



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención
en Ingeniería Civil



**Modelación de aceleraciones laterales medidas con GPS en
caminos rurales**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

GUSTAVO ADOLFO JIMÉNEZ RAMOS
CONCEPCIÓN-CHILE
2016

Profesor Guía: Dr. Tomás Echaveguren Navarro
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

El diseño de carreteras busca cumplir con criterios de diseño y analizar el comportamiento de los usuarios que circulan a lo largo de una ruta, con el objetivo de otorgarles seguridad y comodidad. Esto se traduce en comprender la respuesta de los conductores frente a los elementos geométricos que componen el alineamiento, dadas las características del conductor, el vehículo y el terreno.

La aceleración lateral es uno de los factores más influyentes en el diseño de curvas horizontales, pues esta variable se encuentra relacionada con la velocidad longitudinal escogida para tomar una curva. Además, la sensación de seguridad de un usuario en una curva puede ser representada en términos de la comodidad de los ocupantes según los valores de aceleración lateral que se alcance en la curva.

La hipótesis del trabajo propone que “La aceleración lateral en curvas, como variable aleatoria, está explicada por factores determinísticos, como es la geometría, y factores pseudo-aleatorios, como es la velocidad de operación”. El objetivo general fue establecer un modelo matemático para predecir correctamente la aceleración lateral de vehículos livianos que circulan por curvas en S en caminos rurales.

Los resultados mostraron que la aceleración lateral obedece a una distribución Burr de cuatro parámetros. Se observó que la ecuación del modelo de masa puntual entrega valores de aceleración lateral generalmente menores al percentil 50 para todas las curvas, subestimando el valor que perciben los ocupantes. Los valores de aceleración lateral varían dependiendo el punto de la curva que se está analizando, con valores desde 0.1 a 0.15 g para las tangentes y alcanzando hasta 0.4 g en la mitad de la curva. El percentil 90 de la aceleración lateral puede describir el comportamiento de los usuarios de una curva horizontal sucesiva e inversa.

Los modelos calibrados para los puntos extremos de la curva sirven para entender el fenómeno de la aceleración lateral, pero debido a su bajo ajuste no se recomienda su utilización. Para la mitad de curva se calibraron y validaron modelos con buen ajuste los cuales pueden ser utilizados para predecir los valores de aceleración lateral en curvas horizontales.



AGRADECIMIENTOS



TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	II
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Hipótesis de trabajo	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Plan de trabajo	3
1.5 Principales resultados y conclusiones	3
1.6 Alcances de la tesis	4
1.7 Estructura del informe	4
CAPÍTULO 2 LA ACELERACIÓN LATERAL EN CURVAS HORIZONTALES.....	6
2.1 Introducción	6
2.2 Elementos de la curva de inflexión en S.....	6
2.3 El concepto de aceleración lateral.....	7
2.4 La aceleración lateral y la velocidad longitudinal	9
2.5 Valores de aceleración lateral	9
2.6 Modelos de aceleración lateral.....	11
2.7 Conclusiones	13
CAPÍTULO 3 DISEÑO EXPERIMENTAL	14
3.1 Introducción	14
3.2 Diseño factorial.....	14
3.3 Conclusiones	17
CAPÍTULO 4 PROCESAMIENTO DE DATOS	18
4.1 Introducción	18
4.2 Configuración de la base de datos	18
4.3 Geometría de las curvas horizontales	20
4.4 Procesamiento de datos de aceleraciones laterales y velocidad.....	21

4.5	Base de datos configurada	25
4.6	Asignación de datos en la matriz factorial.....	25
4.7	Conclusiones	27
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ACELERACIONES LATERALES		28
5.1	Introducción	28
5.2	Procedimiento para el análisis estadístico	28
5.3	Análisis de correlaciones	33
5.4	Análisis de percentiles	35
5.5	Comparación con los valores de aceleración obtenidos utilizando Vop.....	40
5.6	Aceleración de operación.....	44
5.7	Conclusiones	45
CAPÍTULO 6 MODELACIÓN DE ACELERACIONES LATERALES		46
6.1	Introducción	46
6.2	Base de datos utilizada.....	46
6.3	Formulación de los modelos	47
6.4	Calibración y validación de modelos.....	48
6.5	Conclusiones	67
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES		69
REFERENCIAS		72
ANEXOS		75
ANEXO 5.1 Distribuciones de probabilidad y test de bondad de ajuste.....		75
ANEXO 5.2 Ranking de distribuciones según estadístico Anderson-Darling.....		76
ANEXO 5.3 Gráficas de percentiles de distribución por celda.....		87
ANEXO 5.4 Gráficas de percentiles de distribución por curva		99
ANEXO 6.1 Modelos de aceleración lateral		108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Rango de valores de umbrales de aceleración lateral.....	10
Tabla 2.2 Modelos de aceleración lateral	11
Tabla 3.1 Matriz factorial	15
Tabla 4.1 Geometría de las C.H.S.I.....	20
Tabla 4.2 Velocidad de percentil 85 por curva.....	21
Tabla 4.3 Velocidad de percentil 85 por celda de la matriz factorial	22
Tabla 4.4 Matriz factorial con asignación de mediciones	26
Tabla 5.1 Correlación de los parámetros de la distribución con las variables operativas y geométricas.....	33
Tabla 5.2 Correlación de la media y la varianza de la aceleración lateral con las variables geométricas y operativas	34
Tabla 5.3 Valores de la Ecuación 2.2 por celda de la matriz factorial	41
Tabla 5.4 Aceleración lateral de operación (g) en función del radio	44
Tabla 6.1 Indicadores de validación de la Ecuación 6.8	51
Tabla 6.2 Indicadores de validación de la Ecuación 6.9	52
Tabla 6.3 Indicadores de validación de la Ecuación 6.10	53
Tabla 6.4 Indicadores de validación de la Ecuación 6.11	54
Tabla 6.5 Indicadores de validación de la Ecuación 6.12	56
Tabla 6.6 Indicadores de validación de la Ecuación 6.13	57
Tabla 6.7 Indicadores de validación de la Ecuación 6.14	58
Tabla 6.8 Indicadores de validación de la Ecuación 6.15	60
Tabla 6.9 Indicadores de validación de la Ecuación 6.16	61
Tabla 6.10 Indicadores de validación de la Ecuación 6.17	62
Tabla 6.11 Indicadores de validación de la Ecuación 6.18	62
Tabla 6.12 Indicadores de validación de la Ecuación 6.19	63
Tabla 6.13 Indicadores de validación de la Ecuación 6.20	64
Tabla 6.14 Indicadores de validación de la Ecuación 6.21	65
Tabla 6.15 Indicadores de validación de la Ecuación 6.22	66
Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling.....	77

Tabla A.6.1 Modelos para el principio de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m. ...	108
Tabla A.6.2 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.1	108
Tabla A.6.3 Modelos para la mitad de la curva de entrada con radios entre 190 y 700 m.	109
Tabla A.6.4 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.3	110
Tabla A.6.5 Modelos para la mitad de la curva de entrada con radios entre 190 y 399 m.	110
Tabla A.6.6 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.5	111
Tabla A.6.7 Modelos para la mitad de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m.	111
Tabla A.6.8 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.7	113
Tabla A.6.9 Modelos para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m.	113
Tabla A.6.10 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.9	114
Tabla A.6.11 Modelos para la mitad de tangente	114
Tabla A.6.12 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.11	114
Tabla A.6.13 Modelos para el principio de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m.	115
Tabla A.6.14 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.13	115
Tabla A.6.15 Modelos para el principio de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m.	116
Tabla A.6.16 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.15	116
Tabla A.6.17 Modelos para la mitad de la curva de salida con radios entre 190 y 700 m.	117
Tabla A.6.18 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.17	118
Tabla A.6.19 Modelos para la mitad de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m.	118
Tabla A.6.20 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.19	119
Tabla A.6.21 Modelos para la mitad de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m.	120
Tabla A.6.22 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.21	121
Tabla A.6.23 Modelos para el final de la curva de salida con radios entre 190 y 700 m.	121
Tabla A.6.24 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.23	121
Tabla A.6.25 Modelos para el final de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m.	122
Tabla A.6.26 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.25	122
Tabla A.6.27 Modelos para el final de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m.	123
Tabla A.6.28 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.27	123

ÍNDICE DE FIGURAS

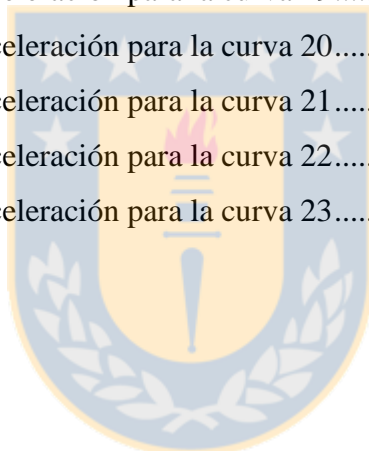
Figura 2.1 Curva horizontal sucesiva e inversa.....	6
Figura 2.2 Componentes del vector aceleración.....	8
Figura 3.1 Potencia estadística en función del tamaño muestral y del efecto tamaño, para un experimento ANOVA a priori	16
Figura 4.1 Diagrama de la configuración de la base de datos	18
Figura 4.2 Puntos característicos de la C.H.S.I.	19
Figura 4.3 Ejemplo de identificación de datos anómalos.....	24
Figura 4.4 Extracto de la base de datos por curva.....	25
Figura 5.1 Puntos característicos de la C.H.S.I	28
Figura 5.2 FDP en puntos característicos de una curva con radios de 191 m y longitud de tangente intermedia 87 m.....	31
Figura 5.3 FDP en los puntos característicos de una curva con radios de 687 m y longitud de tangente intermedia 1341 m.	32
Figura 5.4 Percentiles de aceleración para la mitad de la curva de entrada en cada curva	36
Figura 5.5 Percentiles de aceleración para la mitad de tangente en cada curva.....	36
Figura 5.6 Percentiles de aceleración para la mitad de la curva de salida en cada curva.....	37
Figura 5.7 Percentiles de aceleración de la mitad de la curva de entrada por celda de la matriz factorial.....	37
Figura 5.8 Percentiles de aceleración de la mitad tangente por celda de la matriz factorial	38
Figura 5.9 Percentiles de aceleración de la mitad de la curva de salida por celda de la matriz factorial.....	38
Figura 5.10 Aceleración de percentil 50 vs aceleración para V85 en la mitad de la curva 1	42
Figura 5.11 Aceleración de percentil 90 vs aceleración para V85 en la mitad de la curva 1	42
Figura 5.12 Aceleración de percentil 50 vs aceleración para V85 en la mitad de la curva 2.....	43
Figura 5.13 Aceleración de percentil 90 vs aceleración para V85 en la mitad de la curva 2.....	43
Figura 6.1 Puntos seleccionados para la modelación	46
Figura 6.2 Aceleración observada v/s predicha para la Ecuación 6.8	52
Figura 6.3 Aceleración observada v/s predicha para la Ecuación 6.9	53
Figura 6.4 Aceleración observada v/s predicha para la Ecuación 6.10	54

Figura 6.5 Aceleración observada v/s predicha para la Ecuación 6.11	55
Figura 6.6 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.12.....	56
Figura 6.7 Aceleración lateral observada v/s predicha para a Ecuación 6.13	58
Figura 6.8 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.14	59
Figura 6.9 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.15	60
Figura 6.10 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.16	61
Figura 6.11 Aceleración lateral observada v/s predicha por la Ecuación 6.17.....	62
Figura 6.12 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.18	63
Figura 6.13 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.19	64
Figura 6.14 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.20	65
Figura 6.15 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.21	66
Figura 6.16 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.22	66
Figura A.5.1 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor a 70 km/h	87
Figura A.5.2 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h	87
Figura A.5.3 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h	88
Figura A.5.4 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h	88
Figura A.5.5 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h	88
Figura A.5.6 Percentiles de aceleración para radio de entrada menor a 200 m, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h.....	89
Figura A.5.7 Percentiles de aceleración para radio de entrada menor a 200 m, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h.....	89
Figura A.5.8 Percentiles de aceleración para radio de entrada menor a 200 m, radio de salida, tangente intermedia entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h.....	89
Figura A.5.9 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h	90

Figura A.5.10 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h	90
Figura A.5.11 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h	90
Figura A.5.12 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h	91
Figura A.5.13 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 110 y 120 km/h	91
Figura A.5.14 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia entre 200 y 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h	91
Figura A.5.15 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia entre 200 y 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h	92
Figura A.5.16 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia entre 200 y 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h	92
Figura A.5.17 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia entre 200 y 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h	92
Figura A.5.18 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m, y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h	93
Figura A.5.19 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m, y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h	93
Figura A.5.20 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m, y velocidad de aproximación entre 110 y 120 km/h	93
Figura A.5.21 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, L _{Ti} mayor a 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h	94
Figura A.5.22 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, L _{Ti} mayor a 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h	94
Figura A.5.23 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, tangente intermedia y radio de salida mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h ...	94
Figura A.5.24 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, tangente intermedia y radio de salida mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h ...	95

Figura A.5.25 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, tangente intermedia y radio de salida mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h .	95
Figura A.5.26 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida mayor a 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h	95
Figura A.5.27 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida mayor a 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h	96
Figura A.5.28 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida mayor a 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 110 y 120 km/h	96
Figura A.5.29 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia mayor a 400 m, radio de salida entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h	96
Figura A.5.30 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia mayor a 400 m, radio de salida entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h	97
Figura A.5.31 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia mayor a 400 m, radio de salida entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h	97
Figura A.5.32 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h	97
Figura A.5.33 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h	98
Figura A.5.34 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h	98
Figura A.5.35 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h	98
Figura A.5.36 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 110 y 120 km/h	99
Figura A.5.37 Percentiles de aceleración para la curva 1	99
Figura A.5.38 Percentiles de aceleración para la curva 2.....	100
Figura A.5.39 Percentiles de aceleración para la curva 3.....	100
Figura A.5.40 Percentiles de aceleración para la curva 4.....	100
Figura A.5.41 Percentiles de aceleración para la curva 5.....	101
Figura A.5.42 Percentiles de aceleración para la curva 6.....	101
Figura A.5.43 Percentiles de aceleración para la curva 7.....	101

Figura A.5.44 Percentiles de aceleración para la curva 8.....	102
Figura A.5.45 Percentiles de aceleración para la curva 9.....	102
Figura A.5.46 Percentiles de aceleración para la curva 10.....	102
Figura A.5.47 Percentiles de aceleración para la curva 11.....	103
Figura A.5.48 Percentiles de aceleración para la curva 12.....	103
Figura A.5.49 Percentiles de aceleración para la curva 13.....	103
Figura A.5.50 Percentiles de aceleración para la curva 14.....	104
Figura A.5.51 Percentiles de aceleración para la curva 15.....	104
Figura A.5.52 Percentiles de aceleración para la curva 16.....	104
Figura A.5.53 Percentiles de aceleración para la curva 17.....	105
Figura A.5.54 Percentiles de aceleración para la curva 18.....	105
Figura A.5.55 Percentiles de aceleración para la curva 19.....	105
Figura A.5.56 Percentiles de aceleración para la curva 20.....	106
Figura A.5.57 Percentiles de aceleración para la curva 21.....	106
Figura A.5.58 Percentiles de aceleración para la curva 22.....	106
Figura A.5.59 Percentiles de aceleración para la curva 23.....	107



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En el diseño de carreteras se busca cumplir con criterios de diseño, y otorgar seguridad y comodidad a los usuarios que circulan a lo largo de una ruta en cada uno de sus elementos geométricos. Uno de los factores influyentes en el diseño de curvas horizontales es la aceleración lateral, pues la velocidad escogida para tomar una curva es relativa a la sensación de seguridad que percibe un conductor, seguridad que puede medirse según la comodidad de los ocupantes en términos de la aceleración lateral.

Diversos autores han estudiado el comportamiento de los conductores en curvas aisladas, encontrando modelos de aceleración de manera directa o indirecta por medio de los valores de la demanda de fricción. En estos modelos se han encontrado las variables que más influyen en el valor de la aceleración lateral: la velocidad de operación, y variables geométricas, como el radio de curvatura, que explican la aceleración. Todos los modelos se basan en curvas aisladas y con datos de aceleración obtenidos por acelerómetros instalados en vehículos de prueba.

Los estudios existentes en la literatura muestran el comportamiento de la aceleración lateral en curvas horizontales aisladas. No existen estudios en curvas sucesivas, por lo que surge la inquietud de ver cómo afecta esta configuración geométrica a los valores de aceleración lateral. Una buena aproximación a encontrar estos valores se da por medio de encontrar la distribución de probabilidades que caracterice la aceleración lateral. En particular, en la tangente intermedia de dos curvas con curvatura opuesta ocurre un cambio en el sentido de la aceleración lateral resultando interesante conocer cómo afecta este cambio a los ocupantes del vehículo.

