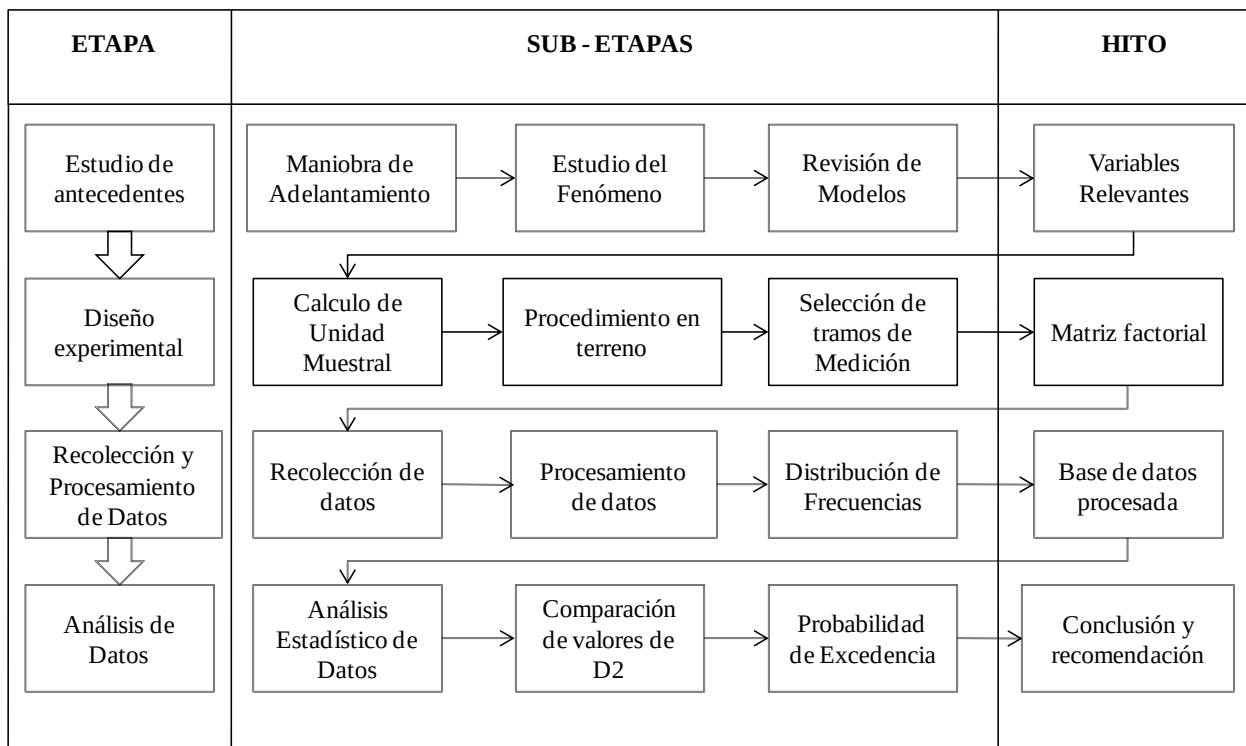


Figura 1. Esquema de plan de trabajo

1.3.1 Estudio Antecedentes

Se realizó un estudio de antecedentes de modo de identificar los elementos que conducirán al resto de la investigación y de esta forma identificar las variables relevantes que influyen en la distancia de adelantamiento requerida.

1.3.2 Diseño Experimental

Se diseñó un experimento para determinar en base a pruebas de campo la distancia de adelantamiento requerida por un sistema vehículo – conductor para realizar la maniobra. En esta etapa se determinaron las unidades muestrales requeridas, se diseñó un procedimiento para medir D2 en terreno y se seleccionaron los tramos de medición.

1.3.3 Recolección y Procesamiento de Datos.

En esta tercera etapa se realizaron las campañas de terreno en las cuales se recolectaron los datos de velocidad, tiempo y distancia en cada maniobra de adelantamiento, con la ayuda de diferentes equipos de medición. Los resultados fueron procesados y ordenados, identificándose los datos anómalos y construyendo una base de datos depurados y agregados.

1.3.4 Análisis de datos

Se analizan los datos en función de obtener valores característicos de distancia de adelantamiento (D2) y probabilidades de excedencia respecto al modelo AASHTO. Para finalizar se establecen conclusiones y recomendaciones que aporte a futuros estudios.

Una explicación más detallada del plan de trabajo se presenta en Anexo A.

CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

En este capítulo se describen los principales conceptos asociados a la revisión bibliográfica de esta memoria. En la primera parte se da a conocer el concepto de distancia de visibilidad de adelantamiento y se describe el modelo AASHTO de distancia de visibilidad de adelantamiento. En una segunda parte se dan a conocer factores que influyen en la distancia de adelantamiento. Por último se presenta una síntesis de experiencias de terreno que se han realizado en diferentes países, para la evaluación de la distancia de adelantamiento.

2.1 Maniobra de adelantamiento

La maniobra de adelantamiento en vías bidireccionales se produce cuando un vehículo adelanta a otro que viaja en la misma pista y dirección, pero con una velocidad inferior. En este caso el vehículo con velocidad de operación superior, debe invadir la pista contraria para lograr el adelantamiento, acelerando en primera instancia, invadiendo el carril contrario, y regresando a su pista luego de lograr el adelantamiento. Posterior a lo anterior, el vehículo que adelanta mantiene la trayectoria y velocidad deseada por el conductor.

Como se trata de una maniobra en que participan dos vehículos con distinta velocidad, la maniobra de adelantamiento queda definida en función de una velocidad relativa, que corresponde a la diferencia entre la velocidad de ambos vehículos.

2.2 Definición de Distancia de Visibilidad de Adelantamiento

La Distancia de visibilidad Adelantamiento “Da”, se refiere a la visibilidad mínima que requiere un conductor para adelantar a un vehículo que se desplaza a velocidad inferior a la de proyecto; esto es, para abandonar su pista, sobrepasar el vehículo adelantado y retornar a su pista en forma segura, sin afectar la velocidad del vehículo adelantado ni la de un vehículo que se desplace en sentido contrario por la pista utilizada para el adelantamiento. (MOP, 2002)

2.3 Modelo AASHTO de Distancia de Visibilidad de Adelantamiento.

El modelo AASHTO describe la distancia de visibilidad de adelantamiento (D_a) en función de cuatro distancias parciales (D_1 , D_2 , D_3 , D_4). Este modelo asume algunos supuestos para describir la maniobra de adelantamiento.

- 1ª El vehículo que va a adelantar disminuye la velocidad hasta ubicarse detrás del vehículo que pretende adelantar.
- 2ª El vehículo que va a adelantar observa si es posible realizar la maniobra sin ser interrumpido por un vehículo que pueda afectar su pasada con el propósito de empezar a realizar el adelantamiento.
- 3ª El vehículo que es adelantado se mantiene a una velocidad constante.
- 4ª El vehículo que adelanta necesita un corto periodo de tiempo para volver a la pista que le corresponde. Su velocidad media es superior en 15 km/h a la del vehículo adelantado.

La Figura 2 muestra en términos esquemáticos las cuatro componentes de la distancia de adelantamiento.

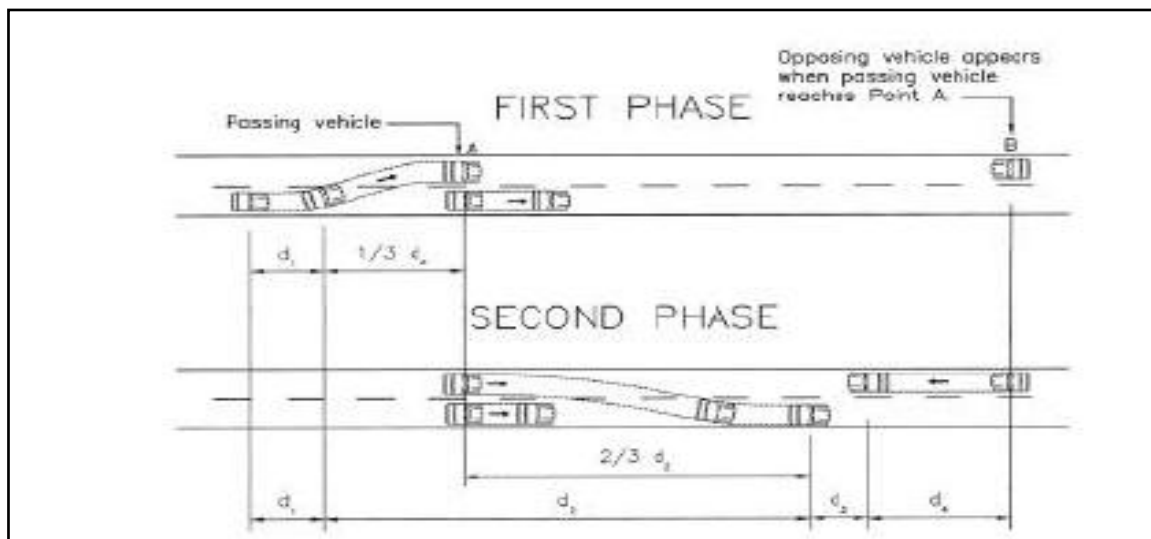


Figura 2. Distancia de visibilidad de adelantamiento (AASHTO, 2004)

Dónde:

D_a : distancia de visibilidad de adelantamiento, en metros.

D_1 : distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción, en metros.

D2: distancia recorrida por el vehículo que adelanta durante el tiempo desde que invade el carril en sentido contrario hasta que regresa a su carril, en metros.

D3: distancia de seguridad, una vez terminada la maniobra, entre el vehículo que adelanta y el vehículo que viene en la dirección opuesta, en metros.

D4: distancia recorrida por el vehículo que viene en sentido opuesto (estimada en 2/3 de D2), en metros.

Cada distancia es calculada de la siguiente forma:

$$D_a = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 \quad \text{Ec. (1)}$$

$$D_1 = 0,278 * t_1 \left(V - m + \frac{a * t_1}{2} \right) \quad \text{Ec. (2)}$$

$$D_2 = 0,278 * V * t_2 \quad \text{Ec. (3)}$$

$$D_3 = \text{Distancia entre 30 y 90 m} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$D_4 = \frac{2}{3} D_2 \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

t_1 = tiempo de la maniobra inicial, en segundos.

V = velocidad del vehículo que adelanta, en Km/h.

a = promedio de aceleración que el vehículo necesita para iniciar el adelantamiento, en km/h/s.

m = diferencia de velocidades entre el vehículo que adelanta y el que es adelantado, igual a 15 km/h en todos los casos.

t_2 = tiempo empleado por el vehículo al realizar la maniobra para volver a su carril, en segundos.

Existen otros modelos que describen la maniobra de adelantamiento tales como las descritas en INVIAS (2008), Carlson et al. (2005), Polus et al (2000), Harwood et al (2008), las cuales no son profundizadas en este trabajo.

2.4 Factores que influyen en la distancia de adelantamiento para el caso de vehículo liviano.

Los principales factores que influyen en la distancia de adelantamiento requerida por los conductores (D2) son:

- Tipo de conductor
- Velocidad del vehículo adelantado
- Condiciones de operación
- Tipo de vehículo que adelanta
- Visibilidad para poder adelantar

A continuación se discuten por separado los efectos de cada una de estas variables sobre la distancia de adelantamiento, describiendo sus efectos cuando las demás variables que intervienen son constantes.

a) Tipo de conductor: Según Egea se pueden clasificar a los conductores de tres formas, conductor joven inexperto, el cual busca nuevas sensaciones y no mide riesgos asociados; el conductor joven experto identifica el peligro de forma inmediata y el conductor mayor experimentado conduce a la defensiva recreando situaciones exitosas de su pasado. Ahopalo (1987) propone que entre más kilometraje posee un conductor, afronta de mejor forma las situaciones de peligro en la conducción. Mijuskovic (1998) mostro que 11% de los accidentes por adelantamiento fueron protagonizados por conductores jóvenes, además comenta que si no existen oportunidades para realizar el adelantamiento, los conductores deciden de igual forma adelantar. Fara et al (2009) encontró que los hombres conducen más rápido con respecto a las mujeres, por ende cuando adelantan vuelven a su carril de forma más rápida.

b) Velocidad del vehículo adelantado: Según AASHTO (2004) el vehículo que va a ser adelantado está siendo conducido a una velocidad constante y menor a la máxima permitida, y además en la pista contraria no existe tráfico que dificulte la maniobra de adelantamiento. Bajo esta condición el vehículo que desee adelantar realizará el adelantamiento en forma cómoda y segura, existiendo una diferencia de velocidad entre ambos vehículos de 15 km/h. En Chile: las distancias de adelantamiento están definidas en función de la velocidad de proyecto V_p ,

considerando que difícilmente se intentaran maniobras de adelantamiento respecto de vehículos que circulan a velocidades mayores (MOP, 2002).

c) Condiciones de tráfico: Bella (2011) cuantificó tres parámetros para medir el tráfico.

- Brecha (Following Gap): distancia que existe entre el vehículo adelantado y el que quiere adelantar.
- Distancia de adelantamiento (DP): es la distancia recorrida en la pista izquierda con el fin de completar el paso.
- Tiempo de colisión (TTC): Es la diferencia en segundos entre el vehículo que realiza el adelantamiento y el vehículo que se acerca por la pista contraria.

Según el estudio de Bella (2011), si existe un aumento de tráfico:

- El FG (following gap) disminuye, ya que el conductor empieza a sentir un malestar acumulado por no realizar la maniobra.
- Crea en el conductor conciencia de que la maniobra de adelantamiento empieza a dificultarse, por lo que la distancia de adelantamiento en la pista izquierda (distance of passing, DP) empieza a disminuir, antes de volver a la pista correspondiente.
- El tiempo de colisión (time of collision, TTC) disminuye, por lo que se vuelve más arriesgada la maniobra.

d) Tipo de vehículo que adelanta: La cilindrada, el peso, las pendientes, la longitud del vehículo (en el caso de camiones y buses), entre otros, afectan la velocidad del vehículo que adelanta (Barrera et.al, 2005).

e) Visibilidad para poder adelantar: Si la planta y alzado de la carretera no afectan la visibilidad y se percibe que no existe ningún vehículo por la pista contraria que pueda detener la maniobra, el vehículo que desea adelantar comenzará a realizar la maniobra (Rocci, 1994).

2.5 Principales estudios descritos en la literatura.

A continuación se presentaran un resumen de ensayos que se han realizado a nivel mundial respecto de la maniobra de adelantamiento. Se presentan los objetivos de cada proyecto, y los equipos que se utilizaron para la toma de datos y las principales conclusiones.

a) Polus et al (2000)

Realizó un estudio de campo donde el principal objetivo fue desarrollar modelos para cuantificar los componentes principales en la maniobra de adelantamiento. Un segundo objetivo fue comparar sus resultados con los modelos existentes para el diseño de carretera. Los tiempos medidos y las distancias fueron recolectadas en diferentes carreteras. Estos datos fueron grabados por medio de videos, desde un punto de observación fijo y desde un helicóptero. La distancia de visibilidad de adelantamiento se midió a través de marcas situadas a lo largo del camino, mientras que el tiempo se obtuvo del reloj digital que se encuentran en las cintas de las cámaras de video. Las principales conclusiones fueron las siguientes:

El supuesto del comportamiento del conductor con respecto al propuesto por el modelo AASHTO es similar. Los componentes de las distancias parciales son mayores cuando se está adelantando a vehículos largos como camiones, buses con respecto a vehículos livianos.

La distancia de visibilidad de adelantamiento de la norma AASHTO con respecto a la obtenida en este estudio son más conservadoras. También se encontró que el vehículo acelera principalmente cuando circula por la pista contraria cuando este está realizando la maniobra de adelantamiento, el cual contradice al supuesto de AASHTO referido a que por la pista contraria se permanece a una velocidad constante.

b) Carlson et al (2005)

Realizó un estudio de distancia de adelantamiento en una carretera de dos pistas en la ciudad de Texas, EEUU. Las variables consideradas fueron, la velocidad de adelantamiento promedio, la diferencia de velocidad que existe entre el auto que está adelantando y el adelantado, la distancia recorrida del auto que adelanta y el tiempo total transcurrido del auto que realiza la maniobra de adelantamiento: Los datos de las variables anteriormente nombradas se obtuvieron en un auto tipo sedan que se condujo a tres velocidades diferentes, donde tenía incorporado un contenedor en el techo al cual se le montaron cámaras que captaban la maniobra de los autos que adelantaban. También se dispuso de una cámara dentro del vehículo que permitía registrar las

distancias que se obtenían a través de un instrumento de medición de distancia. Las principales conclusiones de este ensayo fueron los siguientes:

Para las tres velocidades de estudio; la velocidad de adelantamiento promedio encontrado fue superior en 9 km/h con respecto al auto que está siendo adelantado; la diferencia de velocidad entre ambos autos es distinta a lo normado por AASHTO, sin embargo el autor concluyó que se debe diseñar para la mayoría de los conductores. Y por último la distancia del auto que adelanta y el tiempo total recorrido fueron encontrados similares a los propuestos por el modelo AASHTO.

c) Harwood et al (2008)

Realizó un estudio de campo en la carretera de Missouri y Pennsylvania ambas de EEUU. La medición de la distancia de adelantamiento, se obtuvo por medio de sensores puestos en ambos sentidos de la carretera y cámara de video ubicadas a un costado de la calzada donde se pudiera grabar todo el adelantamiento, además se agregaron conos, para que a través de ellos la cámaras pudieran obtener las distancias de adelantamiento y así corroborar de mejor forma dichas maniobras. El objetivo fue la medición de la distancia del vehículo que adelanta, la diferencia de velocidad que existe entre el auto que está adelantando y el adelantado, la desaceleración cuando el vehículo que adelanta aborta la maniobra y determinar si la longitud de zonas de corto adelantamiento de 120 a 240 m son eficientes para realizar el adelantamiento. Se concluyó que las longitudes de 120 a 240 m no aportan de manera significativa y segura al adelantamiento por lo que pueden ser eliminadas. Además Harwood comparó sus resultados con el estudio de Carlson et al (2005), y concluyó que sus velocidades de adelantamiento eran inferiores.

Adicionalmente a los trabajos de campo descritos anteriormente se han realizado algunas experiencias de simulación de la maniobra de adelantamiento. El principal trabajo es el de Bella (2011), en el cual realizó un estudio experimental utilizando un simulador para la conducción. El sistema de simulación utilizado fue el programa de simulación CRISS. El simulador está compuesto por un hardware que posee cuatro ordenadores y tres interfaces, las interfaces de hardware incluye un volante, pedales y palanca que se montaron sobre un vehículo real con el fin de reproducir un entorno de conducción realista. La imagen de la carretera fue proyectada en tres pantallas, una en la parte delantera del vehículo y dos en los costados, donde el campo visual fue de 135°. El objetivo del estudio fue observar y analizar el comportamiento de los conductores al realizar la maniobra de adelantamiento con diferentes condiciones de tráfico. Además se

cuantificaron tres parámetros: brecha (following gap, FG), distancia de adelantamiento (distance of passing, DP), tiempo de colisión (time to collision, TTC) en cuatro escenarios diferentes, con diferentes niveles de servicio. Se concluyó que el aumento de tráfico disminuye la cantidad de adelantamientos que realiza un conductor. La brecha disminuye a medida que aumenta el tráfico debido a que el conductor siente malestar al no poder realizar el adelantamiento, por ende se aproxima más al automóvil a quien lo antepone. Mientras que la distancia de adelantamiento también disminuye al aumentar el tráfico, esto se puede deber, concluye Bella, a que en el aumento del tráfico, el conductor crea conciencia que debe permanecer un menor tiempo por la pista izquierda. Por último el tiempo de colisión también disminuye al aumentar el tráfico.

También existen otros trabajos sobre simuladores como los expuestos por:

Bar- Gera y Shinar (2005): Se realizó un diseño experimental en una carretera de cuatro carriles de 40 km de largo, utilizando un simulador STISIM compuesto por una cabina fija, y subsistemas de freno, acelerador y volante, además de un sistema de sonido y un proyector puesto en la parte delantera del automóvil. Las mediciones del experimento consistieron en observar, analizar y entregar resultados de cómo diferentes conductores realizaban la maniobra de adelantamiento para velocidades diferentes. En la imagen proyectada transitaban vehículos a una velocidad menor, igual y mayor con respecto a la del automóvil de prueba, y obtener como resultado, si el conductor: “realizo”, “no realizo”, “intento, pero no pudo realizar” el adelantamiento. Concluyó que los conductores transitan a velocidades donde se sienten cómodos. Si existe un vehículo que circula a una velocidad que presente una carga mental al conductor, este deseara adelantarlos, aunque el otro este circulando a su misma velocidad.