En esta Tesis se calibran modelos de aceleración lateral en función de variables geométricas y de operación, en puntos característicos definidos para una curva horizontal sucesiva e inversa.

1.2 Hipótesis de trabajo

La aceleración lateral en curvas, como variable aleatoria, está explicada por factores determinísticos, como es la geometría, y factores pseudo-aleatorios, como es la velocidad de operación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Modelar matemáticamente la aceleración lateral en curvas horizontales, sucesivas e inversas, para vehículos livianos que circulan por caminos rurales.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Identificar las principales variables que afectan el valor de la aceleración lateral en las curvas.
- b) Diseñar una base de datos con mediciones existentes considerando los valores de velocidad, aceleración y los parámetros geométricos de las curvas con el objetivo de analizar el fenómeno de la aceleración lateral.
- c) Identificar patrones de comportamiento para las distintas combinaciones geométricas y operativas existentes en las bases de datos.
- d) Caracterizar estadísticamente la aceleración lateral mediante los datos medidos en caminos rurales y ajustarlos a una distribución de probabilidades
- e) Calibrar y validar modelos de aceleración lateral en los distintos puntos característicos de la curva horizontal inversa y sucesiva.

1.4 Plan de trabajo

El plan de trabajo consistió en seis etapas: revisión del estado del arte, diseño experimental, procesamiento de datos, análisis estadístico, revisión de patrones, y calibración y validación de modelos de aceleración lateral.

En la primera etapa se identificaron las variables que según la literatura influyen en el valor de la aceleración lateral. Luego se generó el diseño experimental que definió el tamaño muestral necesario para estudiar el fenómeno, todo esto en función de las variables explicativas descritas en la etapa anterior. La etapa de procesamiento de datos consideró la generación de una base de datos a partir de mediciones existentes, considerando para ésta la interacción entre la geometría, velocidad y aceleración, tanto para el análisis por curva y el análisis por celda de la matriz factorial.

Posteriormente se realizó la caracterización estadística de la aceleración, por medio del ajuste de distribuciones de probabilidad y la estimación de los distintos percentiles de aceleración. Luego se identificaron y analizaron patrones de comportamiento en las configuraciones geométricas existentes. Finalmente, se calibraron y validaron distintos modelos de aceleración lateral en función de la velocidad de operación y la geometría para cada uno de los puntos característicos definidos.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Se observó que la distribución Burr de cuatro parámetros es la que mejor representa a la aceleración lateral, encontrando una tendencia a la simetría, excepto para los finales de curva, donde se identifica una asimetría, que depende del sentido de la curva.

Los valores de aceleración lateral se encuentran bajo el percentil 50 de la distribución, subestimando las aceleraciones alcanzadas por los conductores. Cuando el modelo de masa puntual no considera el valor del peralte en las curvas, ésta sobrestima la aceleración lateral en curvas con radios menores a 400 m, entregando resultados superiores al percentil 99. En curvas con radios mayores a 400 m, los valores de aceleración lateral no sobrepasan el percentil 85.

Los percentiles de aceleración 50 y 99 no entregan información concluyente sobre el comportamiento de los conductores, pues en las colas de la distribución pequeños cambios de percentil conllevan variaciones en el valor de la aceleración lateral. Si es necesario definir una aceleración de operación, se recomienda utilizar el percentil 90, pero se sugiere utilizar modelos que describan la aceleración lateral.

Se propone un conjunto de modelos lineales para predecir la aceleración lateral en cada uno de los puntos característicos definidos para la curva horizontal sucesiva e inversa en función de la velocidad y las variables geométricas de la entidad.

1.6 Alcances de la tesis

La investigación se enfoca en vehículos livianos (autos y camionetas) que circulan en caminos bidireccionales, de una pista por sentido, pavimentados y con velocidades de proyecto que fluctúan entre 50 y 120 km/h.

Las mediciones consideran el caso de pavimento seco y en buen estado de conservación, conducción diurna, condiciones climáticas favorables, existencia de visibilidad del trazado en toda la curva, condiciones de flujo libre (TMDA menor a 5000 vehículos/día-año), terreno plano (pendiente máxima de un 4%), zona despejada (existencia de visibilidad lateral) y no existencia de señalización y control explícita de velocidad.

1.7 Estructura del informe

El documento se estructura en siete capítulos. En el segundo capítulo se especifica el concepto físico de la aceleración lateral y se analiza el estado del arte en cuanto a modelación de aceleración lateral. En el capítulo tres se muestra el diseño experimental que permite definir el rango de validez del estudio, por medio de la interacción de las variables explicativas consideradas en los distintos rangos que permiten construir la matriz factorial.

En el cuarto capítulo se describe la configuración de la base de datos, detallando el procesamiento de la velocidad, la aceleración y la geometría. Además se asignan los datos a la matriz factorial. En el capítulo cinco se describe el análisis estadístico de los datos, los ajustes de distribuciones y test de bondad de ajuste realizados para encontrar la mejor representación del fenómeno y comparar distintos percentiles con la ecuación física de la aceleración lateral.

En el capítulo seis se describe la metodología utilizada para la modelación de la aceleración lateral y se muestran los modelos escogidos para cada punto característico de la curva horizontal sucesiva e inversa. Finalmente, en el capítulo siete se presentan las conclusiones del trabajo y las líneas futuras de investigación.



CAPÍTULO 2 LA ACELERACIÓN LATERAL EN CURVAS HORIZONTALES

2.1 Introducción

En este capítulo se define geométrica y funcionalmente la curva de inflexión en S y los elementos que la constituyen. Se detalla el concepto físico de la aceleración lateral y la relación de ésta con la velocidad longitudinal. Luego, se presentan los valores de aceleraciones laterales relacionados con la comodidad y los modelos existentes en el estado del arte. Finalmente se muestran las conclusiones del capítulo.

2.2 Elementos de la curva de inflexión en S

Una curva horizontal sucesiva e inversa (o C.H.S.I.) consiste en dos curvas que tienen curvatura en direcciones opuestas y un punto tangente en el inicio y final, o bien se encuentran unidas por una tangente intermedia, tal como se puede observar en la Figura 2.1.

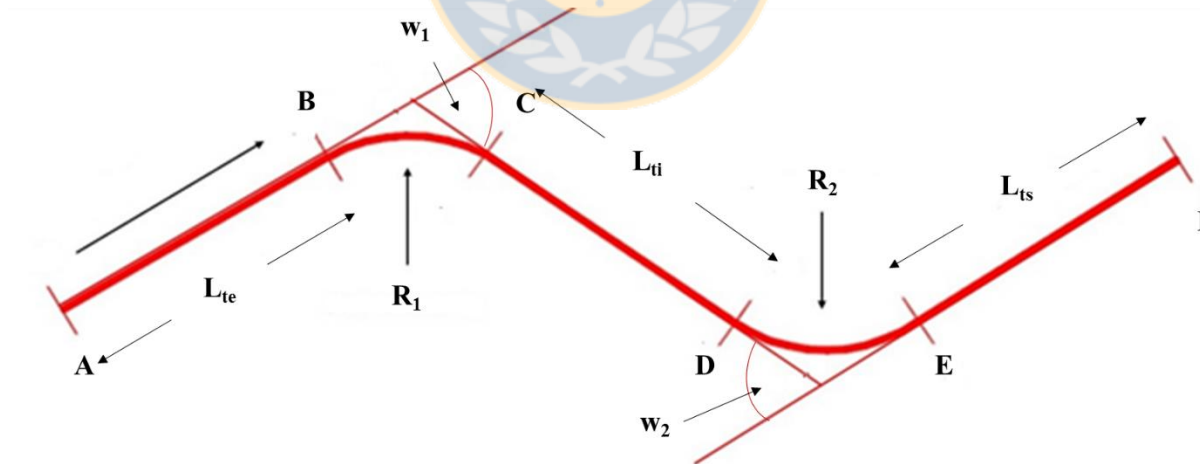


Figura 2.1 Curva horizontal sucesiva e inversa

Entre los puntos A y B se encuentra la tangente de entrada a la curva (L_{te}), la sección BC es la curva de entrada, los puntos C y D marcan los límites de la tangente intermedia (L_{ti}), la sección DE

muestra la curva de salida y finalmente la sección EF corresponde a la tangente de salida (L_{ts}). Se definen, además, las variables geométricas de las curvas, donde R_i es el radio de la curva respectiva (m) y w_i es el ángulo de deflexión de la curva respectiva (g).

La longitud de la tangente intermedia determina si las curvas sucesivas son o no dependientes, según el criterio de Lamm *et al.* (1988). Echaveguren *et al.* (2015), por su parte, definen la dependencia de las curvas en virtud de cómo afecta la velocidad de la curva de entrada a la velocidad en la tangente intermedia y la curva de salida. Las recomendaciones de diseño en Chile consideran que dos curvas son dependientes cuando no existe una recta intermedia, o cuando la longitud de la tangente es menor a 400 m, y cumplen con la relación de radios recomendada en el Manual de Carreteras (MOP, 2015). Lamm *et al.* (1988) proponen no considerar las tangentes como elementos independientes, sino como parte de la curva y formar parte del proceso de diseño como una secuencia tangente-curva-tangente. Esto se basa en el hecho que la operación en la tangente está correlacionada espacialmente con la operación en la curva. Entonces, la velocidad en la tangente de entrada depende de las características geométricas de la curva inmediatamente posterior, y viceversa. El caso de la C.H.S.I. es análogo a la explicación para una curva aislada, donde cada elemento se ve influenciado por el anterior y el posterior.

2.3 El concepto de aceleración lateral

Desde un punto de vista cinemático, una partícula que se mueve a través de una trayectoria circular de radio constante experimenta una aceleración (a , en m/s^2) en dirección al centro del círculo, perpendicular a la velocidad instantánea. Esta se conoce como aceleración centrípeta y queda definida por la Ecuación 2.1.

$$a = \frac{V^2}{R}, \quad (2.1)$$

La aceleración percibida por el conductor es ligeramente distinta a la aceleración centrípeta. Esta diferencia se debe al efecto del peralte (e), que disminuye su valor. (ver Ecuación 2.2, con V en km/h, R en m y e en porcentaje).

$$a = \frac{V^2}{127R} - \frac{e}{100}, \tag{2.2}$$

Para el caso de un vehículo moviéndose a través de una curva en terreno plano, el vector de aceleraciones se divide en dos componentes, una tangencial o longitudinal (\vec{a}_t) y otra centrípeta o lateral (\vec{a}_l). La aceleración longitudinal provoca variaciones en el módulo de la velocidad, mientras que la aceleración lateral se relaciona con la comodidad de los conductores durante el desplazamiento por la curva. En la Figura 2.2 se muestran ambas componentes de la aceleración en una curva

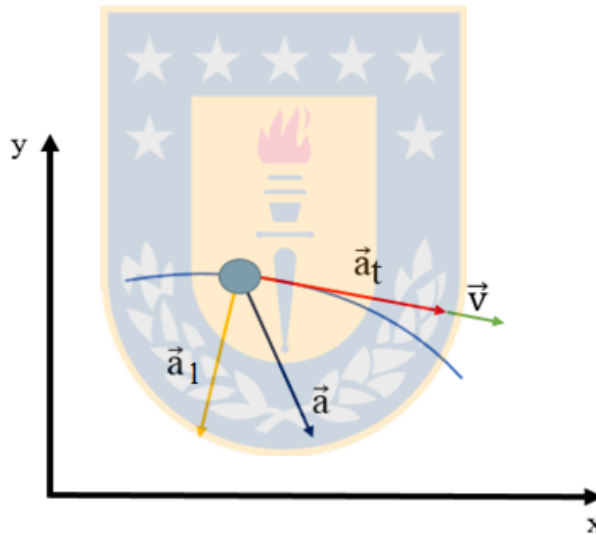


Figura 2.2 Componentes del vector aceleración

Matemáticamente, el vector de aceleraciones se define según la Ecuación 2.3.

$$\vec{a} = \frac{d}{dt}(v \hat{e}_t) = \frac{dv}{dt} \hat{e}_t + v \frac{d\hat{e}_t}{dt} = \vec{a}_t + \vec{a}_l, \tag{2.3}$$

Donde \vec{a} es el vector de aceleraciones, v es la velocidad y \hat{e}_t es el vector unitario tangente. El término $v \frac{d\hat{e}_t}{dt}$ representa la aceleración lateral, mientras que $\frac{dv}{dt} \hat{e}_t$ es la aceleración longitudinal.

Los términos aceleración y aceleración lateral se utilizarán indistintamente a lo largo de este trabajo.

2.4 La aceleración lateral y la velocidad longitudinal

La aceleración lateral está influenciada por la velocidad longitudinal. Ritchie *et al.* (1968) investigaron la relación entre la velocidad de operación y la aceleración en una curva. Un total de 50 conductores participaron en el experimento en el que condujeron por un segmento de carretera de 190 km que contenía 227 curvas (Ritchie *et al.* 1968). Para la investigación utilizaron un automóvil liviano, con un acelerómetro instalado en el piso bajo el asiento del conductor. Recorrieron las curvas a diferentes velocidades, desde bajo 30 km/h, hasta sobre 90 km/h con intervalos de 8 km/h entre estos valores. Los resultados mostraron una relación inversa entre la aceleración lateral y la velocidad de operación, para valores superiores a 30 km/h. Esta relación los llevó a sugerir las siguientes hipótesis:

- i. La aceleración lateral desarrollada en la curva es el criterio primario de elección de velocidad en una curva.
- ii. La percepción de la aceleración lateral es la forma básica de información del conductor.
- iii. La disminución en la aceleración lateral al producirse un incremento en la velocidad, refleja el aumento de la percepción de peligro por parte del conductor

2.5 Valores de aceleración lateral

Se encontraron en la literatura diversas representaciones de la aceleración lateral desde medidas de comodidad o escalas subjetivas de incomodidad, hasta modelos de comodidad basados en el ángulo *Ball Bank*, las que se muestran a continuación:

- i. Ritchie *et al.* (1968), encontraron valores de aceleración lateral de hasta 0,274 g con un estudio empírico donde 50 conductores recorrieron un trazado de 176 km en el que habían 227 curvas.
- ii. Lechner *et al.* (1983), citado en Jiménez *et al.* (2008), propusieron los umbrales de aceleración lateral de la Tabla 2.1, según su efecto en el conductor y el vehículo.

Tabla 2.1 Rango de valores de umbrales de aceleración lateral (Lechner et al. 1983)

Aceleración lateral (m/s ²)	Observación
<2	Cualquier conductor o pasajero lo soporta
2 - 4	La mayoría se siente cómodo
4 - 6	Los vehículos modernos proporcionan estabilidad, pero los conductores no se sienten cómodos
6 - 8	No es posible de soportar, ni por el vehículo ni el conductor

- iii. Felipe y Navin (1998) realizaron un estudio empírico en el que un grupo de ocho conductores y su acompañante entregaban su percepción sobre lo soportable que era la conducción por cuatro curvas de distinto radio en una conducción a velocidad normal y otra suponiendo una situación de emergencia. Encontraron que el umbral de incomodidad está entre 0,35 a 0,4 g.
- iv. Glaser y Aguilera (2003) encontraron que el umbral de incomodidad se encuentra entre 0,2 a 0,4 g, sin importar la velocidad de circulación.
- v. Neukum *et al.* (2008) crearon una escala de incomodidad subjetiva encontrando que el cambio máximo en la aceleración lateral por ajustes de trayectoria no puede pasar de 1,25 (m/s²) para no generar incomodidad.

- vi. Kenda y Kopac (2011) encontraron a través de un estudio empírico que el valor de la aceleración lateral en condiciones límites puede llegar a 0,99 g
- vii. Echaveguren y Vargas-Tejeda (2013) elaboraron un modelo de comodidad basado en el ángulo *Ball Bank*, donde un conductor pasó por 24 curvas a distintas velocidades, y encontraron que las personas admiten niveles superiores de incomodidad que los establecidos a través de la señalización de velocidad máxima en curvas.