Jenkins y Rilett (2004): Se utilizaron dos programas de simulación (VISSIM y DriveSafety) para observar el comportamiento de conductores ante la maniobra de adelantamiento, para obtener la distancia y el tiempo promedio que se demora en recorrer la pista izquierda el automóvil, además de obtener la brecha trasera y delantera. Los resultados obtenidos los comparo con Polus et al (2000), obteniendo que los tiempos promedios y la distancia recorrida por el carril izquierdo fueron el doble de lo obtenido en pruebas de campo.

En este capítulo se explicaron los conceptos necesarios para entender la distancia de adelantamiento, a través de modelos diseñados para obtener la distancia de adelantamiento y

estudios de campo. Además se expusieron los factores que influyen en la maniobra de adelantamiento: Tipo de conductor, velocidad del vehículo adelantado, condiciones de tráfico, tipo de vehículo que adelanta y la visibilidad para poder adelantar.

Para efectos de este trabajo y para la realización de las pruebas de campo se considerarán como variables relevantes el tipo de conductor y la velocidad del vehículo que adelanta.

CAPITULO III: DISEÑO EXPERIMENTAL

En esta sección se describe el diseño experimental desarrollado para modelar y caracterizar la distancia de adelantamiento.

Se realizó un experimento que permita darle variabilidad a la toma de datos, con el objetivo de obtener las variables explicativas que permitan obtener la distancia de adelantamiento (D2). Para ello se identifica el tramo de prueba, y se evalúa a priori la significancia del diseño experimental mediante software. Finalmente se establece una matriz factorial y un procedimiento en terreno con el objetivo de obtener los datos de las variables explicativas consideradas en el diseño experimental.

3.1 Selección de Variables

Por efecto de este trabajo y en concordancia con experiencias anteriores, se considera como variables explicativas al tipo de conductor y la velocidad del vehículo que adelanta. La visibilidad y la capacidad de operación del vehículo fueron consideradas constantes. El tipo de vehículo que adelanta fue un vehículo tipo sedan, considerado como vehículo promedio en el parque automotriz nacional.

Estas variables se categorizan y describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables consideradas en el diseño factorial.

Variable	Tipo	Descripción
Velocidad vehículo adelantado	Independiente	Variable numérica. Las velocidades a considerar son 50, 70 y 90 km/h
Experiencia en la conducción	Independiente	Variable categórica. Describe el tipo de conductor utilizado en las pruebas. Se clasifica en experiencia en la conducción: < 1 año, 1 – 5 años, > 5 años.
Distancia de adelantamiento	Dependiente	Variable numérica. Se obtiene a través de las mediciones de velocidad y tiempo que entrega el equipo Mini VBOX montado en el vehículo que está realizando el adelantamiento. Requiere procesamiento para transformar la información obtenida en dato numérico útil.

3.2 Criterios de selección de tramos de carretera

Para la realización de las maniobras de adelantamiento se consideró un tramo de prueba que cumpliera con condiciones favorables para llevar a cabo un buen ensayo. Los requisitos considerados fueron los siguientes:

- Tramo recto o de curvatura amplia
- Pavimento en buen estado
- Bermas pavimentadas y en buen estado
- Demarcaciones presentes y en buen estado
- Velocidad máxima permitida de 100 km/h.
- Ausencia de accesos y/o paraderos en el tramo.
- Longitud y visibilidad mínima de 1000 m.

Se seleccionó un tramo único para realizar las pruebas de adelantamiento. El tramo correspondió a la Ruta Interportuaria (Rol ruta 151), carretera que une Talcahuano con Penco, aproximadamente entre los km 5.0 y 7.0 Los ensayos fueron realizados los días Martes 24 de Abril y el Jueves 21 de Junio. La Figura 3 muestra el tramo de prueba utilizado para las maniobras de adelantamiento.



Figura 3. Tramo de Prueba. Ruta Interportuaria, entre Km 5.0 y 7.0

3.3 Matriz factorial preliminar

La Tabla 2 presenta la matriz factorial, la cual ordena las variables relevantes con el fin de encontrar el número de ensayos que requiere la prueba en terreno

Tabla 2. Matriz factorial preliminar.

Velocidad (km/h)	Experiencia en la conducción		
	< 1 año	1 – 5 años	> 5 años
50			
70			
90			

3.4 Tamaño muestral

Para estimar la distancia de adelantamiento en terreno fue necesario en primera instancia asegurar un tamaño muestral mínimo, con el fin de obtener un alto nivel de confianza en los ensayos a realizar. Para ello se consideró el análisis de potencia estadística basado en el método de Cohen (1988), evaluando a priori el nivel de significancia y el efecto tamaño de muestra alcanzable en el diseño.

3.4.1 Tamaño muestral mínimo para análisis de varianza

Para este caso se utilizó el software G*POWER considerando las combinaciones de factores y asumiendo una significancia de $\alpha = 0.10$, una potencia estadística de $(1-\beta) = 0.70$ y un efecto de tamaño de muestra de $f = 0.40$. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Estimación del tamaño muestral ANOVA.

Factor o interacción	G. L. numerador	Nº de Grupos	Tamaño muestral mínimo
Velocidad	2	9	41
Experiencia en la conducción	2	9	41
VxEC	4	9	56

La Figura 4 presenta gráficamente los resultados obtenidos en la estimación del tamaño muestral.

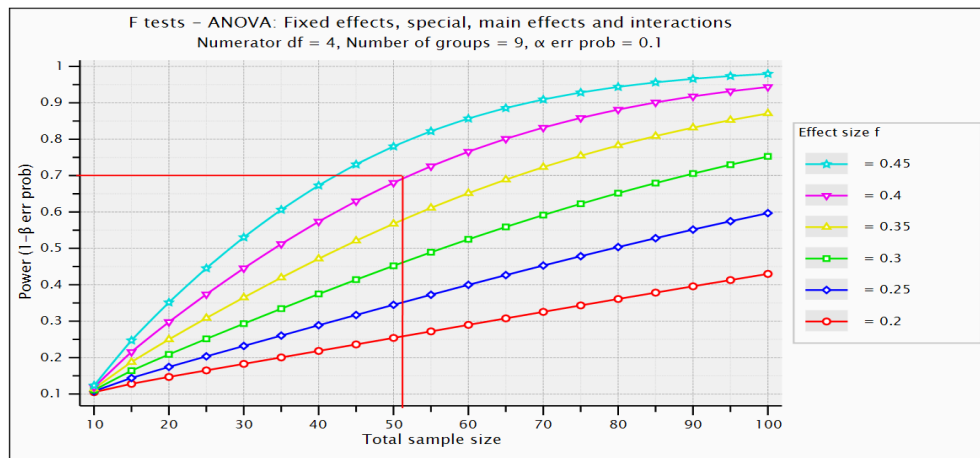


Figura 4. Relación entre la potencia estadística ($1-\beta$) y el tamaño de muestra (n) para $\alpha=0.1$.

El tamaño mínimo requerido para lograr un experimento balanceado es de 54 muestras repartidas en los 9 grupos, lo cual da un total de 6 ensayos por celda.

CAPITULO IV: RECOLECCION Y PROCESAMIENTO DE DATOS

En este capítulo se describe como se realizó la recolección de datos en terreno según el diseño experimental descrito en capítulo anterior, y como se procesaron los datos para obtener una base de datos depurada para su posterior análisis.

4.1 Equipos de Medición

Se realizaron dos campañas de medición. En la primera campaña los datos de tiempo fueron obtenidos con cronómetro, y la velocidad fue observada directamente desde el tacómetro del vehículo. Para la segunda campaña, el vehículo que adelanta fue equipado con un acelerómetro VBOX Mini, el cual registró en forma continua el tiempo (cada 0,1 segundos), la velocidad y la distancia recorrida, para cada maniobra de adelantamiento. Las características del VBOX Mini se presentan a continuación:

El VBOX Mini es un GPS de alto rendimiento utilizado para la medición de la velocidad y posición de un vehículo en movimiento. Dicho equipo utiliza un sistema de posicionamiento global (GPS), habilitado para captar señales de 8 satélites, de los 24 existentes en el planeta del sistema GPS.

La Figura 5 da a conocer los dos instrumentos utilizados en las diferentes campañas de medición.



Figura 5. VBOX Mini (izquierda) y Cronometro (derecha)

El VBOX Mini presenta la ventaja de poseer un tamaño adecuado, fácil montaje, sistema de alimentación de energía que le permite conectarse al encendedor del automóvil o usar una batería recargable.

El equipo VBOX Mini posee 4 modos de operación: Performance, LapTiming, Speeddisplay y modo Drift. En este trabajo se utilizó el modo velocidad (SpeedDisplay), el cual permite obtener y visualizar la velocidad del vehículo (Km/h) (velocímetro); la distancia recorrida (m) (odómetro); la altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) (altímetro).

El equipo GPS permite obtener datos cada 0,1 s, por lo que dependiendo de la velocidad a la que circula el vehículo, tendrán mayores o menores cantidad de datos para una distancia determinada.

4.2 Método de medición de datos

La prueba fue montada en base a dos vehículos circulando en una misma dirección, uno (el vehículo adelantado) antecediendo a otro (el vehículo que adelanta). El vehículo adelantado permanecía con velocidad constante durante la maniobra, según los niveles de velocidad establecidos en la matriz factorial. El conductor del vehículo que adelanta, esperaba tener una visibilidad suficiente para realizar la maniobra y adelantaba al vehículo según una maniobra estándar de adelantamiento propuesta por AASHTO. Se registraron dos variables: El tiempo de adelantamiento y la velocidad de adelantamiento. El registro de datos se realizó en el vehículo que adelanta para lo cual fue previamente equipado.

Tal como se comentó en el punto anterior se realizaron 2 campañas de medición; una utilizando cronómetro y otra con VBOX Mini. La primera se realizó en el mes de Abril 2012 y consistió en medir tiempos parciales y velocidad máxima de adelantamiento, mientras que la segunda se llevó a cabo durante el mes de Julio del 2012 y consistió en el registro continuo del tiempo, la distancia y la velocidad de adelantamiento. Un mayor detalle del trabajo en terreno se presenta en ANEXO B.

Para la realización de las pruebas se eligieron 3 conductores de distinta experiencia. La muestra consistió en 2 hombres y una mujer, de edades entre 27 y 54 años.

4.2.1 Condiciones de medición

A continuación se presentan algunas condiciones que se consideraran en la medición en terreno para facilitar los ensayos.

a) Definición de zonas de adelantamiento

Se delimitó previamente la rectas, con el objetivo de disponer de un punto de partida común. La recta fue delimitada común punto de partida, en donde se espera a los dos automóviles comiencen de manera simultánea; y un punto de término, en el cual los dos autos se detienen luego de haber completado la maniobra. Esta recta debe ser la necesaria para alcanzar la velocidad con la que se desea adelantar.

b) Equipamiento de Vehículos

El vehículo que adelanta fue equipado con dos cámaras de video que permitieron obtener imágenes de la maniobra de adelantamiento; y con un equipo VBOX Mini, para el registro de tiempo, distancia y velocidad. Los dos vehículos utilizados fueron un Nissan V16 año 1991 y un Hyundai accent año 2008, siendo éste último el vehículo equipado y que adelanta. La Figura 6 muestra el vehículo utilizado para la maniobra de adelantamiento.



Figura 6. Vehículo utilizado, Hyundai 2008.

c) Conductores

El vehículo que adelanta fue conducido por los tres conductores seleccionados previamente. Para evitar un sesgo en la medición, el orden de los conductores y de las velocidades fue aleatorizado.

d) Condiciones meteorológicas: La medición se realizó con condiciones favorables, día nublado pero con buena visibilidad, en ausencia de viento y lluvia.

4.2 Recolección de Datos con VBOX Mini

a) Montaje del Equipo

El VBOX Mini se instala mediante chupones que se adhieren al parabrisas. La antena del equipo se instala en el techo del vehículo a la altura de la cabeza del conductor. Luego el cable de energía se conecta al encendedor del vehículo en el caso de que no se trabaje con batería incorporada. A continuación se enciende el equipo y se espera unos segundos para localizar los satélites. Una vez listo se puede comenzar a operar. La Figura 7 muestra el equipo VBOX Mini instalado en un vehículo de prueba.



Figura 7. VBOX Mini en vehículo liviano (Sepúlveda, 2011)

Una vez montado el equipo en el vehículo que adelanta, el procedimiento a seguir para el registro de tiempos y velocidades fue el siguiente:

- El vehículo adelantado comienza su aceleración hasta alcanzar la velocidad constante según matriz factorial del Capítulo 3, y mantiene esa velocidad durante la medición.
- El vehículo que adelanta comienza su aceleración hasta alcanzar la misma velocidad que el vehículo adelantado. Cada conductor mantenía la brecha que estimaba conveniente entre ambos vehículos por unos segundos.
- El equipo VBOX Mini se encendió cuando empezaba la aceleración de ambos vehículos, sin embargo, el registro de datos fue considerado solo a partir de que la rueda izquierda delantera del

vehículo que adelanta traspasaba el eje central de la calzada. Este punto fue determinado tomando el tiempo en el momento en que sucedía el traspaso del eje, y verificado posteriormente con un análisis de los heading del registro de datos.

•La maniobra de adelantamiento concluía cuando el conductor del vehículo que adelanta retomaba su pista original.

4.3 Datos obtenidos de las pruebas de adelantamiento

Se realizó un total de 54 carreras de adelantamiento, las cuales fueron procesadas de forma independiente. La información obtenida en cada carrera fue:

- Tiempo total de la maniobra (s).
- Velocidad máxima (km/h).
- Distancia total de la maniobra de adelantamiento (m).

Los datos obtenidos del VBOX Mini fueron traspasados a una planilla Excel para facilitar su posterior procesamiento y análisis. En esta etapa se generaron base de datos individuales para cada prueba considerando las variables de tiempo total, velocidad máxima alcanzada y distancia de adelantamiento.

4.4 Procedimiento de Bases de Datos Individuales.

En cada base de datos bruta, en formato Excel, se generaron gráficos de velocidad/ tiempo con el fin de reconocer en que zonas había sido realizada la maniobra. La máxima velocidad fue identificada en las crestas de las gráficas, identificando de esta forma las carreras de adelantamiento. La Figura 8 muestra como ejemplo la gráfica correspondiente a una maniobra de adelantamiento a una velocidad de 70 km/h.

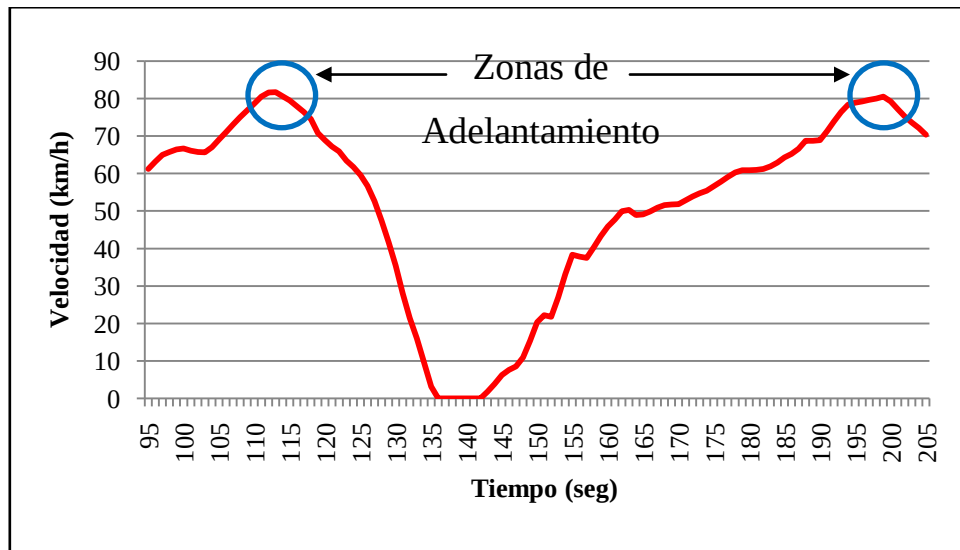


Figura 8. Ejemplo de gráfica velocidad v/s tiempo (VBOX Mini)

A las zonas de adelantamiento identificadas en las gráficas se les aplicó un zoom para identificar de mejor forma el inicio y fin de la maniobra. La Figura 9 muestra un ejemplo de ello.

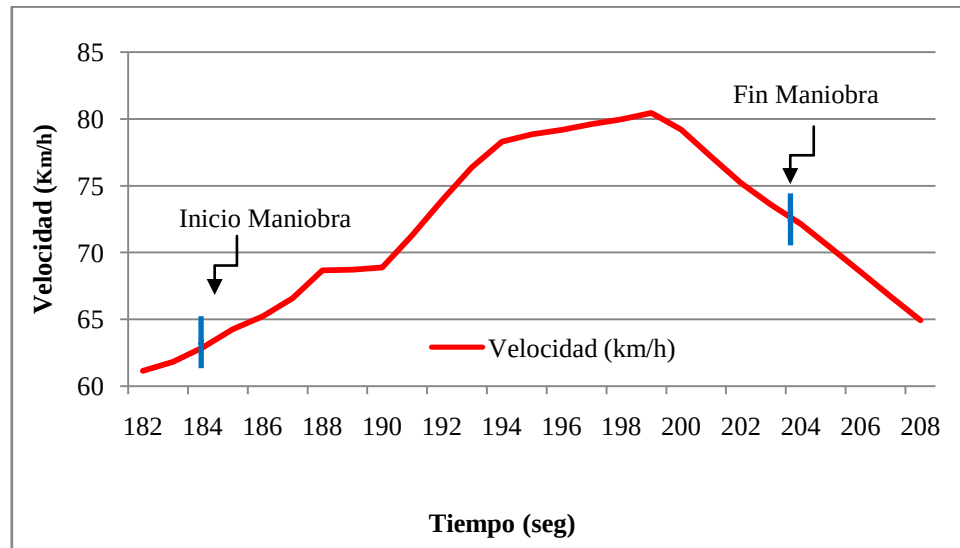


Figura 9. Acercamiento zona de adelantamiento (VBOX Mini)

Lo anterior fue verificado y mejorado con la opción "heading" otorgada por el VBOX Mini. se puede identificar donde comienza y termina cada adelantamiento y de esta forma obtener la velocidad máxima y el tiempo asociado a cada adelantamiento.

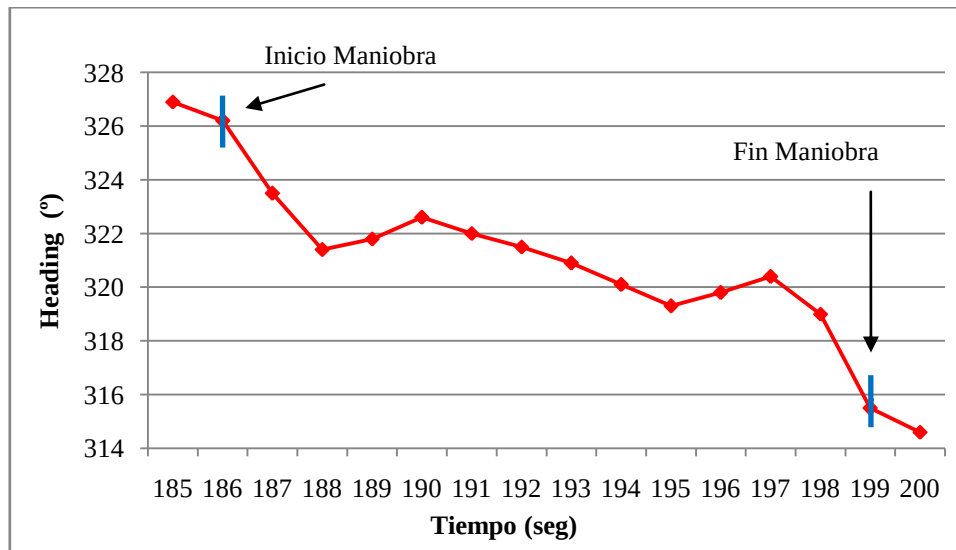


Figura 10. Identificación de maniobras de adelantamientos con la opción Heading.

Luego de identificar las zonas de adelantamiento de cada conductor, se procedió a generar una base de datos acotada a la maniobra. La Tabla 4 muestra, a modo de ejemplo, los datos correspondientes a una maniobra de adelantamiento de 70 km/h.

Tabla 4: Extracto base de datos para una distancia de adelantamiento

Dist.(m)	Vel.(km/h)	Tiempo(s)	Heading(°)
764	70	41	100
784	72	42	100
804	74	43	100
825	76	44	101
846	78	45	101
868	80	46	101
891	82	47	102
914	83	48	104
937	84	49	105
960	84	50	106
984	84	51	109
1007	84	52	110
1030	84	53	110
1053	84	54	111
1076	82	55	110,
1099	80	56	111,
1121	79	57	112,
1143	77	58	113,

De cada base de datos se seleccionó la velocidad máxima y el tiempo total de maniobra, 84.08 (km/h) y 17 (segundos) respectivamente, y con ello se obtuvo la distancia de adelantamiento considerando el caso más desfavorable.