2.6 Modelos de aceleración lateral

Se identificaron modelos de aceleración lateral desde el año 1971. No se tomaron en cuenta modelos de demanda de fricción, por considerar éstos la aceleración lateral de forma indirecta y considerar variables ajenas al análisis. Los modelos se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Modelos de aceleración lateral

Autor	País	Modelo	Comentarios
Neuhardt <i>et al.</i> (1971)	Estados Unidos	$\frac{a}{A_T} = 1 - e^{[3,6\beta(v_A - v)]}$	
Herrin <i>et al.</i> (1974)	Estados Unidos	$a = (1+K)(kC(2,24v)^2 - e)$	
Reymond <i>et al.</i> (2001)	Francia	$\Gamma \leq \Gamma_{max} - \Delta\Gamma$ $\Delta\Gamma = \Delta C_{max} v^2$	Modelo de margen de aceleración lateral
Syed (2006)	Canadá	$a = -0,268 + 0,092d + 61,556/R + 0,0072v - 0,453e$	
Hasan (2014)	Canadá	$a_p = 0,42(1 + \epsilon)a$	Aceleración percibida por el conductor

Autor	País	Modelo	Comentarios
Hasan (2014)	Canadá	$a = \frac{2,39}{1500} e g$	Aceleración lateral a base de eje
Bosetti <i>et al.</i> (2015)	Italia	$a = \frac{a_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{v_0^2}\right)^2 + 2 \frac{v^2}{v_0^2}}}$	
Dhahir y Hassan (2015)	Canadá	$a = 0,007 \frac{(3,6v)^{2,048}}{R^{1,019}} + 0,023e + 0,002G$	Simulador para un Sedan
Dhahir y Hassan (2015)	Canadá	$a = 0,007 \frac{(3,6v)^{1,997}}{R^{0,953}} - 0,021e^{0,408} + 0,028G$	Simulador para una camioneta
Dhahir y Hassan (2015)	Cánada	$a = 0,6853 - 0,02088v_{a85} + 0,020736\Delta v_{85} + 0,0754Z_p - 0,001656Z_p v_{a85} + 0,01368Z_p \Delta v_{85}$	Modelo de umbral de aceleración
Xu <i>et al.</i> (2015)	China	$a = 20,5R^{-0,46} - 0,35$ $R^2 = 0,672$	Modelo para camino bidireccional

Nota: a:aceleración lateral (g); A_i: tolerancia máxima de aceleración lateral (g); v: velocidad (m/s); v_a: velocidad deseada (m/s); (1+K): factor de amplificación de Herrin; k: 11.67E-6; C: curvatura (grados) ; e: peralte (decimal); Γ: aceleración lateral disponible; d: sentido de la curva (1 derecha, 0 izquierda); R: radio (m); ε: factor de suspensión; g: aceleración de gravedad (m/s²); a₀: aceleración lateral según percentil (g); v₀: velocidad según percentil(m/s); v_{a85}: percentil 85 de la velocidad de aproximación (m/s); Z_p: Variable estandarizada de la distribución normal

La Tabla 2.2 muestra diversas variables propuestas para los modelos de aceleración lateral existentes en el estado del arte, con la particularidad que la velocidad está presente en la mayoría de estos modelos, de forma directa o indirecta. Se da a entender que esta variable describe principalmente el fenómeno, sumándose en menor medida el radio de curvatura y el peralte de la curva.

Los modelos de aceleración lateral abarca desde un arreglo matemático que explique lo que se conocía del estado del arte (Herrin *et al.*, 1974), la selección de velocidad en curvas por medio de la aceleración lateral (Reymond, 2001; Bosetti *et al.*, 2015), un análisis de confiabilidad basado en la estabilidad del vehículo y la comodidad del conductor (Dhahir y Hassan, 2015), hasta un criterio para encontrar un diseño de longitud de espiral basado en la tasa de cambio de la aceleración por segundo, o *jerk* (g/s) (Hasan, 2014).

2.7 Conclusiones

En este capítulo se realizó una discusión teórica del concepto de aceleración lateral y la influencia de la velocidad longitudinal. Se concluyó que la aceleración lateral es la forma básica de información del conductor y que, en conjunto con la percepción visual, ayuda a reflejar la sensación de peligro por parte del conductor. Estas conclusiones obtenidas de un estudio empírico fueron la base de diversas investigaciones sobre la elección de velocidad en curvas horizontales, por medio de las aceleraciones laterales.

Los valores de aceleración para la comodidad de los ocupantes del vehículo, identificados en el estado del arte, mostraron que los umbrales de comodidad coinciden en que 0,4 g es el límite entre la conducción cómoda e incómoda. Estos valores sufren modificaciones según el tipo de conductor y la tolerancia de éstos a la aceleración lateral, pues existen algunos conductores que son capaces de negociar una mayor aceleración para alcanzar velocidades mayores, y otros que prefieren evitar valores superiores a 0,2 g.

Los modelos encontrados en la literatura describen la aceleración lateral en términos de variables geométricas y operativas, mostrando una relación directa entre la velocidad y la aceleración lateral, y una relación inversa para el caso del radio de curvatura. Estos resultados se condicen con el modelo físico en ser los principales descriptores de la aceleración lateral.

CAPÍTULO 3 DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En este capítulo se detalla el procedimiento realizado para definir el rango de validez del estudio. Está dividido en dos secciones: en la primera se define el diseño factorial, se realiza una descripción de las variables independientes, se muestra la matriz factorial y se define el tamaño muestral ideal para cada una de las celdas de la matriz; en la segunda y última parte se presentan las conclusiones del capítulo.

3.2 Diseño factorial

Para poder estudiar la interacción entre cada una de las variables explicativas se debe realizar un diseño factorial. Consiste en un método experimental donde se cruzan todos los niveles de las variables explicativas para estudiar la interacción entre ellas. Con esto se busca saber la cantidad mínima de datos requeridos que aseguren la representatividad de la muestra.

La variable dependiente es la aceleración lateral. Las variables independientes se obtuvieron analizando modelos existentes (ver Capítulo 2) y se clasificaron en dos grupos: variables operativas y variables geométricas:

a) **Variables geométricas:** estas variables son las que definen la configuración geométrica del trazado. Dentro de este grupo se encuentran el radio de la curva de entrada (R_1), la longitud de tangente intermedia (L_{ti}) y el radio de la curva de salida (R_2). Para cada una de estas variables se definieron tres niveles de interacción; menor a 200 m, entre 200 y 400 m y superior a 400 m.

b) **Variables operativas:** en este caso se considera una única variable operativa, la velocidad de aproximación en la tangente de entrada V_{te} , debido a su influencia en las curvas sucesivas, pues la operación en la curva de entrada depende de la velocidad en la tangente. Se define como la velocidad de operación en el punto que el conductor inicia la maniobra de deceleración para

ingresar a la primera curva. Se definieron seis niveles de interacción para esta variable; menor a 70 km/h, de 70 a 80 km/h, 80 a 90 km/h, 90 a 100 km/h, 100 a 110 km/h y de 110 a 120 km/h.

3.2.1 Matriz factorial

La matriz factorial (Tabla 3.1) muestra los seis niveles de la variable operativa en las columnas, y las variables geométricas en las filas, con tres niveles cada una. Las variables escogidas para el estudio son las que según la literatura explican el fenómeno de la aceleración lateral. Posee 4 factores, 162 grupos y 40 grados de libertad.

Cada una de las repeticiones será el registro continuo de datos de aceleración lateral que se tiene desde la tangente de entrada en la curva de entrada, hasta el final de la curva de salida.

Tabla 3.1 Matriz factorial

Radio Curva 1 R_1 (m)	Longitud Tangente Intermedia LT (m)	Radio Curva 2 R_2 (m)	Velocidad Tangente de Entrada V_{ap} (km/h)					
			50-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120
0-200	>200	0-200						
		200-400						
		<400						
	201-400	0-200						
		200-400						
		<400						
	<400	0-200						
		200-400						
		<400						
200-400	>200	0-200						
		200-400						
		<400						
	201-400	0-200						
		200-400						
		<400						
	<400	0-200						
		200-400						
		<400						
<400	>200	0-200						
		200-400						
		<400						
	201-400	0-200						
		200-400						
		<400						
	<400	0-200						
		200-400						
		<400						

3.2.2 Tamaño muestral

Para definir el tamaño muestral se utilizó el análisis de potencia propuesto por Cohen (1988), mediante el *software* GPower 3.1.9.2 (Erdfelder *et al.*, 1996). Dicho análisis se realizó considerando una evaluación *a priori* del test F, con un efecto tamaño “medio”, un error probable del 5% y una potencia estadística del 95%. En la Figura 3.1 se observa la potencia estadística en función del tamaño muestral para el experimento realizado. Según los resultados obtenidos en el experimento, y como muestra el gráfico anterior, para el efecto tamaño medio se necesita 668 muestras, las que repartidas homogéneamente en la matriz, lleva a cinco repeticiones por celda, que corresponden al producto entre el número de pasadas por el número de curvas, es decir, para una celda se puede tener cinco pasadas por una misma curva o una pasada en cinco curvas.

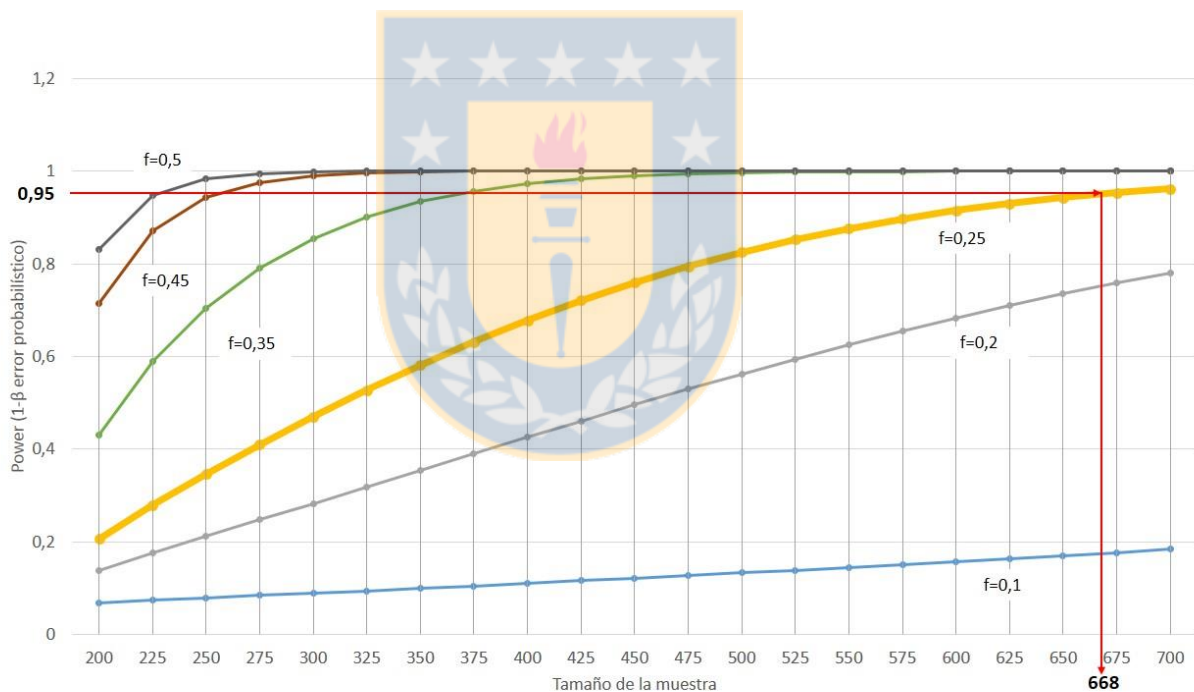


Figura 3.1 Potencia estadística en función del tamaño muestral y del efecto tamaño, para un experimento ANOVA a priori

Es necesario destacar que el resultado entregado por el *software*, llevado a la matriz factorial, es una herramienta teórica que considera todas las posibles interacciones entre las variables, incluso aquellas combinaciones que no son replicables en el diseño, generalmente por restricciones

normativas. Además, los datos utilizados en esta investigación son producto de un trabajo anterior (Echaveguren *et al.*, 2015), por lo que el diseño experimental es sólo una herramienta teórica que permite tener una referencia sobre la potencia estadística ideal.

Por esta razón, no es factible tener datos en todas las celdas de la matriz factorial, ni cumplir a cabalidad lo obtenido en el cálculo del tamaño muestral para todas las celdas. Esto no implica problema alguno para las celdas que son geoméricamente posibles y cuentan con datos, sino que conlleva una falta de conclusiones para las celdas vacías, cuyas combinaciones geométricas no son utilizables empíricamente.

Lo anterior implica que no se podrán emitir conclusiones respecto a las combinaciones geométricas para las que no se tienen datos.

3.3 Conclusiones

En este capítulo se definió el tamaño muestral mínimo necesario para avalar la representatividad de la muestra. El primer paso para esto fue definir las variables independientes del estudio, que se clasificaron en variables geométricas, como el radio de entrada, el radio de salida y la longitud de la tangente intermedia, cada una de estas variables con tres niveles de interacción, y en variables operativas, tal como la velocidad en la tangente de entrada, con seis niveles.

Luego de esto se realizó el diseño experimental, por medio de un *software*, utilizando para esto un error probable del 5%, una potencia estadística del 95% y un efecto tamaño medio, encontrando que 668 observaciones, llevadas a cinco repeticiones por celda es el tamaño muestral ideal que permite garantizar la representatividad de la muestra. Debido a que la investigación se realizó con datos existentes, la matriz factorial es una referencia de la potencia estadística ideal.

CAPÍTULO 4 PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1 Introducción

En este capítulo se describe como se elaboraron las bases de datos para modelar la aceleración lateral. Comienza con una descripción de la base de datos, para continuar con el proceso de obtención de cada uno de sus componentes. Luego muestra las interacciones de los elementos de la base de datos. Posteriormente se muestra la asignación de los datos a la matriz factorial definida en el capítulo anterior. Finalmente, se exhiben las conclusiones del capítulo.

4.2 Configuración de la base de datos

La base de datos de este trabajo consta de 23 C.H.S.I de nueve rutas ubicadas entre las regiones del Maule y del Bio Bío, cuyos registros crudos fueron tomados de Echaveguren *et al.* (2015), de las cuales se extrajeron 563 perfiles de aceleración. Se descartaron 45 perfiles por no cumplir los criterios de representatividad establecidos en el Capítulo 3 (al menos cinco registros en cada celda de la matriz). Las mediciones restantes fueron asignadas a 36 celdas de la matriz factorial. La Figura 4.1 muestra un diagrama que identifica los componentes de las base de datos. Su obtención se detalla en las secciones posteriores.

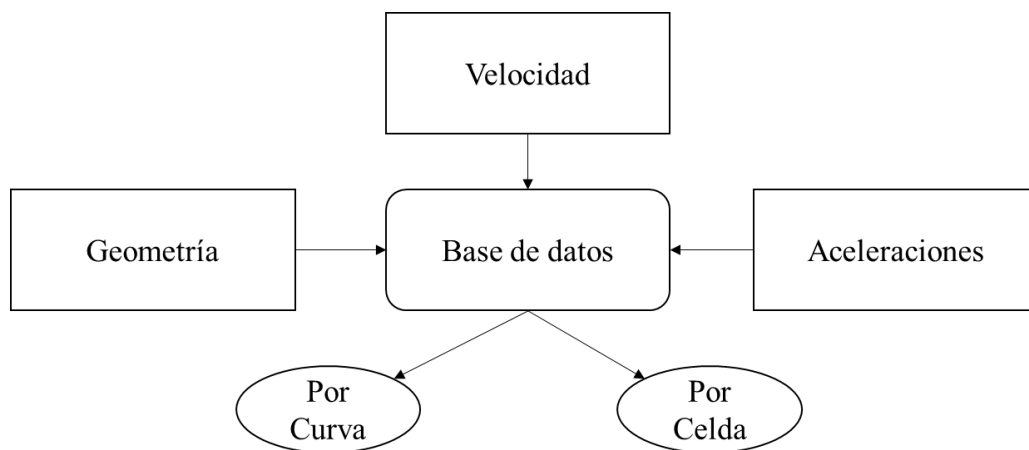


Figura 4.1 Diagrama de la configuración de la base de datos

En el diagrama de la Figura 4.1 se observa la interacción entre los datos existentes de geometría, los datos crudos de velocidad y de aceleración, cuyo proceso se detalla en la sección 4.4, para conformar las bases de datos con el que se realizó el análisis por curva y celda de la matriz factorial.

Cabe destacar que esta investigación se centró en vehículos livianos, en caminos pavimentados, bidireccionales de una pista por sentido y con velocidades de proyecto que fluctúan entre 50 y 120 km/h. En las mediciones de terreno, Echaveguren *et al.* (2015), consideraron el caso de pavimento seco y en buen estado de conservación, conducción diurna, condiciones climáticas favorables, existencia de visibilidad del trazado en toda la curva, condiciones de flujo libre (TMDA menor a 5000 vehículos/día-año), terreno plano (pendiente máxima de un 4%), zona despejada (existencia de visibilidad lateral) y no existencia de señalización y control (no existen límites de velocidad de circulación en las curvas a estudiar), por lo que los resultados de esta investigación serán válidos bajo las mismas condiciones.