Un segundo análisis fijó la distancia de adelantamiento y el tiempo de maniobra según lo identificado en la base de datos, y se calculó la velocidad de adelantamiento equivalente para la cual se obtendría la misma distancia de adelantamiento. En este caso dada una distancia de 378,11 m y un tiempo de 17 s, la velocidad de adelantamiento es de 80 km/h.

4.4 Generación de Base de Datos Agregada

Con los resultados obtenidos en cada corrida se generó una base de datos agregada. Esta base de datos contiene la siguiente información:

- Tipo de Conductor
- Velocidad de maniobra (según matriz factorial)
- Tiempo de Adelantamiento
- Velocidad máxima durante la maniobra
- Distancia de Adelantamiento, calculada con $V_{m\acute{a}x}$.

La Tabla 5 muestra, a modo de ejemplo, los datos correspondientes a una maniobra de adelantamiento de 70 km/h

Tabla 5: Extracto base de datos agregada para una distancia de adelantamiento

	Velocidad maniobra 70 Km/h		
	Velocidad (km/h)	Tiempo (seg)	Distancia (m)
Conductor 1 experiencia < 1 año	84	12	280
	82	13	295
	81	14	313
	82	10	226
	81	10	224
	83	10	230
Conductor 2 experiencia > 1 año y < 5 años	90	8	200
	87	10	242
	88	9	220
	90	9	226
	92	11	281
	84	9	211
Conductor 1 experiencia > 5 años	79	8	175,
	78	9	194,
	82	7	159
	77	7	150
	79	8	175
	78	8	172

4.5 Identificación de datos anómalos

Esta etapa del procesamiento tuvo como objetivo identificar aquellos datos que difieren de la tendencia de la muestra, en la base de datos agregada, considerando la distancia de adelantamiento por cada nivel de velocidad (50, 70 y 90 km/h). El método utilizado para encontrar los datos anómalos fue el test de *leverage*, representada por la siguiente ecuación:

$$h_i = \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{X})^2}{(n-1)S_x}; \frac{1}{n} \leq h_i \leq 1.0 \quad \text{Ec.(6)}$$

El método estima la discrepancia (h_i) de cada observación (x_i), con respecto a la media de la muestra ($\bar{X}$), donde n corresponde al tamaño de la muestra y S_x a la varianza.

Para seleccionar el punto de discrepancia de la función h , conocido como h crítico (h_c), Cohen et al (2003) utiliza el valor medio de la discrepancia, según la ecuación 7.

$$h_c = \frac{2(k+1)}{n} \quad \text{Ec.(7)}$$

Donde k es el número de predictores de la regresión asociada al método y n es el tamaño de la muestra.

La Figura 11 presenta un ejemplo de la gráfica de las discrepancias h_i para los datos correspondientes a la maniobra de 90 km/h. En ella se aprecia que el dato anómalo detectado por el método también puede ser identificado visualmente.

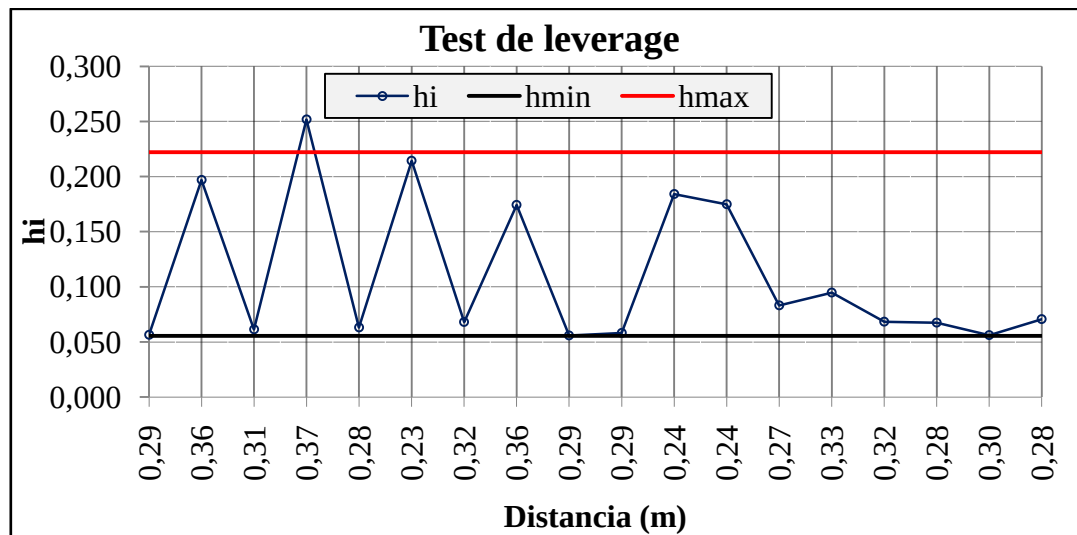


Figura 11. Ejemplo de identificación de datos anómalos, V = 90 km/h.

Finalmente se identificó un total de 3 datos anómalos de distancia de adelantamiento, por lo que la base de datos general quedó con un total de 51 maniobras, lo que corresponde a un 95% de las maniobras iniciales.

CAPITULO V: ANALISIS DE DATOS

Con los datos ya depurados se realizó un análisis exploratorio de los valores obtenidos, y posteriormente un análisis de varianza por velocidad y tipo de conductor. También se estimaron distintos percentiles asociados a las distribuciones de distancia de adelantamiento, con el fin de poder realizar una comparación con los valores del modelo AASHTO y los valores de distancia de adelantamiento propuestos por el Manual de Carreteras.

5.1 Análisis exploratorio

Consistió en aplicar conceptos de estadística descriptiva y de bondad de ajuste para caracterizar los datos de distancia de adelantamiento obtenidos en las pruebas de terreno. En el segundo caso el objetivo fue identificar la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a los datos.

5.1.1 Estadística descriptiva

Para cada nivel de velocidad se construyó el histograma de frecuencias considerando los tres conductores y las distintas repeticiones. Además se estimó la media y la desviación estándar de las distancias de adelantamiento para las distintas velocidades. La Figura 12 muestra como ejemplo el histograma de los datos de distancia (d_{90}), para la velocidad de 90 km/h. En este caso la media fue de 215,35 m. y la desviación estándar de 37,34 m.

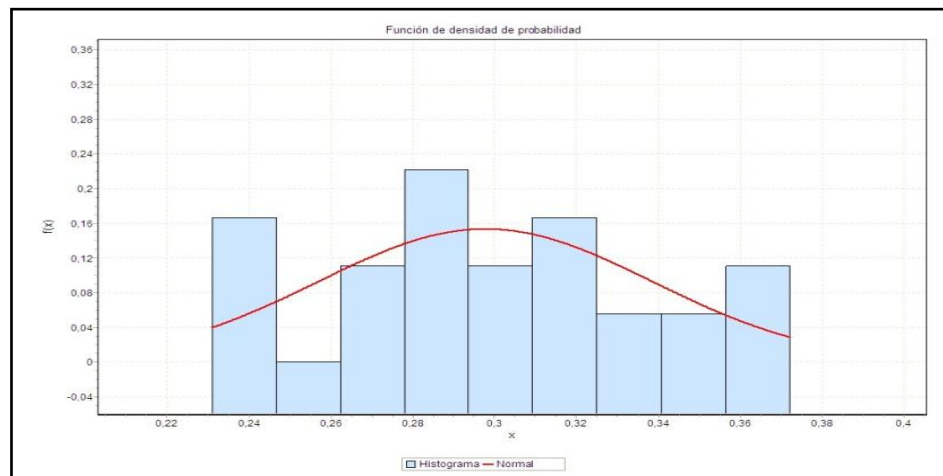


Figura 12. Distribución normal para la velocidad superada de 90 km/h

Las Tablas 6 y 7 presentan un resumen con los resultados obtenidos, para ambos tipos de prueba. Se incluye también el coeficiente de variación en cada caso.

Tabla 6. Resultados para para medición con cronometro.

Distancias (m)	Media (m)	Desv. Estándar (m)	C.V
d50	115	25,6	0,22
d70	166	29,8	0,18
d90	243	77,1	0,31

Tabla 7. Resultados para medición con VBOX Mini.

distancias	media	Desv. estándar	C.V
d50	150	33,7	0,22
d70	215	42,7	0,19
d90	293	37,3	0,12

Al comparar la tabla 7 y 8 se aprecia que las distancias registradas con VBOX Mini son superiores a las registradas con cronómetro. Esta diferencia se explicaría en parte por la diferencia entre los equipos de medición, existiendo un mayor error asociado al caso de mediciones con cronómetro. También podría atribuirse a que los conductores ya conocían la prueba al utilizar el VBOX Mini, ya que se efectuó dos meses después, y por tanto sentían mayor seguridad y confianza al realizar las maniobras. Esto se tradujo en mayores distancias de adelantamiento, y en el caso de velocidades de 90 km/h se produjo una reducción en la dispersión de los datos. Esto último reforzado con que el conductor “inexperto” ya había ganado un poco más de experiencia.

5.1.2 Test de Bondad de ajuste

Una vez eliminados los datos anómalos se realizaron pruebas de bondad de ajuste para identificar la distribución de probabilidades de las distancias de adelantamiento para cada velocidad

Para ello se aplicaron tres test: Test de kolmogorov – Smirmov, test de Anderson – Darling, test de chi-cuadrado, para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. En los tres casos la distribución que mejor se ajusta a los datos de distancia, d50, d70, d90 es la distribución normal.

5.2 Comparación de Distancia de Adelantamiento v/s Velocidad.

Se realizó un test de igualdad de medias para verificar si existen diferencias significativas entre las distancia de adelantamiento asociadas a distintas velocidades. Se consideraron las tres combinaciones posibles (d50-d70; d50-d90; d70-d90) en los dos tipos de pruebas. Se consideró un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Los resultados mostraron que en los tres casos la hipótesis nula se rechaza, dado que el valor de $p < 0,001$. Esto es válido tanto para las mediciones con cronómetro como para las mediciones con VBOX Mini. En la figura 13 y 14 se presenta un diagrama de cajas (box plot) que muestra una comparación entre los datos de distancias de adelantamiento para los tres niveles de velocidad.