En la Figura 4.2 se replicaron los puntos representativos de la trayectoria del vehículo para cada una de las repeticiones, lo que permitió identificar la geometría percibida por cada conductor. Además, se añadieron 15 puntos de interés en la C.H.S.I.: dos en la tangente de entrada, en función de la distancia con el principio de la primera curva, cinco puntos en cada curva, separados cada uno por un cuarto del desarrollo geométrico desde el principio de curva hasta el fin de esta, y 3 puntos en la tangente intermedia.

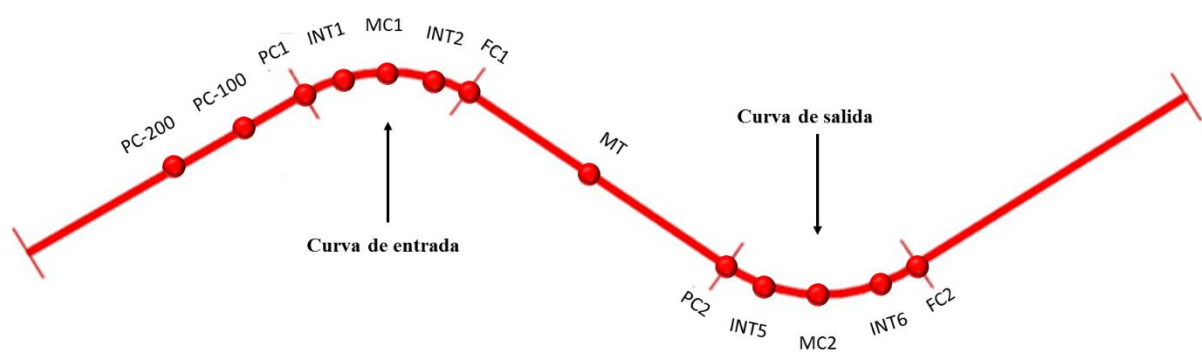


Figura 4.2 Puntos característicos de la C.H.S.I.

4.3 Geometría de las curvas horizontales

La investigación fue realizada con los parámetros geométricos generados por Echaveguren *et al.* (2015) para las 23 C.H.S.I. Los autores reconstituyeron la geometría de las curvas utilizando imágenes satelitales y el *software* AUTOCAD®, con lo que identificaron desarrollos de la curva, radios, ángulos de deflexión, longitud de la tangente intermedia y puntos característicos. Los datos de aceleraciones y velocidades se obtuvieron desde los archivos sin procesar.

Se tienen curvas con radios (R_1 , R_2) entre 190 y 687 m, tangente intermedia (LT) entre 87 y 1341 m, desarrollos de curva (d_1 , d_2) entre 97 y 402 m, ángulos de deflexión (w_1 , w_2) entre 18 y 106 g y peraltes (P) entre 5,4 y 7,3 %. En la Tabla 4.1 se muestra la geometría de todas las curvas usadas en el análisis, asignadas a cada celda de la matriz factorial.

Tabla 4.1 Geometría de las C.H.S.I. (Echaveguren *et al.* 2015)

Celda	N°	R_1 (m)	w_1 (g)	d_1 (m)	P (%)	LT (m)	R_2 (m)	w_2 (g)	d_2 (m)	P (%)
C10-F10	1	457	45,8	329	6,3	677	457	53,3	383	6,3
C10-F10	2	457	53,3	383	6,3	677	457	45,8	329	6,3
B10-F10	3	627	40,9	402	5,6	718	509	46,9	375	6,1
B10-F10	4	509	46,9	375	6,1	718	627	40,9	402	5,6
C9-E9	5	455	29,0	208	6,3	479	222	45,2	158	7,1
B7-D7	6	222	45,2	158	7,1	479	455	29,0	208	6,3
C10-F10	7	488	38,6	296	6,1	971	466	17,7	129	6,2
C10-F10	8	466	17,7	129	6,2	971	488	38,6	296	6,1
B3-F3	9	340	36,3	194	6,5	113	312	43,3	212	6,5
C3-F3	10	312	43,3	212	6,5	113	340	36,3	194	6,5
B4-E4	11	223	106,3	371	7,1	224	193	89,1	270	7,3
B6-C6	12	330	40,8	212	6,4	681	193	89,1	270	7,3
B2-D2	13	193	89,1	270	7,3	224	223	106,3	371	7,1
A1-D1	14	190	47,2	141	7,3	87	190	32,4	97	7,3
A1-E1	15	190	32,4	97	7,3	87	190	47,2	141	7,3
B10-E10	16	687	17,7	191	5,4	1341	687	19,2	207	5,4
C10-F10	17	687	19,2	207	5,4	1341	687	17,7	191	5,4
B10-F10	18	517	47,1	382	6,0	607	676	16,9	179	5,5
B7-D7	19	327	51,9	267	6,4	434	447	41,4	291	6,3
D8-F8	20	402	45,4	286	6,5	177	447	40,9	287	6,3
D5-F5	21	253	59,6	237	6,9	260	357	50,4	283	6,5
B4-E4	22	355	46,4	259	6,5	225	192	77,5	234	7,3
B2-D2	23	192	77,5	234	7,3	225	355	46,4	259	6,5

4.4 Procesamiento de datos de aceleraciones laterales y velocidad

Cada uno de los perfiles de aceleración y velocidad, correspondientes a las 23 curvas de la Tabla 4.1 se procesaron con el *software* VBox Tools (Racelogic, 2008). El trabajo realizado contempló los siguientes pasos:

- i) Se acoplaron las mediciones en tiempo y geometría usando el filtro de Kalman implementado en el *software* VBox Tools. Se eliminaron también las caídas de satélite utilizando la misma herramienta (Racelogic, 2008).
- ii) Las señales se procesaron para generar datos de aceleración lateral y velocidad cada 0,1 s. usando el *software* VBox Tools.

4.4.1 Velocidad de operación

En las Tabla 4.2 se muestra el resumen del cálculo para cada punto característico separado por curva, mientras que en la Tabla 4.3 presenta la velocidad percentil 85 por celda de la matriz factorial. Esta última contiene valores menores de velocidad que pasan desapercibidos en la Tabla 4.2 debido al agrupamiento de datos.

Tabla 4.2 Velocidad de percentil 85 por curva

Curva	PC1	MC1	FC1	MT	PC2	MC2	FC2
1	99,36	94,06	106,15	105,66	105,87	104,00	107,46
2	105,94	98,32	109,13	114,27	111,07	105,96	105,95
3	110,65	108,88	113,75	119,69	113,35	109,98	112,89
4	103,39	101,12	108,38	112,61	109,71	107,80	106,31
5	96,58	93,77	95,03	106,44	96,87	92,80	98,90
6	90,80	92,48	99,41	104,96	97,26	95,01	98,04
7	106,14	106,08	109,71	106,86	104,98	101,66	101,83
8	104,56	102,84	105,58	113,66	108,85	104,33	109,07
9	104,63	97,71	103,45	104,26	104,85	95,53	100,04
10	104,49	96,34	100,18	102,01	99,91	92,81	101,87
11	90,69	82,47	88,63	87,35	80,44	78,75	86,57
12	83,99	81,12	78,60	93,55	84,88	83,75	80,37

Curva	PC1	MC1	FC1	MT	PC2	MC2	FC2
13	86,19	83,14	81,76	85,59	86,65	86,16	92,51
14	79,88	74,76	77,01	76,19	74,77	73,45	83,32
15	95,05	90,64	90,84	89,34	86,95	80,60	87,98
16	106,00	108,37	108,96	108,25	109,53	109,62	111,82
17	107,05	108,36	112,28	108,35	107,96	109,95	108,82
18	107,03	100,61	98,11	101,57	103,19	101,42	100,60
19	103,07	104,50	112,23	114,09	116,78	103,68	104,73
20	103,91	98,42	103,78	104,92	104,08	103,41	99,88
21	103,48	96,32	96,75	98,29	97,18	92,18	92,30
22	101,51	99,16	100,57	101,36	101,78	96,33	92,64
23	93,73	87,10	91,42	93,11	93,18	90,44	91,00

Se observa de la Tabla 4.2 que: la curva 14 es la única donde la velocidad de operación se encuentra bajo 80 km/h, en dos curvas se registra una velocidad de operación entre 80 y 90 km/h y en seis curvas, V85 oscila entre 90 y 100 km/h. En el resto de las curvas la velocidad de operación supera los 100 km/h.

Tabla 4.3 Velocidad de percentil 85 por celda de la matriz factorial

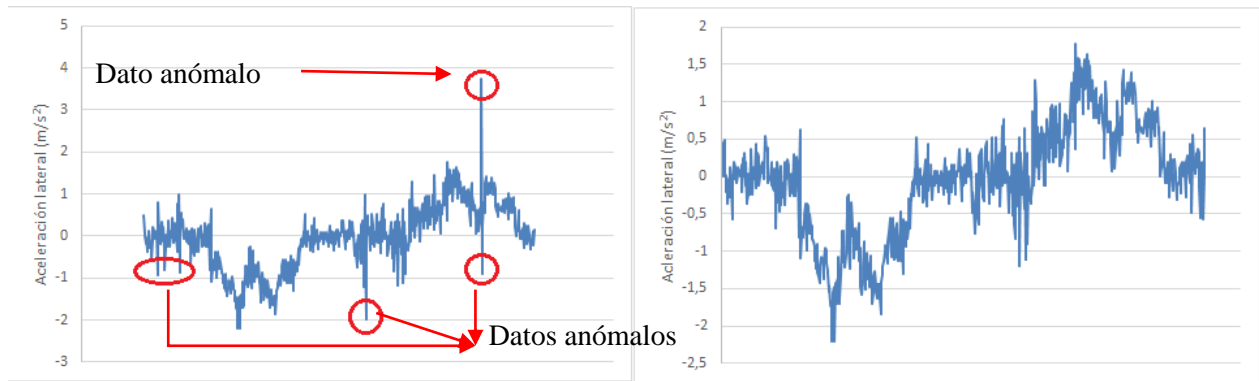
Celda	PC1	MC1	FC1	MT	PC2	MC2	FC2
A1	68,00	64,51	64,51	59,89	64,46	66,33	71,06
B1	74,58	71,43	73,33	72,16	71,28	70,46	75,14
C1	80,09	77,61	77,80	76,55	75,29	73,10	81,56
D1	93,69	88,38	87,14	89,24	85,49	79,31	87,47
E1	97,36	91,17	92,05	88,70	86,81	80,21	87,39
B2	82,37	82,62	79,36	81,14	82,04	84,42	86,84
C2	86,66	83,97	86,10	87,30	87,29	88,61	92,03
D2	92,74	85,75	89,87	89,72	90,07	87,89	92,59
B3	78,39	79,28	76,86	74,50	77,51	72,54	73,53
C3	87,08	85,17	87,15	88,13	87,82	83,80	85,48
D3	94,44	88,37	90,85	92,06	92,13	87,44	89,23
E3	97,92	92,32	97,74	98,49	97,95	90,88	98,96
F3	109,00	98,87	106,77	106,91	106,91	97,31	102,45
B4	81,35	81,74	78,35	77,80	77,90	72,67	73,56
C4	86,09	84,53	84,72	84,40	83,65	81,78	79,39
D4	94,18	92,28	91,65	91,69	91,47	87,20	86,64
E4	101,51	99,16	100,52	101,29	101,76	96,33	92,63
D5	94,10	89,64	88,25	90,33	91,67	94,96	93,47
E5	100,04	94,25	94,69	95,14	92,73	91,63	91,65
F5	105,86	97,00	97,23	100,54	100,47	96,49	97,38

Celda	PC1	MC1	FC1	MT	PC2	MC2	FC2
B6	79,03	75,72	73,38	89,12	85,91	81,73	77,63
C6	83,63	80,85	77,83	92,79	84,52	83,25	81,46
B7	85,56	88,54	94,07	101,68	92,05	88,88	90,92
C7	90,85	93,49	99,15	103,39	94,21	94,53	97,77
D7	102,97	104,36	111,94	114,06	116,75	103,57	104,22
D8	92,97	88,08	89,49	90,54	90,93	88,68	86,47
E8	98,18	95,06	96,36	96,20	96,10	102,98	94,39
F8	115,03	112,81	111,61	112,31	112,73	110,50	110,34
C9	86,81	87,68	91,52	102,58	93,95	91,53	96,93
D9	94,64	92,03	94,78	106,42	95,98	91,37	97,13
E9	98,57	97,21	99,68	106,47	99,76	94,62	99,02
B10	94,38	100,56	99,97	99,23	103,97	99,22	98,63
C10	91,97	93,24	94,32	94,85	93,79	91,75	90,79
D10	99,02	100,21	102,05	103,95	102,95	100,47	98,07
E10	104,56	103,34	106,23	109,14	105,79	102,65	104,72
F10	110,58	109,29	115,16	121,60	114,59	110,88	113,41

En la Tabla 4.3 se observan velocidades de operación menores y mayores a las de la Tabla 4.2. Esto se debe a que en el análisis por celda de la matriz factorial se segmenta por velocidad de aproximación, y esta influencia la velocidad de operación.

4.4.2 Tratamiento de los datos

Se observa la existencia de puntos anómalos en los registros de aceleraciones que pueden llevar a errores en la caracterización estadística. En la parte izquierda de la Figura 4.3 se muestran los valores de la aceleración lateral obtenidos para la repetición 92 de la curva 20, donde se marcan los puntos anómalos. En el lado derecho de la Figura 4.3 se observa el registro de aceleración sin esos puntos anómalos. Éstos se reemplazan por el promedio simple de los puntos adyacentes. Este proceso se repitió en cada una de las 518 repeticiones, con el fin de producir una base de datos limpia para la caracterización estadística y modelación.



a) Señal de aceleración con datos anómalos b) Señal de aceleración con datos reemplazados

Figura 4.3 Ejemplo de identificación de datos anómalos

4.4.3 Agrupamiento de los datos

En cada uno de los puntos seleccionados para el análisis (Figura 4.2) se agruparon datos de aceleración lateral para acrecentar el número de registros. Esto se hizo considerando una vecindad de 10 datos al lado de cada punto característico, logrando una muestra de 21 registros por cada punto en cada repetición. Considerando una velocidad de circulación media para el trabajo, de 90 km/h, y que los datos fueron tomados cada 0,1 s, se obtiene que los 21 registros se encuentran en un intervalo de 52,5 m. La multiplicación de esos 21 datos por el número de registros de aceleración permitió obtener el número de datos N en cada uno de los puntos de interés. Esto permite aumentar el tamaño de la base de datos y obtener un tamaño muestral que permita caracterizar la distribución de frecuencias en cada punto discreto y realizar distintos análisis estadísticos.

Cabe destacar que el agrupamiento de datos en torno a cada punto de interés está basado en un análisis gráfico, en que se verificó que la distribución de probabilidades de la velocidad en el intervalo es aproximadamente uniforme.

4.5 Base de datos configurada

Luego de contar con los datos necesarios para la investigación fue posible configurar las bases de datos con 518 registros y 35 campos. En la Figura 4.4 se observa una parte de la base de datos por curva, en la que se muestran las variables operativas y geométricas.

Curva	Rep	Vap (km/h)	Lt (m)	Radio 1 (m)	Radio 2 (m)	R1/R2	w1 (grad)	d1 (m)	w2 (grad)	d2 (m)	a PC-200 (m/s ²)	a PC-100 (m/s ²)	a PC1 (m/s ²)	V85 PC1 (m/s)	a INT1 (m/s ²)	V85 INT1 (m/s)
4.1.1.1	3	98,32	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,980	1,200	0,880	75,670	2,100	72,790
4.1.1.1	7	95,39	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,780	0,830	0,970	92,104	3,000	88,630
4.1.1.1	9	81,54	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,500	0,870	0,880	79,190	2,110	77,390
4.1.1.1	11	104,19	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,980	0,850	0,710	91,740	2,590	89,850
4.1.1.1	13	104,47	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,300	0,860	1,250	100,048	2,360	93,490
4.1.1.1	17	105,87	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,500	0,620	0,810	93,040	2,870	94,710
4.1.1.1	21	85,01	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,660	0,540	1,040	86,180	2,270	86,620
4.1.1.1	23	96,51	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,740	1,020	1,430	95,348	2,810	95,170
4.1.1.1	25	95,31	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,540	1,330	1,850	91,380	2,300	88,900
4.1.1.1	29	92,3	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	2,250	1,610	1,510	91,660	2,860	88,060
4.1.1.1	31	114,12	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	1,490	1,100	1,790	102,695	2,520	91,970
4.1.1.1	33	101,2	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,930	1,460	1,200	99,182	2,870	94,250
4.1.1.1	35	112,32	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	0,540	1,280	1,790	102,487	2,830	93,500
4.1.1.1	37	86,14	677,4	456,96	456,96	1,00	45,78	328,60	53,33	382,84	1,870	1,450	1,110	85,330	2,460	84,940
7.1.1.2	4	102,34	677,4	456,96	456,96	1,00	53,33	382,80	45,78	328,60	0,400	0,560	1,250	104,325	2,600	96,520
7.1.1.2	6	98,43	677,4	456,96	456,96	1,00	53,33	382,80	45,78	328,60	0,570	0,370	1,740	94,616	2,380	91,310
7.1.1.2	8	93,21	677,4	456,96	456,96	1,00	53,33	382,80	45,78	328,60	0,520	0,410	0,730	94,411	2,380	94,570
7.1.1.2	10	87,21	677,4	456,96	456,96	1,00	53,33	382,80	45,78	328,60	0,620	0,630	0,360	82,610	1,560	84,480
7.1.1.2	12	92	677,4	456,96	456,96	1,00	53,33	382,80	45,78	328,60	0,360	0,400	0,480	90,950	1,830	88,350

Variables Geométricas

Variables Operativas

Figura 4.4 Extracto de la base de datos por curva

Las variables geométricas, como los radios, ángulos de deflexión, desarrollos de curva y longitud de tangente intermedia, se muestran en la orilla izquierda de la figura, encerradas en rojo. El lado derecho de la Figura 4.4 muestra las variables operativas (aceleración y velocidad percentil 85) para cada punto característico de la curva.