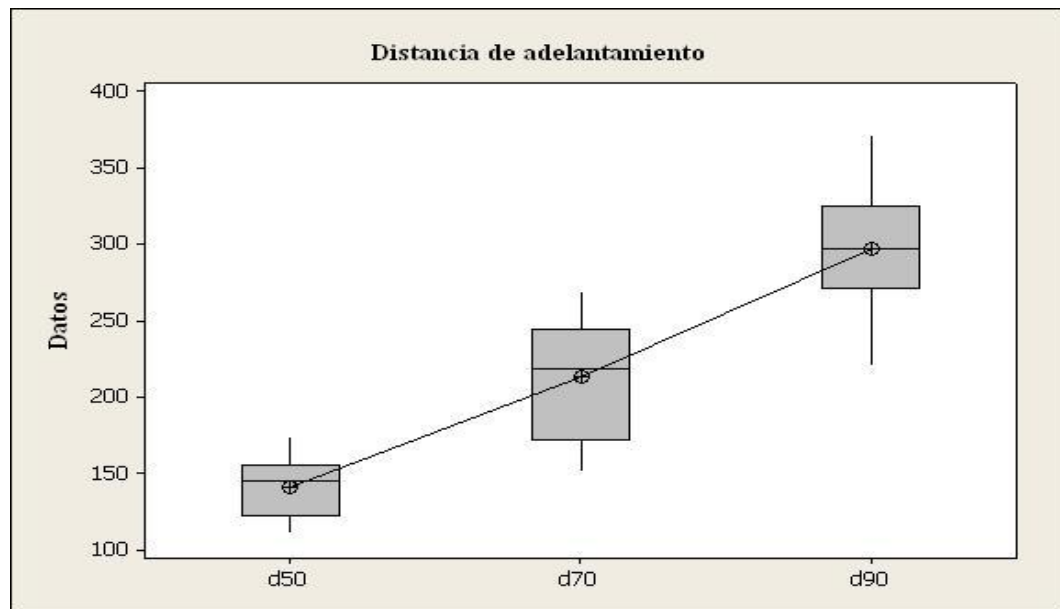


Figura 13. Diagrama de Cajas, para mediciones con Cronómetro.

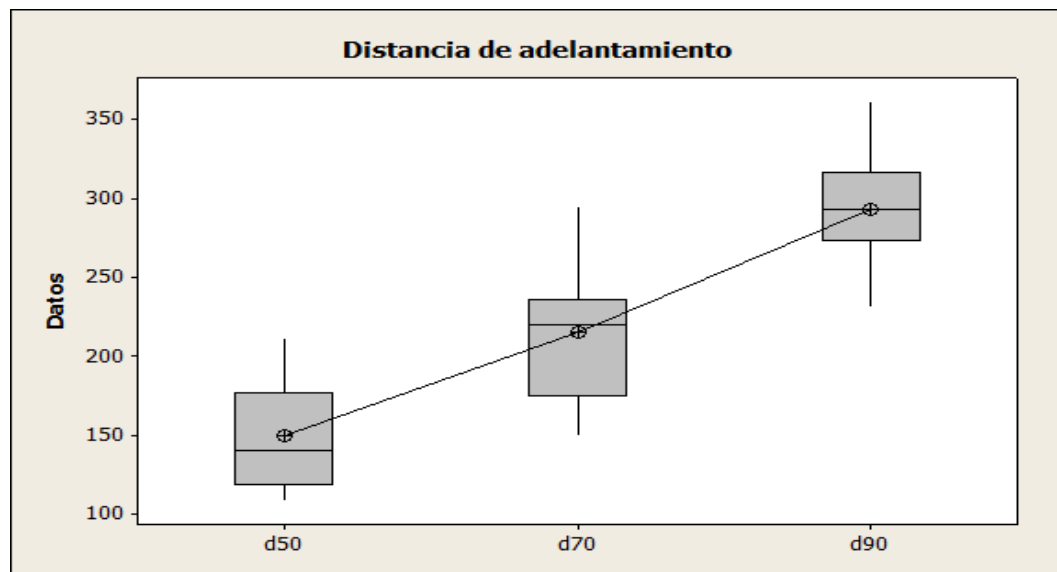


Figura 14. Diagrama de Cajas de D2, para mediciones con VBOX MINI

5.3 Comparación Distancia de Adelantamiento v/s Tipo de Conductor.

Además se realizó una comparación entre los distintos conductores para verificar si las distancias de adelantamiento dependen de la experiencia en la conducción. En la Figura 15, se presenta el gráfico de cajas para la prueba con VBOX mini, mientras que la Tabla 8 muestra los resultados de aplicar un test de igualdad de medias entre los distintos conductores. En Anexo C se presentan los resultados para las mediciones con cronómetro.

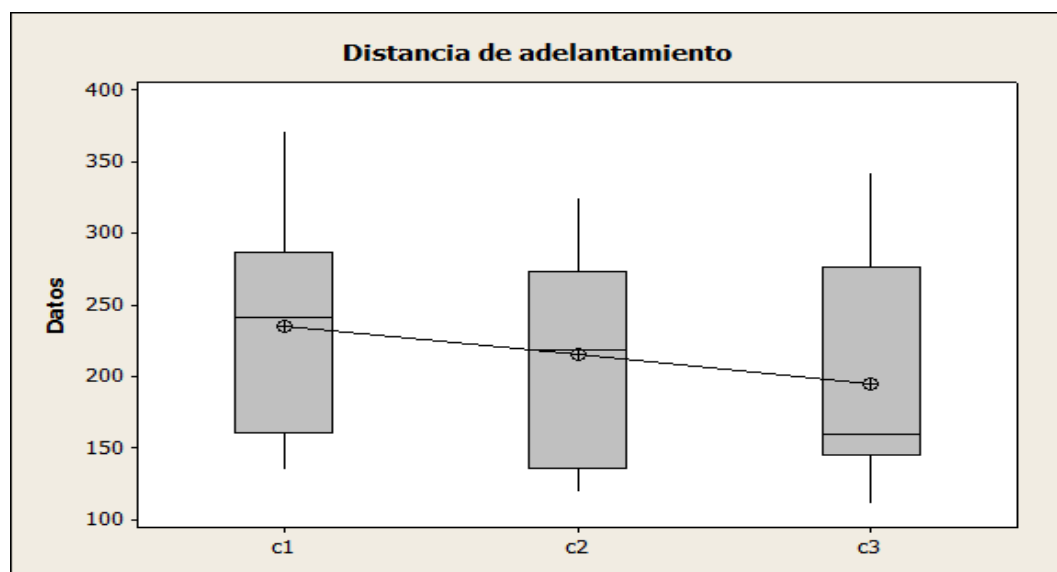


Figura 15. Diagrama de cajas de D2, por tipo de conductor

Tabla 8. Resultados Test de Igualdad de Medias

Comparación	Valor	Rechaza / No Rechaza
c1-c2	0,196	No Rechaza
c1-c3	0,06	No Rechaza
c2- c3	0,562	No Rechaza

Los resultados muestran que para un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$, no existe evidencia estadística de que existan diferencias entre los tipos de conductores. También se aprecia en la Tabla 8 que el conductor 1 con respecto al conductor 3 está en el límite del nivel de significancia. Por tanto esta variable no sería significativa en explicar la determinación de las distancias de adelantamiento.

5.4 Comparación con valores d2 del Modelo AASHTO.

Para cada velocidad se calcularon el promedio y los percentiles 85% y 99% de las distancias de adelantamiento. Estos valores fueron comparados con los obtenidos al aplicar el modelo AASHTO. La Tabla 9 resume la comparación de los datos considerando la prueba de medición del VBOX Mini.

Tabla 9. Comparación de la distancia D2 normado

Velocidad	D2	D2 50%	D2 85%	D2 99%
50	195	150	187	233
70	251	215	259	314
90	314	293	322	380

Se puede apreciar que los valores de las distancia de adelantamiento (D2) obtenidos con el modelo AASHTO no satisfacen el percentil 85% de los valores determinados en la pruebas de terreno con VBOX Mini. Los resultados obtenidos con cronometro se presentan en ANEXO C.

5.5 Probabilidad de excedencia.

Para cada velocidad se calculó cual es la probabilidad de que la demanda de distancia de adelantamiento (D2) supere a la obtenida en el modelo AASHTO. Esta última representaría la oferta mínima de D2 según el diseño. A modo de ejemplo la Figura 16 muestra gráficamente el valor obtenido para la velocidad de 90 km/h

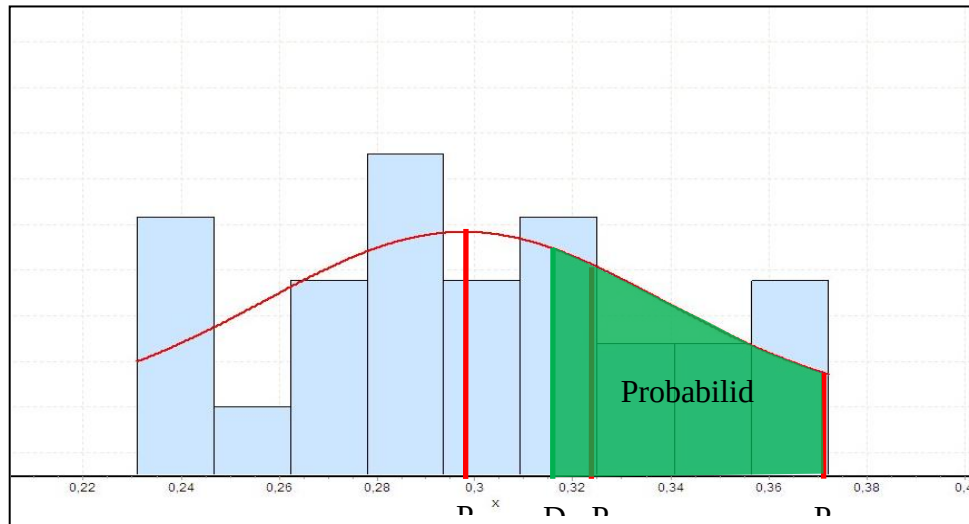


Figura 16. Probabilidad de excedencia para velocidad de 90 km/h

Se puede apreciar que para 90 km/h, la distancia de adelantamiento (D2) según modelo AASHTO es de 314 metros, la cual es excedida en un 29% de los casos registrados en terreno. La Tabla 10 muestra un resumen con los resultados obtenidos.

Tabla 10. Probabilidad de excedencia

D2 AASHTO	Probabilidad de excedencia
195	9
251	20
314	29

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En este trabajo se logró evaluar en base a datos de campo las distancias de adelantamiento para carreteras de dos pistas, considerando distintos niveles de velocidad y tipo de conductor. Del desarrollo de este trabajo se pueden sintetizar las siguientes conclusiones.