4.6 Asignación de datos en la matriz factorial

Una vez definidas las variables operativas y geométricas, para cada repetición de la base de datos, se asignaron las mediciones a la matriz factorial. Esto se muestra en la Tabla 4.4. La matriz factorial muestra 518 repeticiones, de las 563 medidas originalmente, repartidas en 36 de las 162 celdas. Esta diferencia en el número de repeticiones se debe a que según los resultados del diseño experimental del Capítulo 3, todas las celdas con menos de cinco registros no fueron consideradas en el análisis.

Tabla 4.4 Matriz factorial con asignación de mediciones

R ₁ (m)	LT (m)	R ₂ (m)	Vap (km/h)						Fila
			50-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	
0-200	>200	0-200	8	15	16	12	10	(-)	1
		200-400						(-)	
		<400						(-)	
	201-400	0-200						(-)	
		200-400	X	13	17	20	X	(-)	2
		<400						(-)	
	<400	0-200						(-)	
		200-400						(-)	
		<400						(-)	
200-400	>200	0-200							
		200-400	X	12	11	17	14	5	3
		<400							
	201-400	0-200		5	8	19	14	X	4
		200-400		X	X	6	6	7	5
		<400							
	<400	0-200	X	9	18	X			6
		200-400							
		<400		5	18	15			7
<400	>200	0-200	(-)						
		200-400	(-)						
		<400	(-)	X	X	5	6	5	8
	201-400	0-200	(-)						
		200-400	(-)						
		<400	(-)						
	<400	0-200	(-)						
		200-400	(-)	X	5	9	5	X	9
		<400	X	7	23	69	53	31	10
Columna			A	B	C	D	E	F	

En la Tabla 4.4, las columnas se denotan por letras y las filas por números. Por ejemplo, la celda A-1 es la primera de la matriz, en la que se encuentran 8 perfiles de aceleración correspondientes a dos curvas, y la celda F-10 es la última, ubicada en la esquina inferior derecha. Esta notación se utiliza en capítulos posteriores.

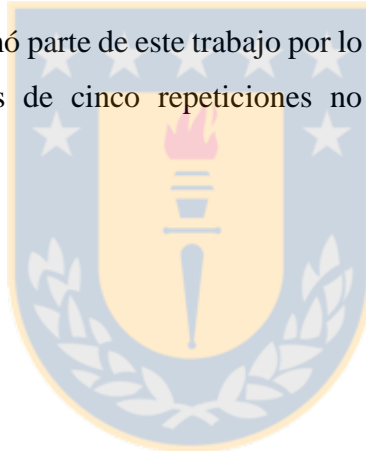
Las celdas marcadas con una “X”, fueron descartadas del análisis debido a su baja representatividad, pues poseen menos de cinco registros, y las celdas que contienen un “(-)” corresponden a combinaciones poco factibles de encontrar en terreno, por restricciones operativas o de diseño. Por ejemplo, encontrar velocidades de aproximación de menos de 70 km/h en curvas con radio mayor a 400 m. Las celdas vacías corresponden a configuraciones geométricas factibles que no fueron encontradas en terreno durante las mediciones de Echaveguren *et al.* (2015).

4.7 Conclusiones

En este capítulo se describió la conformación de las bases de datos utilizadas en el análisis estadístico curva a curva y por celda de la matriz factorial.

La base de datos contiene curvas con radios entre 190 y 687 m, tangente intermedia entre 87 y 1341 m, desarrollos de curva entre 97 y 402 m, ángulos de deflexión entre 18 y 106 g y peraltes entre 5,4 y 7,3 %. Se encontraron velocidades de aproximación entre 59 y 119 km/h y velocidades de operación entre 60 y 121 km/h.

Se observa que los datos existentes se distribuyen en 10 de las 27 filas de la matriz factorial, con la mayor cantidad de repeticiones en la combinación de radios amplios con tangente intermedia larga. La toma de datos no formó parte de este trabajo por lo que no se completó la matriz factorial, y para las celdas con menos de cinco repeticiones no será posible entregar resultados ni conclusiones.



CAPÍTULO 5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ACELERACIONES LATERALES

5.1 Introducción

En este capítulo se muestran los análisis estadísticos de la aceleración lateral realizados en la investigación. La primera parte describe la metodología utilizada en la caracterización estadística, se analiza la distribución de probabilidades y la relación de los parámetros de la distribución con la geometría de la curva. Posteriormente se estudian los percentiles de aceleración. Finalmente, se entregan las conclusiones del capítulo.

5.2 Procedimiento para el análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico se utilizó el *software* EasyFit® v5.5, el que permite ajustar cerca de 50 distribuciones de probabilidad continuas y discretas y calcular la bondad de ajuste mediante las pruebas estadísticas de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi-Cuadrado (MathWave, 2010). En el Anexo 5.1 se muestran las distribuciones de probabilidad y los test de bondad de ajuste utilizados por el *software*.

En el Anexo 5.2 se listan las cuatro distribuciones con mejor resultado en la prueba estadística de Anderson-Darling en cada uno de los puntos característicos que se muestran en la Figura 5.1. Luego, se ajustó una distribución única para todos los puntos, escogiendo la distribución Burr de cuatro parámetros (Burr 4P), puesto que entregó mejores resultados en la prueba estadística utilizada.

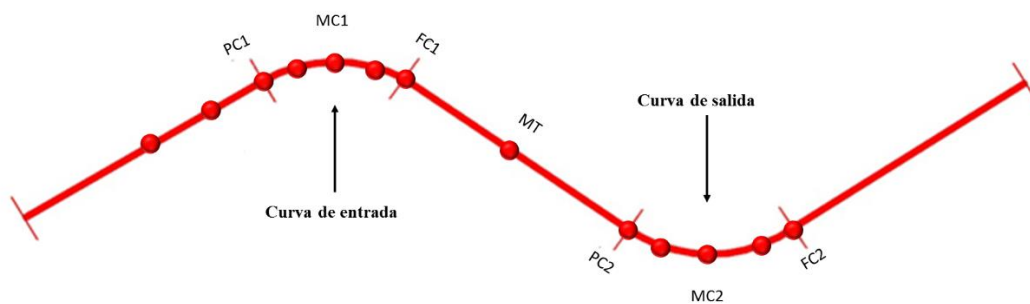


Figura 5.1 Puntos característicos de la C.H.S.I

La distribución Burr, también conocida como Burr Tipo XII o distribución Singh-Madala, es una generalización de la distribución de Pearson, perteneciente a la familia de las log-logísticas, cuyas variables aleatorias son no negativas (Burr, 1942; Singhi y Madala, 1976). La función de densidad de probabilidad de la distribución Burr 4P, se muestra en la Ecuación 5.1.

$$f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{k+1}}, \quad (5.1)$$

donde k y α son los parámetros de forma ($k, \alpha > 0$), β es el parámetro de escala ($\beta > 0$), γ es el parámetro de localización ($-\infty < \gamma < +\infty$) y x es la variable aleatoria continua ($\gamma \leq x < +\infty$).

Para una distribución Burr de cuatro parámetros, la media, μ , y la varianza, σ^2 , quedan definidas por las Ecuaciones 5.2 y 5.3, respectivamente. Dichas ecuaciones no tienen solución analítica por lo que los cálculos de la media y la varianza se realizaron en el *software* EasyFit 5.5 (Mathwave, 2010).

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{k+1}} dx, \quad (5.2)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-\mu)^2 \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{k+1}} dx, \quad (5.3)$$

donde k, α, β, γ son los parámetros de la distribución Burr y x es una variable aleatoria continua.

En la Figura 5.2 se muestran las distintas funciones densidad de probabilidades para una curva con tangente corta (87 m) y en la Figura 5.3 se presentan las funciones para una curva con tangente larga (1341 m). Ambas curvas tienen relación de radio de entrada y salida igual a uno ($R_1/R_2=1$). En cada función de densidad de probabilidades se muestra el coeficiente de asimetría asociado.

En la Figura 5.2 se aprecia que la distribución de probabilidades tiende a una ligera asimetría, acentuándose en los finales de curva. En los principios de curva la distribución es simétrica, centrada en el cero y con una curtosis mayor que en la mitad de curva. La tangente intermedia de esta curva es corta, por lo que la distribución es una transición entre el final de curva 1 y el principio de curva 2, lo que provoca una mayor varianza en los valores de aceleración lateral, pero de igual forma se mantiene centrada cerca de cero. Para los finales de curva se observa que la distribución tiende a desplazarse hacia el lado contrario del sentido de la curva, centrado en el cero, pero con colas asimétricas cargadas hacia el sentido de la curva.

En el caso de la Figura 5.3, se observa el mismo fenómeno en todos los puntos, excepto en la tangente intermedia, donde la mayoría de las aceleraciones se encuentran cercanas al cero. Ésto se debería al largo de la tangente intermedia, según el que se puede inferir que las curvas son independientes y el conductor realiza ajustes de trayectoria en la tangente.



Figura 5.2 FDP en puntos característicos de una curva con radios de 191 m y longitud de tangente intermedia 87 m

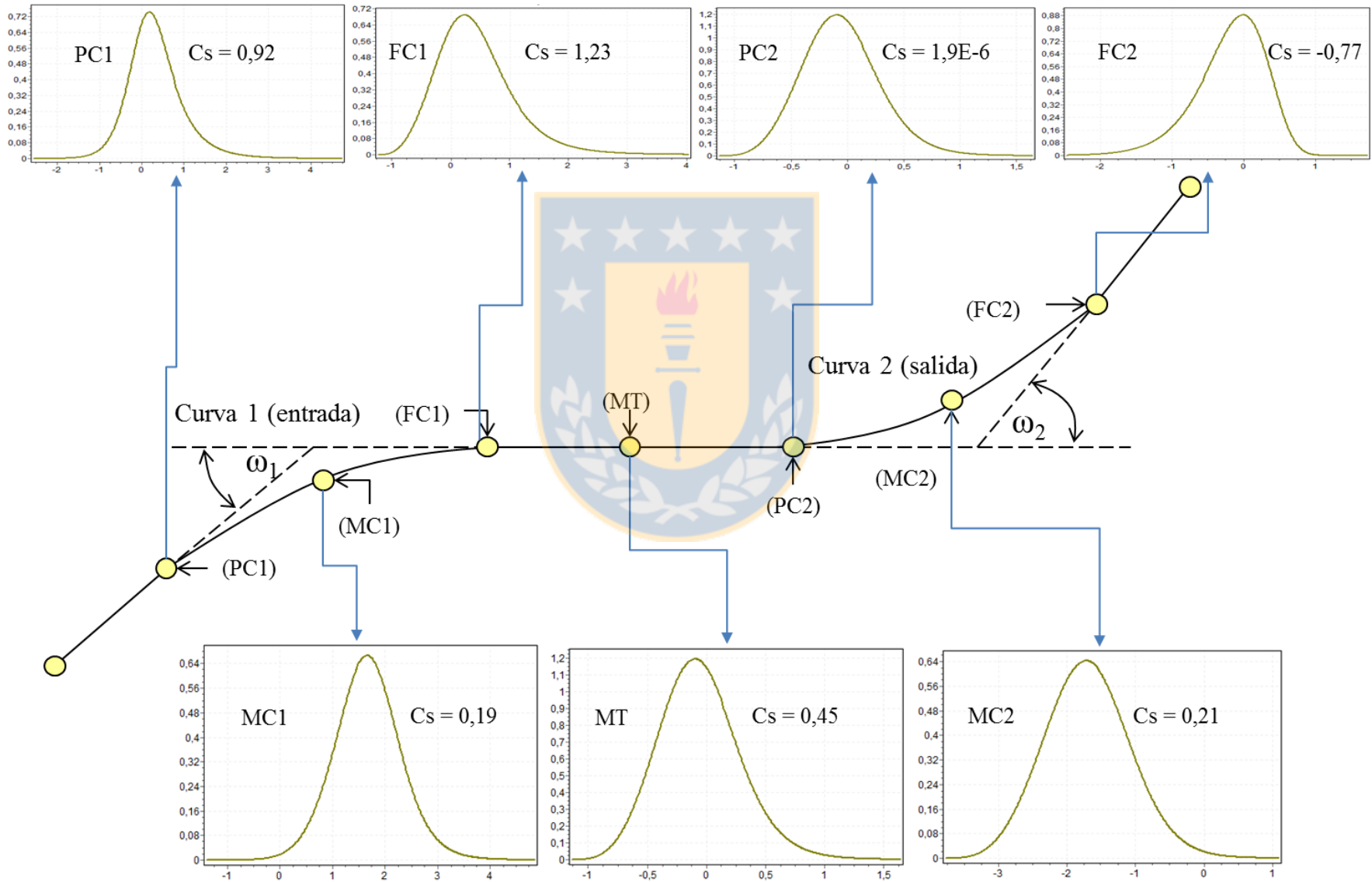
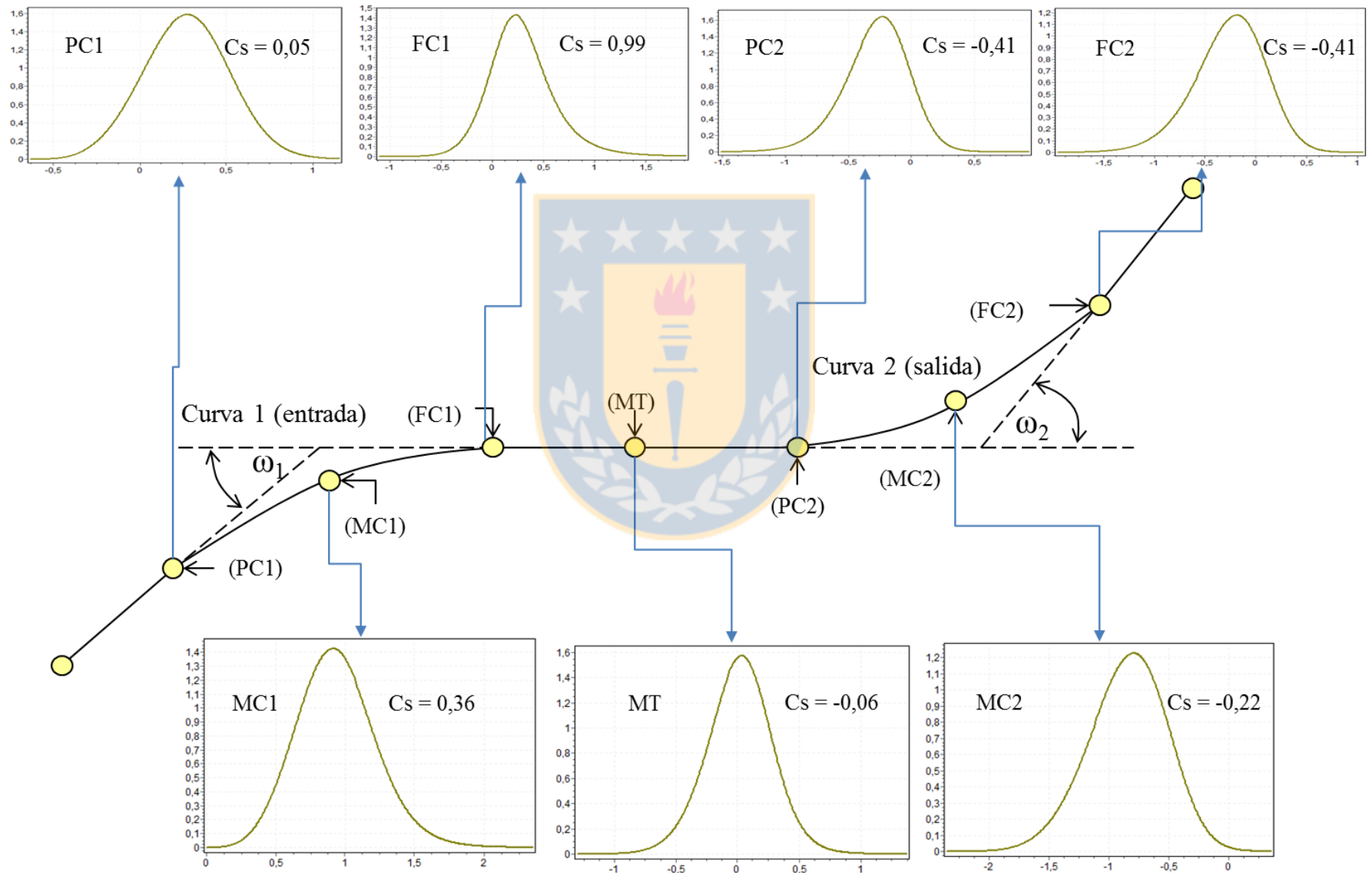


Figura 5.3 FDP en los puntos característicos de una curva con radios de 687 m y longitud de tangente intermedia 1341 m



5.3 Análisis de correlaciones

Se realizó un análisis de correlación tanto para los parámetros de la distribución Burr como para la media y varianza de la muestra, utilizando el software Minitab ® (Minitab Inc, 2007), con el objetivo de estudiar el efecto de las variables geométricas y operativas de las curvas en el valor de los coeficientes, la media y la varianza de la distribución Burr 4P.

El análisis de correlación entre los parámetros y las variables operativas y geométricas se realizó considerando para cada punto característico la matriz de correlación entre cada una de las variables que describe a la curva y los parámetros de la distribución. En la Tabla 5.1 se muestran las correlaciones de k , α , β y γ con las variables geométricas y operativas de las curvas, relacionando las variables de la curva de entrada y la tangente intermedia con los puntos PC1, MC1 y FC1 (ver Figura 5.1), y las variables relativas a la curva de salida con los puntos PC2, MC2 y FC2 (ver Figura 5.1). Los puntos destacados corresponden a correlaciones mayores al 35%.

Tabla 5.1 Correlación de los parámetros de la distribución con las variables operativas y geométricas

Elemento geométrico	Parámetro Variable	k			α			β			γ		
		PCi	MCi	FCi	PCi	MCi	FCi	PCi	MCi	FCi	PCi	MCi	FCi
Curva de entrada	v_{ap}	-0,05	0,07	-0,12	-0,01	0,10	0,17	0,00	0,16	0,17	0,00	-0,03	-0,17
	R_1	-0,07	-0,02	-0,22	-0,20	-0,24	0,06	-0,22	-0,35	0,03	0,22	0,60	-0,03
	W_1	-0,22	-0,18	0,14	0,41	0,19	-0,01	0,49	0,13	0,00	-0,49	-0,41	0,00
	D_1	-0,29	-0,14	-0,05	0,21	0,01	0,18	0,25	-0,11	0,15	-0,25	0,16	-0,15
	$1/R_1$	0,03	-0,11	0,15	0,13	0,17	-0,15	0,17	0,23	-0,13	-0,17	-0,51	0,13
	$1/W_1$	0,14	0,12	-0,19	-0,26	-0,25	-0,11	-0,29	-0,23	-0,12	0,29	0,44	0,12
	$1/D_1$	0,28	0,12	-0,04	-0,21	-0,09	-0,20	-0,23	0,08	-0,18	0,23	-0,06	0,18
Tangente intermedia	LT_i	-0,07	-0,15	-0,13	-0,13	-0,24	-0,10	-0,15	-0,41	-0,16	0,15	0,63	0,16
	$1/LT_i$	-0,03	0,14	-0,08	-0,06	0,09	-0,01	-0,04	0,29	0,05	0,04	-0,37	-0,05
Curva de salida	R_2	-0,21	-0,03	-0,23	0,00	0,47	-0,11	0,01	0,45	-0,11	-0,01	-0,46	0,11
	W_2	0,01	0,11	0,38	-0,04	-0,22	-0,04	-0,07	-0,20	-0,04	0,07	0,20	0,04
	D_2	-0,17	0,22	0,16	0,04	0,19	-0,11	0,03	0,23	-0,11	-0,03	-0,23	0,11
	$1/R_2$	0,28	0,00	0,27	0,01	-0,33	0,01	0,01	-0,33	0,01	-0,01	0,33	-0,01
	$1/W_2$	-0,11	-0,20	-0,27	-0,06	0,27	-0,06	-0,05	0,23	-0,06	-0,05	-0,23	0,06
	$1/D_2$	0,20	-0,22	-0,16	0,02	-0,11	0,02	0,07	-0,14	0,02	-0,07	0,14	-0,02

Se observa que para el parámetro k no existen correlaciones mayores al 38%, que se da en el punto FC2 respecto a la variable W_2 . Para los parámetros α y β se observan de igual forma algunos valores que detectan correlación del parámetro W_1 con el principio de curva, con valores cercanos al 50%.

Del mismo modo se observa que para estos mismos parámetros, R_2 tiene una correlación cercana al 45%. En el caso del parámetro γ , se observa una fuerte correlación de las variables geométricas R_1 , W_1 , sus inversas y la longitud de tangente intermedia para la mitad de curva, con valores que llegan incluso a un 63%.

Por su parte, el análisis de correlación entre los parámetros de la curva y la media y varianza de la distribución, se realizó con el objetivo de encontrar una posible relación entre las variables operativas y geométricas con los valores de la media y la varianza. Los análisis de correlación para la media y la varianza se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Correlación de la media y la varianza de la aceleración lateral con las variables geométricas y operativas

Variable	μ_{PC1}	σ^2_{PC1}	μ_{MC1}	σ^2_{MC1}	μ_{FC1}	σ^2_{FC1}
v_{te}	0,013	-0,141	0,049	-0,095	0,009	-0,047
R_1	0,589	-0,572	0,651	-0,641	0,556	-0,225
LT_i	0,688	-0,424	0,670	-0,721	0,708	-0,318
W_1	-0,395	0,160	-0,448	0,346	-0,480	0,241
D_1	0,189	-0,379	0,264	-0,119	0,018	0,041

Según se observa en la Tabla 5.2, la velocidad de aproximación no posee correlación con la media ni la varianza en ningún punto de la curva. El radio de la curva posee una correlación positiva para todos los puntos de la curva respecto a la media, llegando al 65% en el punto MC1. La varianza respecto al radio, posee también una alta correlación negativa en los puntos PC1 y MC1. Esto quiere decir que mientras mayor sea el radio, menor será la variabilidad entre los datos.

Para la longitud de tangente intermedia se observan los mismos resultados que para R_1 , pero con correlaciones aún mayores, del orden del 70%. En el caso del ángulo de deflexión se observan correlaciones negativas con la media, entre 40 y 48% y positivas para la varianza, pero solo entre

16 y 35%. Finalmente para el desarrollo de la curva no se ven correlaciones mayores al 27% en el caso de la media.

De estos resultados se puede interpretar que la aceleración media a lo largo de toda la curva de entrada depende del radio de la curva y la longitud de la tangente intermedia. Los valores de varianza indican que existen valores de aceleración muy distintos entre sí en todos los puntos de la curva.

5.4 Análisis de percentiles

Para realizar el análisis de percentiles, se calcularon los parámetros de la Ecuación 5.1 y se agregaron a la base de datos conformada en el Capítulo 4. De manera de representar el comportamiento de los conductores se calcularon los percentiles 50, 85 y 99. Se agregaron además los percentiles 70, 90 y 95 como puntos intermedios entre los mencionados anteriormente. Este análisis se realizó para cada celda de la matriz factorial de la sección 4.5 y para cada curva de la base de datos.

En las Figuras 5.4 a 5.9 se muestran los percentiles 50, 70, 85, 90, 95 y 99 para los puntos medios de la curva de entrada, de la curva de salida y para la mitad de la tangente intermedia. Cada uno de los puntos del eje coordinado de las Figuras 5.4 a 5.6 representa una curva de la base de datos, mientras que para las Figuras 5.7 a 5.9 estos puntos representan las celdas de la matriz factorial. Las 6 series de datos que se observan en los gráficos corresponden a cada uno de los percentiles estudiados. El eje de las ordenadas muestra el valor de la aceleración lateral en g, para cada uno de los percentiles.

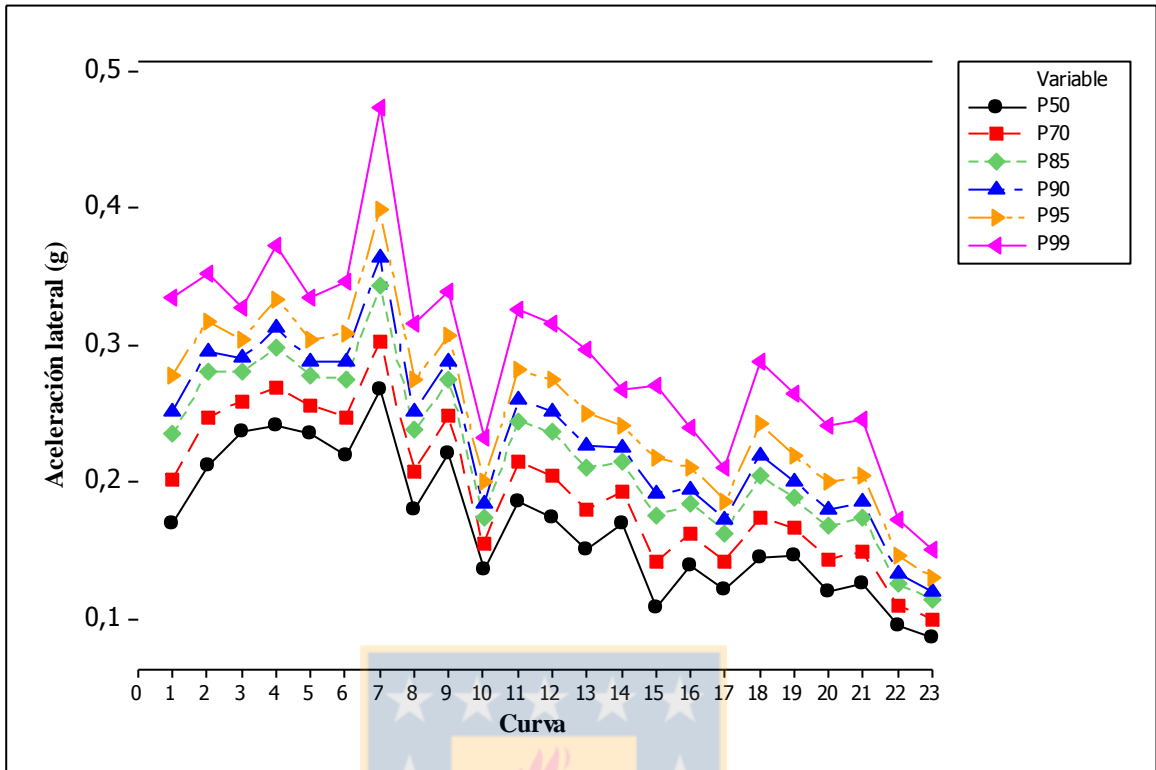


Figura 5.4 Percentiles de aceleración para la mitad de la curva de entrada en cada curva

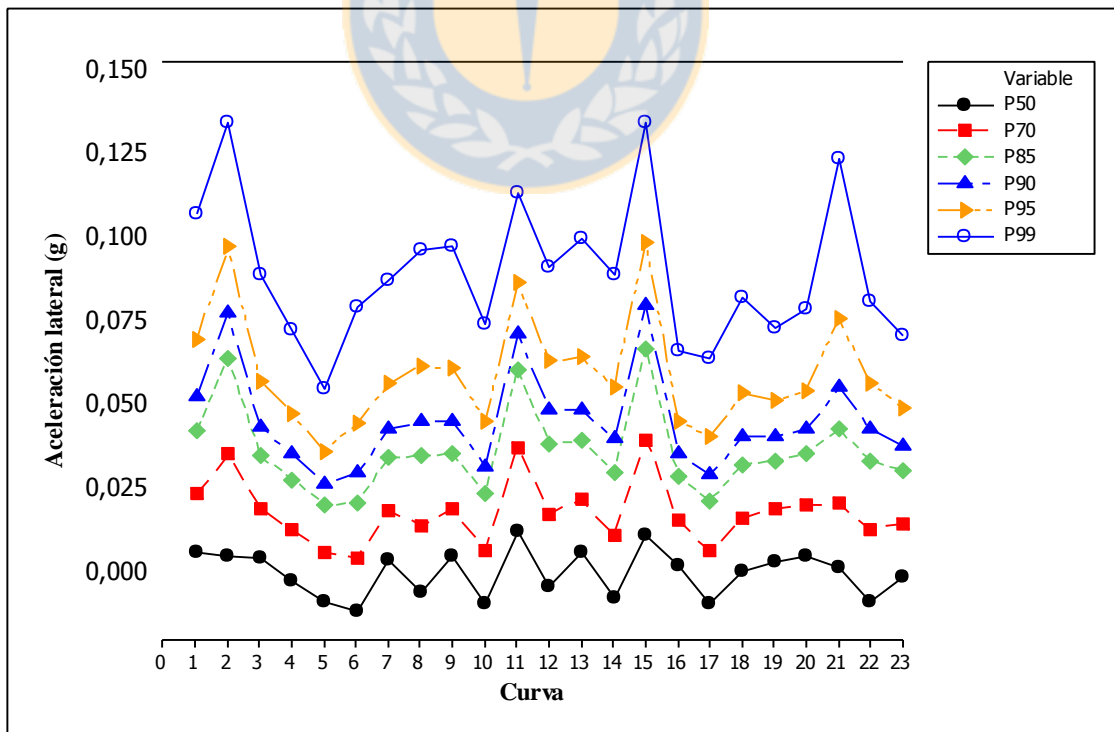


Figura 5.5 Percentiles de aceleración para la mitad de tangente en cada curva

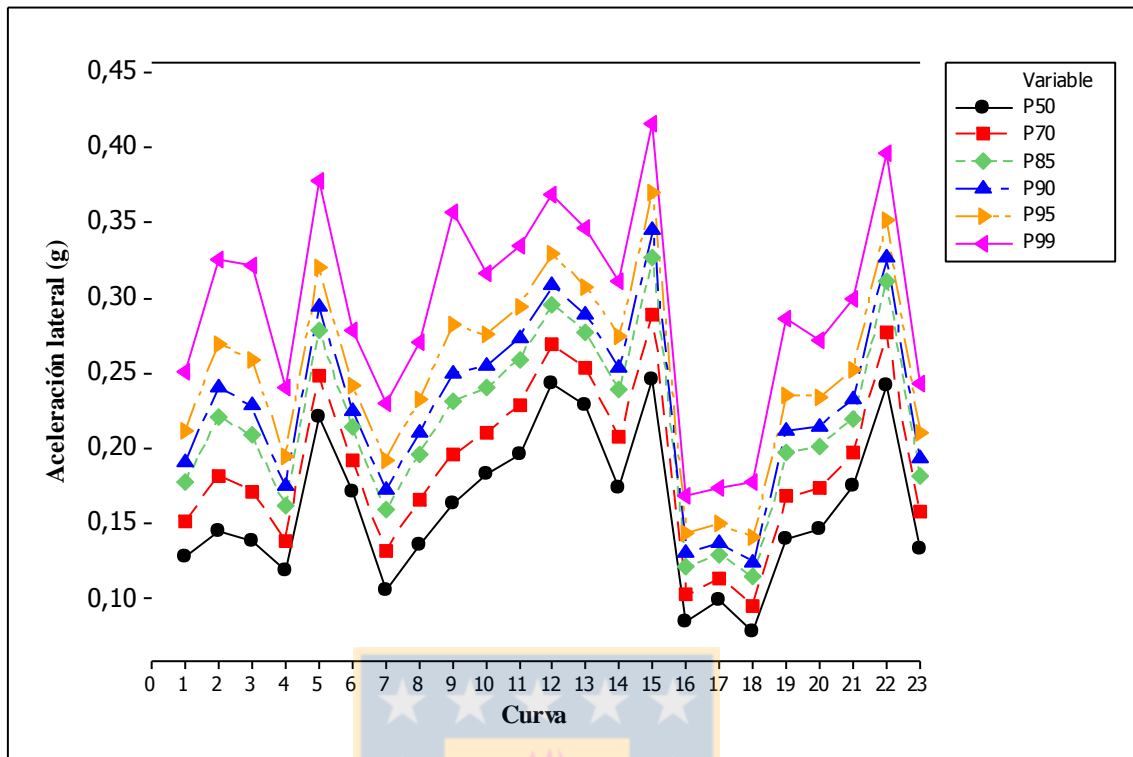


Figura 5.6 Percentiles de aceleración para la mitad de la curva de salida en cada curva