- En cuanto a la realización de mediciones de maniobras de adelantamiento en terreno, en la literatura se encontraron diversos trabajos con distintas formas de recolección. A modo de ejemplo, Bella ocupó un simulador para medir el comportamiento del conductor en diferentes situaciones de tráfico, mientras que Polus et al. (2001) realizó mediciones en base a un helicóptero con cámara de grabación y marcas en un tramo de carretera.
- Respecto de las variables que afectan directamente las distancias de adelantamiento, se identificaron en el estado del arte cinco variables significativas: tipo de conductor, velocidad del vehículo adelantado, condiciones de operación, tipo de vehículo que adelanta y visibilidad para poder adelantar.
- En el diseño experimental de la experiencia de terreno, y por razones de disponibilidad de recursos, solo se consideraron dos variables para definir la matriz factorial. Estas fueron la velocidad del vehículo adelantado y la experiencia en la conducción. Los tres niveles de velocidad y experiencia en la conducción fueron: 50, 70, 90 km/h y experiencia <1 año, 1-5 años, >5 años, respectivamente.
- Si bien se realizaron dos campañas de terreno, una considerando la medición con cámaras y cronómetro y la otra con equipo VBOX Mini, el análisis de datos fue realizado principalmente sobre los resultados del VBOX Mini, dado que el análisis del perfil de velocidad permitió identificar de mejor forma las distancias y tiempos de adelantamiento.
- Al procesar los datos de distancia de adelantamiento se determinó que en todos los niveles de velocidad, y considerando todos los conductores, los valores obtenidos se ajustan a una distribución normal según nivel de velocidad:

Tabla 11. Resumen valores estadísticos para los diferentes niveles de velocidad.

Velocidad (km/h)	Media (m)	Desv. Estándar (m)
50	150	33,7
70	215	42,7
90	293	37,3

- Se comprobó que las distancias de adelantamiento para los distintos niveles de velocidad, y considerando todos los conductores, presentan diferencias estadísticamente significativas, para un nivel significancia de $\alpha=0.05$. Al contrario, cuando se comparan los conductores, considerando todas las velocidades, los resultados indican que no existen diferencias significativas entre ellos, para el mismo nivel de significancia.
- Se comparó los datos obtenidos de terreno con la distancia de adelantamiento encontradas mediante el modelo AASHTO (D2). Los resultados indicaron que el modelo AASHTO cubre el percentil 85 de los datos encontrados en terreno, para los tres niveles de velocidad.
- Se obtuvo que la probabilidad de excedencia para la distancia de adelantamiento D2, para una velocidad de 90 km/h, indicando que esta no satisface al 29 % de los conductores.
- Finalmente, del trabajo realizado se concluye que solo corresponde a una primera experiencia de evaluación de distancias de adelantamiento, necesiéndose aumentar las variables y los niveles considerados en el experimento para lograr conclusiones más robustas.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda continuar con esta investigación ampliando el rango de velocidades para carreteras bidireccionales, debido a que la experiencia realizada solo consideró tres niveles: 50, 70 y 90 km/h.

Este estudio solo consideró la evaluación de la distancia de adelantamiento en condiciones de pista contraria libre; por ello se recomienda considerar en estudios posteriores un tercer vehículo que sea conducido por la pista opuesta, de modo de analizar las diferencias respecto de los resultados de este trabajo.

En relación a la toma de datos en terreno, se recomienda considerar vehículos con diferentes características geométricas y de operación que permitan diversificar el experimento, y ver cómo influyen éstos en la distancia de adelantamiento.

Finalmente se recomienda considerar sistemas alternativos de medición tales como el propuesto por Carlson et al (2005), e implementarlos a condiciones de tránsito en Chile, de manera de evaluar las variaciones que se obtienen en los datos obtenidos con distintos sistemas de medición.

BIBLIOGRAFÍA

Ahopalo, P (1987). Experience and response latencies in hazard perception. Universidad de Helsinki. Finlandia

AASHTO (2004) A Policy on Geometric Design of Highways on Street. Washington, D.C.

Bar-Gera, H., and Shinar, D (2005). The tendency of drivers to pass other vehicles. Transportation Research Part F, vol. 8, 429 – 439.

Bella, Francisco (2011). How Traffic Conditions Affect Driver Behavior in Passing Maneuver. Presented 3rd at International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, USA, September.

Brackstone, M., B. Waterson, and M. McDonald (2009). Determinants of following headway in congested traffic. Transportation Research Part F, 12(2), 131 – 142.

Carlson, O.J., Miles, J.D., and Johnson P.K (2005). Findings and Implications from Daytime High – Speed Passing Maneuvers Observed on a Rural Two – Lane, Two – Way Highway. Presented at 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, Washington, D.c., July.

Cohan, J (1988). Statical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2nd Edition. New York: Academia Press.

EASYFIT 5.5. Manual del Usuario, 2010.

Egea, A. El Comportamiento Humano en Conducción: Factores Perceptivos, Cognitivos y de Respuesta. Universidad de Murcia. España.

El khoury, J., and Haberka, A.G (2007). Assessing the risk in the design of passing sight distances. Journal of transportation engineering, vol. 133, No.6. ASCE.

Farah, H., S. Bekhor, and A. Polus (2009). Risk evaluation by modeling of passing behavior on two – lane rural highways. *Accident Analysis and Prevention*, 41, 887 – 894.

Harwood, D.W., Gilmore, D.K., Richard, K.R., and Dun, J.M. (2008). Passing sight distance criteria. NCHRP Report 605, Transportation Research Board.

INVIAS (2008) Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Colombia.

Jenkins, J.M., and Rilett, L.R (2004). Application of distributed traffic simulation for passing study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1899, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Mijuskovic, V (1988). Assessing the needed passing sight distance. *International symposium on Highway Geometric Design Practices*, Transportation Research Circular, 36,1 – 36,10.

MOP (2002) Manual de Carreteras Volumen N°3: Instrucciones y Criterios de Diseño. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Chile

Polus, A., Livneh, M., and Frischer B. (2000). Evaluation of the passing process on two-lane rural highways. *Transportation Research Record: Journal of the transportation research board*, No. 1701, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Rocci, S. (1994). Trazado de Carreteras. Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España.

INDICE ANEXOS

ANEXO A: Descripción del plan de trabajo	40
ANEXO B: Trabajo en Terreno.....	45
ANEXO C: Resultados Cronometro.....	48

ANEXO A: Descripción del plan de trabajo

ANEXO A. DESCRIPCION DE PLAN DE TRABAJO

Etapas 1: Estudio de antecedentes

Esta Etapa estuvo orientada principalmente a la revisión minuciosa de la información existente, de modo de identificar todos los elementos que conducirían el resto de la investigación. Se revisaron principalmente tres tipos de antecedentes: estudio del fenómeno de la maniobra de adelantamiento; revisión de modelos; y revisión de normativas.

a) Maniobra de adelantamiento

Se sintetizó de cómo debe efectuarse la maniobra de adelantamiento en las carreteras de dos pistas (tránsito bidireccional)

b) Estudio del fenómeno

El objetivo de esta etapa fue revisar, analizar y sintetizar los antecedentes de base referido a maniobras de adelantamiento, tales como: conceptos de distancia de adelantamiento, realización de la maniobra de adelantamiento y factores que influyen en la maniobra de adelantamiento. La información fue obtenida de bibliografía especializada referida a estudios e investigaciones de la maniobra de adelantamiento.

c) Revisión de modelos

Se revisó, analizó y sintetizó información referida a los modelos que se han realizado. Se revisaron modelos a nivel mundial que hayan realizado en terreno la maniobra de adelantamiento con el propósito de extraer que variables se midieron y la forma de cómo obtuvieron sus respectivos datos.

d) Hito 1: Variables Relevantes

Al finalizar esta etapa se realizó una clasificación, procesamiento y síntesis de la información encontrada y se identificó el problema a resolver. Esta etapa dio origen a la definición de los objetivos de la investigación.

Etapas 2: Diseño experimental

En esta etapa se realizó el diseño experimental para los modelos de adelantamiento. Se diseñó un experimento para determinar la distancia mínima que necesita un auto para realizar la maniobra de adelantamiento. Esta etapa consistió en tres actividades: Niveles de variables, procedimiento en terreno, selección de tramos y la matriz factorial definitiva.

a) Cálculo de unidad muestral

Consistió en identificar las variables explicativas que serán consideradas en el estudio de la distancia de adelantamiento, como son el tipo de conductor y la velocidad del vehículo que es adelantado.

b) Selección de tramos

Se seleccionaron los tramos de prueba que poseyeran condiciones favorables para el experimento. Los tramos deben ser seguros y con buena visibilidad, que posea un pavimento en buen estado para realizar la maniobra de adelantamiento. Se realizaron visitas a terreno para escoger el tramo.

c) Procedimiento en terreno

Una vez seleccionado el tramo de prueba se dispondrá a realizar el procedimiento que consistirá en ver que materiales se necesitara, como se obtendrá la medición en terreno.

b) Hito 2: Matriz Factorial.

El hito de cumplimiento correspondió a la matriz factorial del experimento de distancia de adelantamiento, con el número de unidades muestrales por cada celda.

Etapas 3: Recolección y Procesamiento de Datos

En esta etapa se realizó la recolección y procesamiento de los datos obtenidos en los experimentos anteriores. Para la prueba de adelantamiento se muestrearon las distancias mínimas. Se realizaron tres etapas: recolección de datos, procesamiento de datos para obtener la base de datos procesada.

a) Recolección de datos

Se diseñó un muestreo basado en los principios de modelación de los procesos aleatorios.

Se realizaron 2 experimentos para obtener las distancias de adelantamiento, en el primero los datos de velocidad serán registrados por el velocímetro que posee cada vehículo para cada maniobra de adelantamiento, según las distintas condiciones definidas en la matriz factorial, el tiempo que se demore cada vehículo en adelantar será registrado por medio de un cronometro y además se dispondrá cámaras dispuestas estratégicamente sobre el automóvil para tener registro de maniobras. El segundo experimento se realizara a través de un equipo VBO Mini que almacena los datos de distancia, velocidad y tiempo en una memoria interna.

b) Procesamiento de Datos

En esta etapa se desarrolló la metodología de procesamiento de los datos obtenidos en terreno. Se consideró la ejecución de dos pasos: información obtenida en cada adelantamiento y generación de la base de datos individuales.

c) Distribución de Frecuencia

En esta etapa se le aplicó el test de leverage a la base de datos agregada, y de esta forma eliminar los valores que difieren de la muestra total.

d) Hito 4: base de datos procesada

El hito de para esta etapa fue una base de datos procesada, completamente depurada y caracterizada para ser utilizada posteriormente.