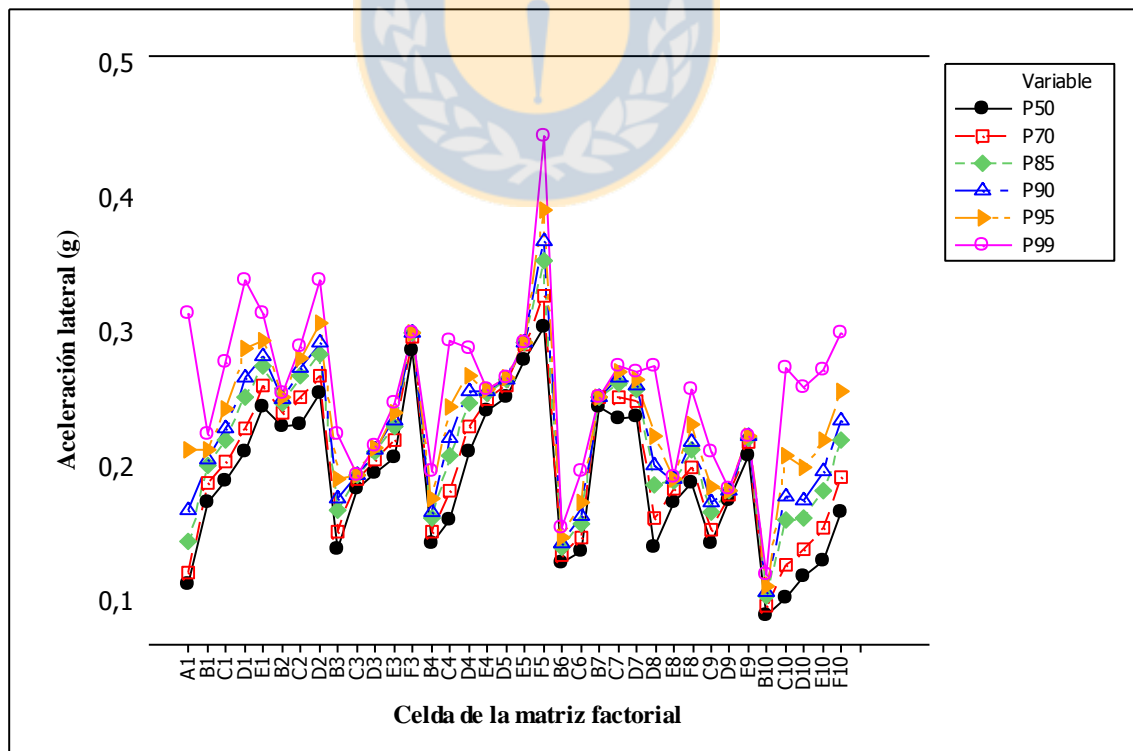


Figura 5.7 Percentiles de aceleración de la mitad de la curva de entrada por celda de la matriz factorial

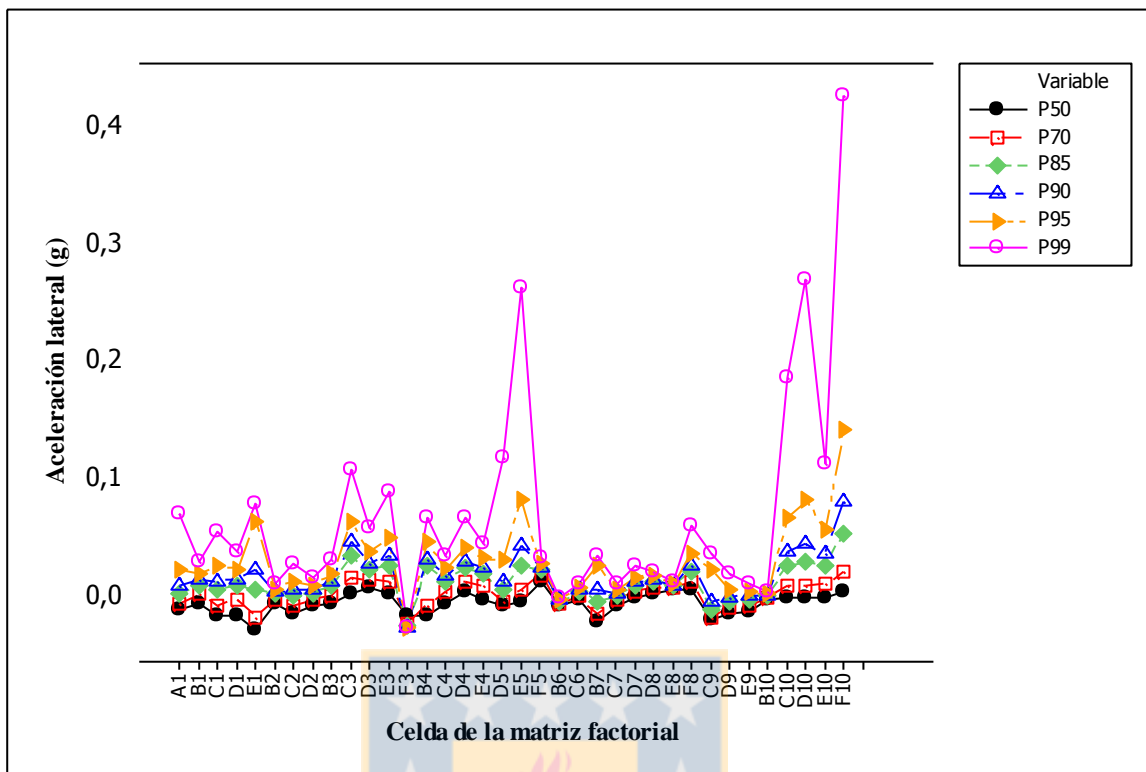


Figura 5.8 Percentiles de aceleración de la mitad tangente por celda de la matriz factorial

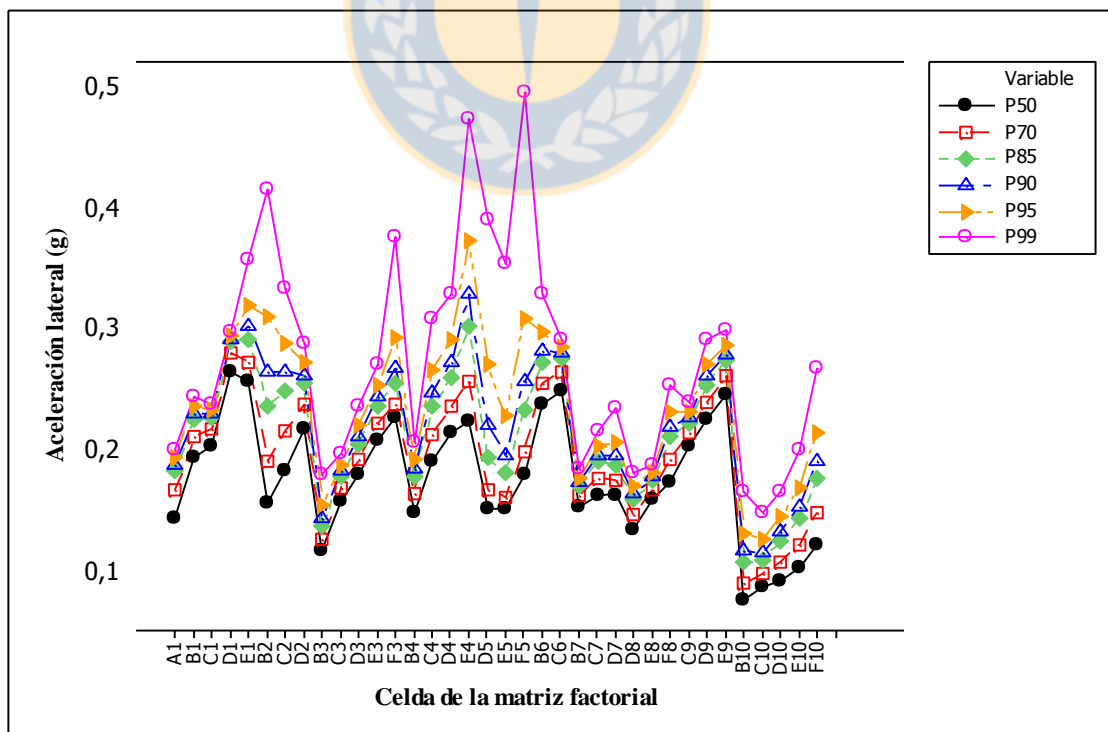


Figura 5.9 Percentiles de aceleración de la mitad de la curva de salida por celda de la matriz factorial

Las Figuras 5.4 y 5.6 muestran las curvas de la base de datos ordenadas de menor a mayor radio. Se puede apreciar en las Figuras 5.4 a 5.9 que debido a la distribución escogida se observan diferencias significativas entre los percentiles 50, 99 y el resto. Esto hace suponer la existencia de conductores agresivos, dispuestos a aceptar una aceleración lateral mayor con el objetivo de alcanzar una velocidad más alta, y conductores pasivos que mantienen velocidades bajas debido a una menor tolerancia a aceleraciones laterales mayores. Se entiende entonces que estos dos percentiles no pueden representar a la totalidad de la muestra.

La principal diferencia entre el análisis por curva o por celda de la matriz factorial es la dispersión de los datos de aceleración, mientras en las Figuras 5.4 a 5.6 se observan diferencias significativas entre los distintos percentiles, en las Figuras 5.7 a 5.9 solo se aleja el percentil 99. Las diferencias en la velocidad de aproximación de los distintos registros para una misma curva provoca una dispersión en los percentiles. Esto se puede observar comparando los gráficos por curva y los gráficos por celda de la matriz factorial, ya que en estos últimos las curvas se diferencian en la velocidad de aproximación.

En el Anexo 5.3 se muestran los gráficos para cada una de las celdas no vacías de la matriz factorial, en los cuales es posible generalizar las conclusiones obtenidas en las Figuras 5.7 a 5.9, no encontrando valores de aceleraciones mayores a 0,4 g para los percentiles 70, 85, 90 y 95 en los puntos medios de la curva y encontrando valores menores a 0,1 g en el resto de puntos característicos analizados.

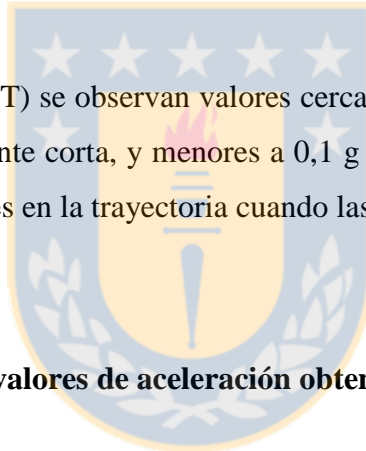
En las figuras del Anexo 5.3 se observa que para curvas de radios y tangentes intermedias menores a 200 m, solo se alcanzan aceleraciones mayores a 0,2 g en los puntos medios de cada curva, mientras que para los comienzos y finales de curva la aceleración lateral se mantiene siempre cercana al cero. En la tangente intermedia se pueden ver valores menores a 0,07 g.

El Anexo 5.4 presenta el mismo análisis pero desagregado por curva. Los resultados obtenidos son similares al análisis por celda, pero con una mayor dispersión en la distribución, debido a las distintas velocidades para cada repetición de la curva.

Para las curvas con radios entre 200 y 400 m, los valores de aceleración para los puntos iniciales y finales de las curvas se mantienen bajo 0,1 g al igual que en la tangente intermedia. Para los puntos medios del alineamiento, la aceleración lateral alcanza valores superiores a los vistos en las curvas de menor radio, llegando a 0,4 g. La relación directa entre la velocidad y el radio ayuda a entender porque se encuentran aceleraciones mayores en esta geometría, pues radios más amplios permiten alcanzar velocidades superiores, que a su vez generan aceleraciones laterales mayores.

Para las curvas de radio mayor a 400 m, se aprecia el mismo patrón que en las curvas de radio entre 200 y 400 m, pero los valores de aceleración en los puntos medios solo alcanzan valores de 0,3 g. Se observa también que para velocidades mayores a 100 km/h se producen ajustes de trayectoria en los puntos iniciales y finales de la curva y en la tangente intermedia, lo que genera aceleraciones laterales mayores a 0,1 g.

Para la tangente intermedia (MT) se observan valores cercanos a cero para los percentiles 70, 85, 90 y 95 en las curvas de tangente corta, y menores a 0,1 g en las curvas de mayor radio. Esto se interpreta como mayores ajustes en la trayectoria cuando las tangentes son mayores a 400 m.



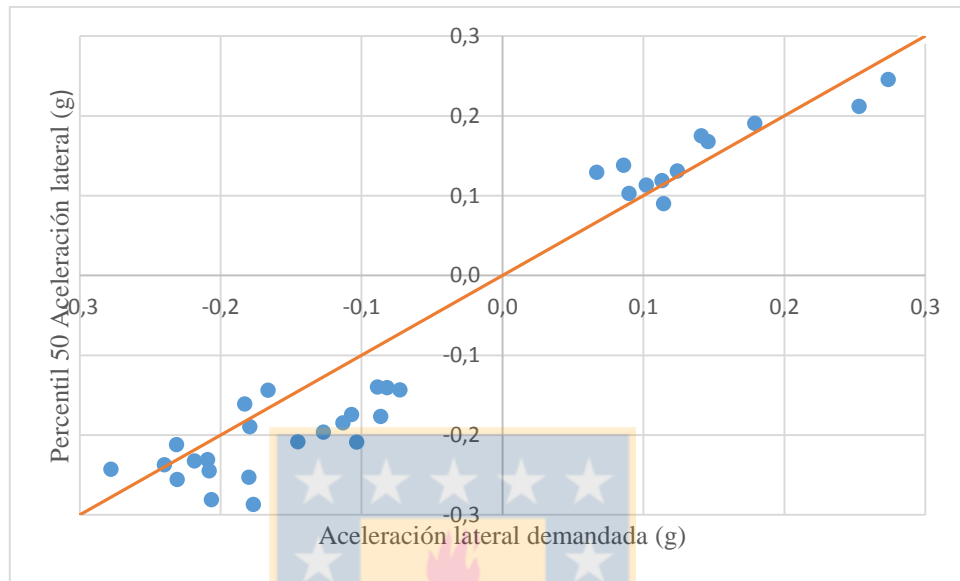
5.5 Comparación con los valores de aceleración obtenidos utilizando Vop

Se calculó el valor de la Ecuación 2.2 sustituyendo la velocidad de diseño por V85, para contrastar los valores de aceleración demandada con los valores obtenidos en el análisis estadístico, los resultados de la aceleración demandada, por el modelo de masa puntual se muestran en la Tabla 5.3. Éstos resultados se contraponen a los obtenidos en los percentiles de la distribución, como se observa en las Figuras 5.10 a 5.13, donde la aceleración teórica se encuentra generalmente bajo el percentil 50, no encontrándose un patrón claro en las ocasiones que no es así. Esto da a entender que el modelo de masa puntual subestima los valores de aceleración.