Etapas 4: Análisis de Datos

En esta etapa se dan a conocer los resultados obtenidos, se realiza una comparación de los valores obtenidos en terreno con los dispuestos por las diferentes normas estudiadas. La evaluación se realizó en tres etapas: Análisis de datos, comparación de valores de D2, obtención de valores de Da..

a) Análisis Estadístico de Datos

En esta etapa se construyeron las bases de datos, previa aplicación de las herramientas estadísticas, estadística descriptiva, test de igualdad de medias, test de bondad de ajuste, coeficiente de variación. Esto logro permitir una completa caracterización de las variables.

b) Comparación de valores de D2

Los valores obtenidos de D2 se compararan con los valores tabulados por el Manual AASHTO.

c) Calculo de probabilidad de excedencia.

Se calculó cual es la probabilidad de que la demanda de distancia de adelantamiento (D2) supere a la obtenida en el modelo AASHTO

d) Hito 5: Conclusiones y Recomendaciones

El hito de esta etapa termina con las conclusiones finales de la memoria y recomendaciones que aporten a futuros ensayos.

ANEXO B: Trabajo en Terreno

ANEXO B-1. TRABAJO EN TERRENO

a) Cronometro

Se utilizó un cronometro que pueda medir parcialmente diferentes tiempos con el propósito de obtener las distancias D1, D2, D3. La Figura B-1 muestra las distancias a obtener.

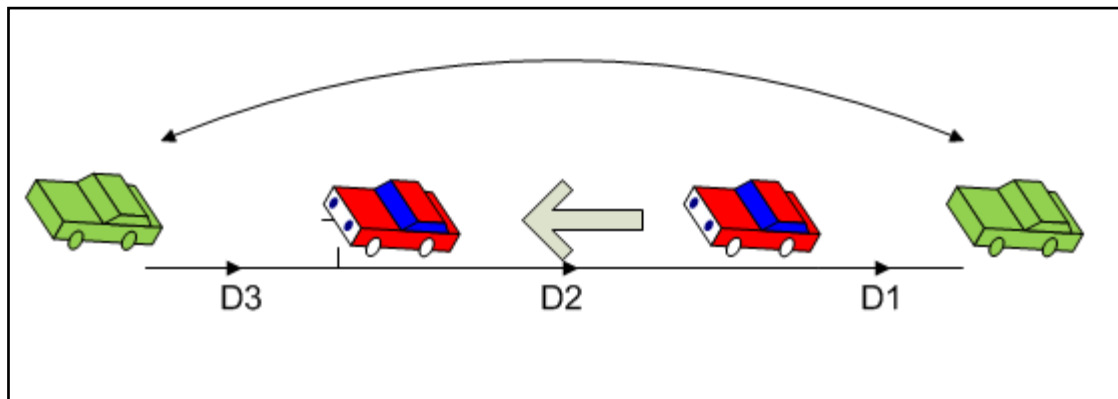


Figura B-1. Distancias que van a ser medidas entre vehículos.

La distancia $D1 + D2 + D3$ correspondería a la distancia D2 del modelo AASHTO.

Los tiempos fueron catalogados como $t1$, $t2$, $t3$ y se obtienen:

- $t1$: se obtiene cuando el vehículo activo atraviesa la rueda izquierda la calzada central y llega a la parte trasera del vehículo adelantado (maletero).
- $t2$: cuando finaliza $t1$ y el maletero del vehículo que realiza el adelantamiento se encuentra con la parte delantera del vehículo adelantado (parachoques delantero).
- $t3$: cuando finaliza $t2$ y el vehículo vuelve a la pista que le corresponde.

En la Figura B-2 muestra en forma esquemática como se midieron los tiempos.

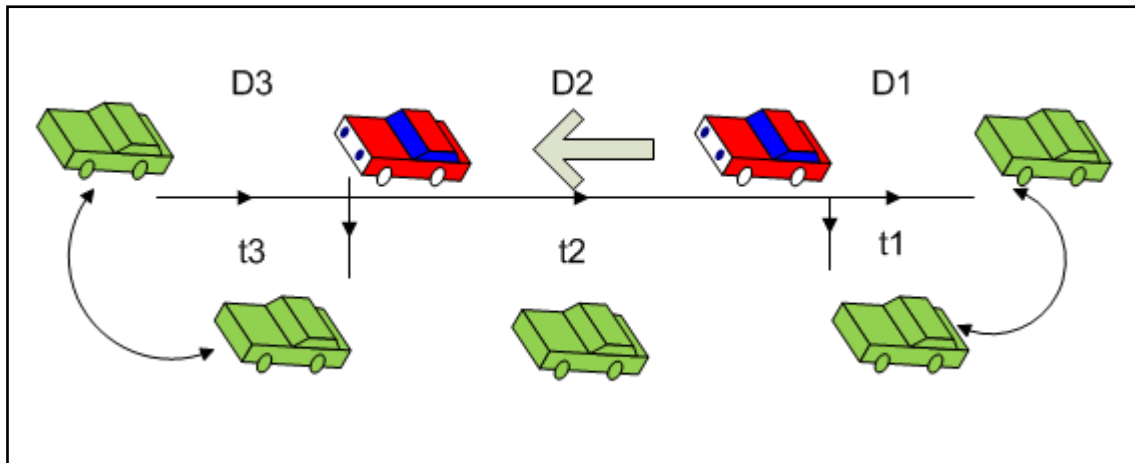


Figura B-2. Como se miden los tiempo en la maniobra entre vehículo activo y pasivo.

Una vez montado el equipo, los pasos a seguir para el registro de tiempos y velocidades fue el siguiente.

- El vehículo pasivo comienza su aceleración hasta alcanzar la velocidad constante designada según matriz factorial del capítulo 3.
- El vehículo activo comienza su aceleración hasta alcanzar la misma velocidad que el vehículo adelantado, y prepararse para empezar a realizar el adelantamiento. Cada conductor mantenía la brecha que ellos estimaban conveniente.
- El cronometro empezaba a funcionar según lo descrito en el acápite anterior. La velocidad máxima era vista del tablero del automóvil.
- La maniobra de adelantamiento terminaba cuando el conductor del vehículo que adelanta volvía a su pista, con el que el tiempo del cronometro se detenía y volvía a cero.

Información obtenida en cada adelantamiento.

- Tiempo total de la maniobra (s), desde que la rueda izquierda delantera del vehículo cruza la calzada central, hasta que se incorpora de manera satisfactoria a la pista.
- Velocidad máxima (km/h), obtenida en cualquier punto de la maniobra.
- Tiempo parcial (s) para cada distancia tomada a través del cronometro.

ANEXO C: Resultados Cronometro

ANEXO C-1. COMPARACION DISTANCIA DE ADELANTAMIENTO VS TIPO DE CONDUCTOR.

Además se realizó una comparación entre los distintos conductores para verificar si las distancias de adelantamiento dependen de la experiencia en la conducción. En la Figura C-1, se presenta el gráfico de cajas para la prueba con VBOX mini, mientras que la Tabla C-1 muestra los resultados de aplicar un test de igualdad de medias entre los distintos conductores.

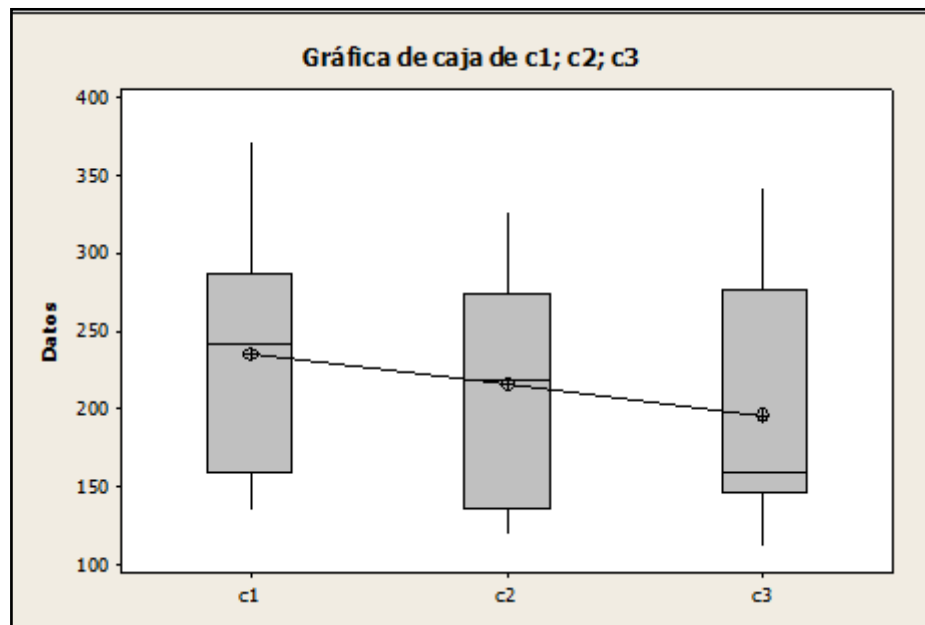


Figura C-1. Diagrama de cajas, por tipo de conductor

Tabla C-1. Resultados Test de Igualdad de Medias

Comparación	Valor de p	Rechaza / NO Rechaza
c1 – c2	0,446	No Rechaza
c1 – c3	0,142	No Rechaza
c2 – c3	0,432	No Rechaza

Los resultados muestran que para un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$, no existe evidencia estadística de que existan diferencias entre los tipos de conductores. Por tanto esta variable no sería significativa en explicar la determinación de las distancias de adelantamiento.

ANEXO C-2 COMPARACION CON NORMAS

D.1 Comparación con valores D2 del Modelo AASHTO.

Para cada velocidad se calcularon el promedio y los percentiles 85% y 99% de **las** distancias de adelantamiento. Estos valores fueron comparados con los obtenidos al aplicar el Modelo AASHTO. La Tabla 10 resume la comparación de los datos considerando la prueba de medición con VBOX Mini.

Tabla C-2. Comparación de la distancia D2 normado.

Velocidad (km/h)	D2 AASHTO (m)	D2 50% (m)	D2 85% (m)	D2 99% (m)
50	115	141	175	115
70	166	196	235	166
90	231	320	475	231

Se puede apreciar que los valores de la distancia de adelantamiento (D2) obtenidos con el modelo AASHTO no satisfacen ningún percentil.