Tabla 5.3 Valores de la Ecuación 2.2 por celda de la matriz factorial

Celda	PC1	MC1	FC1	PC2	MC2	FC2
A1	0,12	0,10	0,10	-0,10	-0,11	-0,14
B1	0,16	0,14	0,15	-0,14	-0,14	-0,16
C1	0,20	0,18	0,18	-0,16	-0,15	-0,21
D1	0,29	0,25	0,24	-0,23	-0,19	-0,25
E1	0,32	0,27	0,28	-0,24	-0,20	-0,25
B2	-0,21	-0,21	-0,19	0,17	0,18	0,20
C2	-0,24	-0,22	-0,23	0,20	0,21	0,23
D2	-0,28	-0,23	-0,26	0,22	0,20	0,23
B3	-0,09	-0,09	-0,08	0,07	0,05	0,06
C3	-0,12	-0,11	-0,12	0,12	0,11	0,11
D3	-0,16	-0,13	-0,14	0,14	0,12	0,13
E3	-0,17	-0,15	-0,17	0,17	0,14	0,18
F3	-0,23	-0,18	-0,22	0,22	0,17	0,20
B4	-0,16	-0,17	-0,15	0,18	0,15	0,15
C4	-0,19	-0,18	-0,18	0,22	0,20	0,19
D4	-0,24	-0,23	-0,23	0,27	0,24	0,24
E4	-0,29	-0,28	-0,29	0,35	0,31	0,28
D5	-0,21	-0,18	-0,17	0,12	0,13	0,12
E5	-0,24	-0,21	-0,21	0,12	0,12	0,12
F5	-0,28	-0,22	-0,22	0,15	0,14	0,14
B6	0,08	0,07	0,06	-0,23	-0,20	-0,18
C6	0,10	0,09	0,07	-0,22	-0,21	-0,20
B7	-0,19	-0,21	-0,24	0,08	0,07	0,08
C7	-0,22	-0,24	-0,28	0,10	0,10	0,11
D7	-0,31	-0,32	-0,37	0,18	0,13	0,13
D8	-0,10	-0,08	-0,09	0,09	0,08	0,07
E8	-0,12	-0,11	-0,11	0,10	0,13	0,10
F8	-0,19	-0,18	-0,17	0,16	0,16	0,15
C9	-0,07	-0,07	-0,08	0,24	0,23	0,26
D9	-0,09	-0,09	-0,10	0,26	0,23	0,26
E9	-0,11	-0,10	-0,11	0,28	0,25	0,28
B10	0,09	0,11	0,11	-0,13	-0,11	-0,11
C10	0,09	0,09	0,09	-0,09	-0,09	-0,08
D10	0,11	0,11	0,12	-0,12	-0,11	-0,11
E10	0,13	0,12	0,13	-0,13	-0,12	-0,13
F10	0,15	0,15	0,17	-0,17	-0,15	-0,16

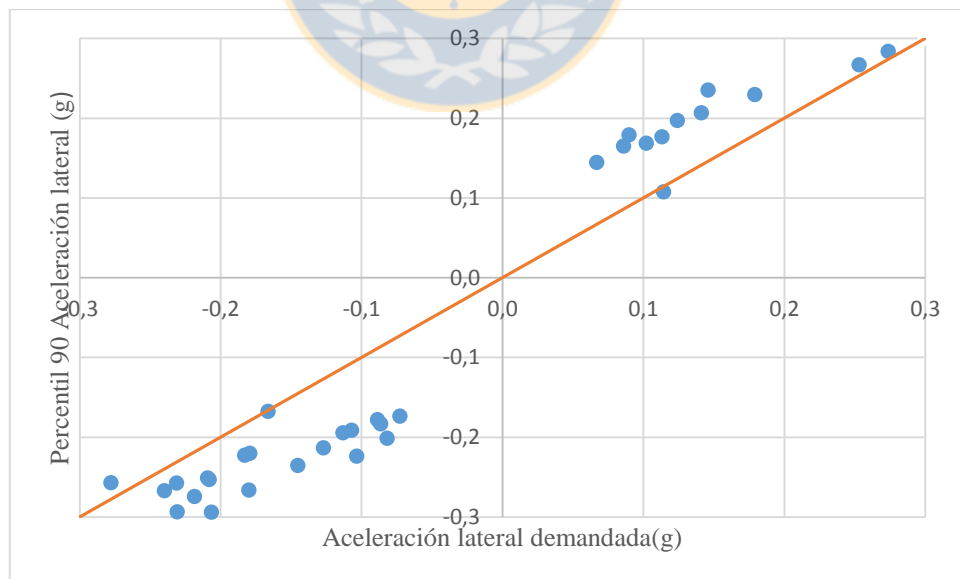
Los problemas del modelo de masa puntual, según Dhahir y Hassan (2015), provienen de la presunción de una distribución uniforme de la fuerza de fricción en todas las ruedas, la suposición de velocidad y radio constante a lo largo de la curva y la poca capacidad de predecir el valor de la aceleración en los puntos extremos de la curva.



Curva hacia la izquierda

Curva hacia la derecha

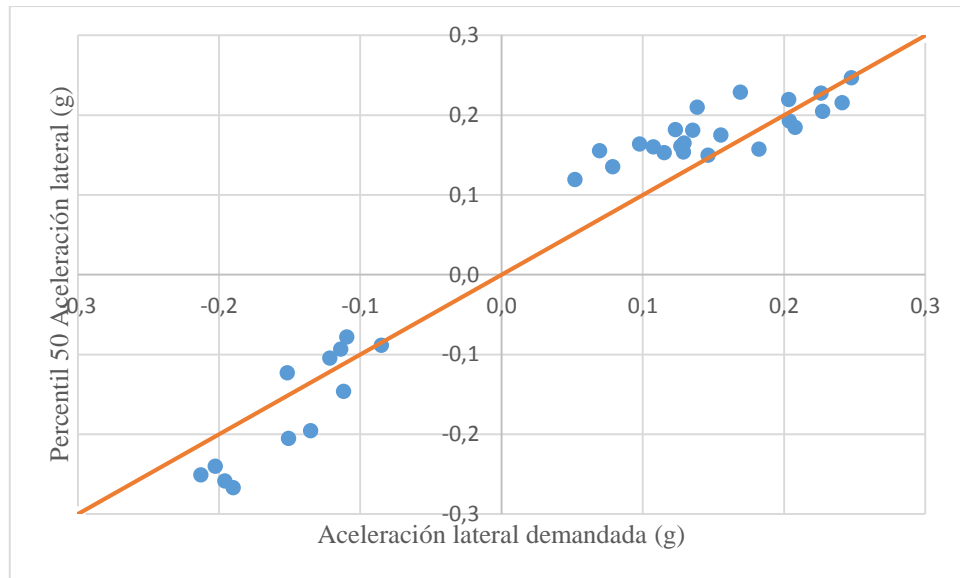
Figura 5.10 Aceleración de percentil 50 vs aceleración para V85 en la mitad de la curva 1



Curva hacia la izquierda

Curva hacia la derecha

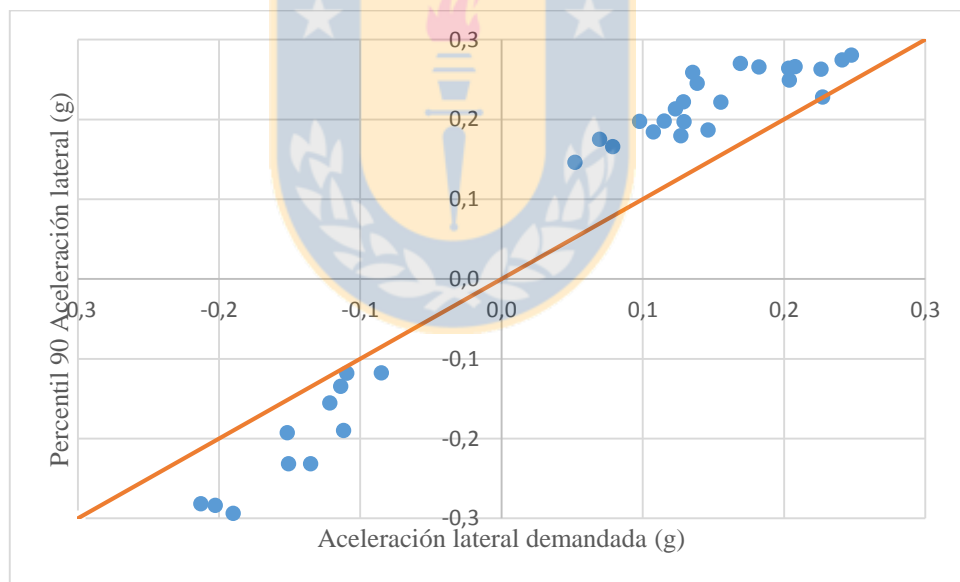
Figura 5.11 Aceleración de percentil 90 vs aceleración para V85 en la mitad de la curva 1



Curva hacia la izquierda

Curva hacia la derecha

Figura 5.12 Aceleración de percentil 50 vs aceleración para V85 en la mitad de la curva 2



Curva hacia la izquierda

Curva hacia la derecha

Figura 5.13 Aceleración de percentil 90 vs aceleración para V85 en la mitad de la curva 2

En las Figuras 5.10 a 5.13 el eje de las abscisas corresponde a los valores de la aceleración lateral en el modelo de masa puntual y el eje de las ordenadas al percentil que se describe en el gráfico. Existen valores positivos y negativos en cada gráfico debido al sentido de la curva de entrada o

salida; se define como valor positivo el giro a la derecha y negativo el giro a la izquierda. Es posible observar correlación entre el modelo de aceleración demandada y los percentiles 50 y 90, pero siempre con el modelo de aceleración lateral demandada subestimando los valores reales de esta.

5.6 Aceleración de operación

La representación de la aceleración lateral puede realizarse por medio de un valor único segmentado por radios, un percentil representativo o un modelo. Según los análisis realizados en este capítulo, existe una variabilidad para cada punto de la curva, por lo que la mejor caracterización de la aceleración lateral es un modelo. De no ser posible obtener un modelo, con la información obtenida del apartado 5.4 y los Anexos 5.3 y 5.4, se puede proponer una aceleración de operación en función de los percentiles. Se descartó a priori el percentil 50 y el percentil 99 por las razones descritas en el punto 5.4, dejando como opción los percentiles 70, 85, 90 y 95. Debido a la forma de la distribución Burr 4P, que posee una cola asintótica, el número que describe la aceleración de operación puede estar condicionado por la probabilidad de que pequeños cambios en el percentil impliquen grandes cambios en los valores de aceleración lateral, por lo que una correcta aproximación a la aceleración de operación está dada por un percentil intermedio. Se escogió el percentil 90 por no tener los problemas de los percentiles extremos y porque representa a un alto porcentaje de los conductores. En la Tabla 5.4 se muestran los valores del percentil 90 de la aceleración lateral en función del radio para el principio de curva (PC1), la mitad de curva (MC1), final de curva (FC1) y la mitad de la tangente intermedia (MT).

Tabla 5.4 Aceleración lateral de operación (g) en función del radio

R_l (m)	PC1	MC1	FC1	MT
< 200	0,10	0,29	0,13	0,05
201 - 400	0,08	0,27	0,12	0,05
> 400	0,07	0,19	0,08	0,04

Se observa que en el punto medio de la curva de entrada es donde se alcanza la mayor aceleración lateral, la cual es similar para radios menores a 400 m y considerablemente menor para radios mayores. La existencia de variabilidad para los distintos niveles de radio da a entender que una mejor caracterización de los valores de aceleración lateral es a través de un modelo.

5.7 Conclusiones

En este capítulo se describió la elaboración de la base de datos utilizada para la caracterización estadística, los análisis realizados con ésta y las principales conclusiones respecto a la misma.

En el estado del arte no se caracteriza la aceleración lateral por medio de una distribución estadística, pues se supone normal. En esta investigación se determinó que la distribución Burr 4P es la que mejor se ajusta a los datos, encontrando valores de correlación altos de las variables geométricas con el parámetro γ . Las variables geométricas se encuentran correlacionadas además con la media, de manera positiva, y la varianza, donde se observa una correlación negativa, lo que da cuenta del aumento de la variabilidad en los radios menores.

Se observó que las distribuciones tienden a ser asimétricas, en los puntos iniciales y medios de la curva, encontrando una variabilidad mayor en la mitad de la curva. Para el final de curva se observó una distribución asimétrica, centrada en el valor cero de aceleraciones, pero con una cola mayor hacia el sentido de desplazamiento en la curva. En la mitad de tangente intermedia los valores de aceleración son cercanos a cero, excepto para los casos en que la tangente es mayor a 400 m, debido a que en estos casos las curvas se comportan de manera independiente y el conductor realiza ajustes de trayectoria en la tangente intermedia.

Se escogió el percentil 90 como descriptor de la aceleración lateral de operación, encontrando que el máximo valor se encuentra en la mitad de la curva, y es cercano a 0.3 g. Esto da a entender que los conductores circulan por debajo del umbral de incomodidad recomendado en el estado del arte, que corresponde a 0.4 g. Las diferencias existentes entre la aceleración lateral de operación para los distintos niveles de radio da a entender que una mejor representación del fenómeno sería a través de modelos de aceleración.

CAPÍTULO 6 MODELACIÓN DE ACELERACIONES LATERALES

6.1 Introducción

En este capítulo se detalla la calibración y validación de los modelos de aceleración lateral propuestos en esta investigación. El capítulo comienza con la descripción de la base de datos utilizada. Luego se describe la calibración y validación de los modelos de aceleración.

6.2 Base de datos utilizada

La base de datos de modelación fue hecha a partir de la generada en el Capítulo 4 de este trabajo, la que tiene datos de aceleración, velocidad de operación y variables geométricas en todos los puntos característicos del trazado, los que se muestran en la Figura 6.1, para cada uno de los 518 perfiles de aceleración validados en el Capítulo 4. Estos datos se utilizaron para calibrar y validar los modelos de aceleración lateral que se muestran en las siguientes secciones.

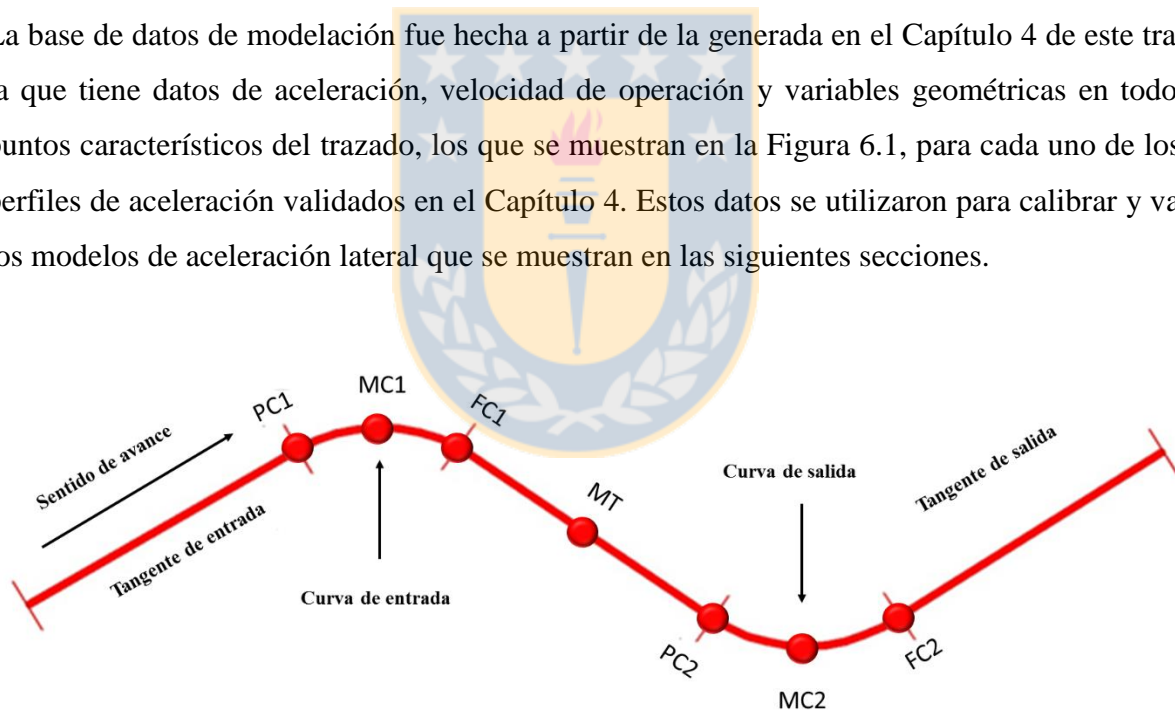


Figura 6.1 Puntos seleccionados para la modelación

En la Figura 6.1 PC, MC y FC son el principio, mitad y final de la curva 1 y 2 y MT es la mitad de la tangente intermedia.

6.3 Formulación de los modelos

Para definir las formas funcionales de los modelos de predicción de aceleración lateral en los puntos definidos en la Figura 6.1, se utilizó software estadístico con el que se probaron especificaciones lineales y no lineales.

En el Capítulo 5 se encontró que la aceleración lateral se distribuye Burr 4P, por lo que existe la posibilidad que los supuestos del análisis de regresión lineal no se cumplan totalmente. A modo de ejemplo, los parámetros que definen a la distribución Burr son distintos para cada punto característico, por lo que el supuesto de homocedasticidad no se cumple entre dos puntos sucesivos.

Box y Cox (1964) plantearon un método para solucionar los problemas de no normalidad y heterocedasticidad al estimar un modelo de regresión lineal por medio de una familia de transformaciones que aseguran que los residuales de la regresión lineal posean una distribución aproximadamente normal. Las transformaciones de Box-Cox son transformaciones de potencia definidas por la Ecuación 6.1. (Box y Cox, 1964).

$$y_i^{(\lambda_1, \lambda_2)} = \begin{cases} \frac{(y_i + \lambda_2)^{\lambda_1 - 1}}{\lambda_1} & , \quad \text{si } \lambda_1 \neq 0 \\ \log(y_i + \lambda_2) & , \quad \text{si } \lambda_1 = 0 \end{cases} \quad (6.1)$$

En la Ecuación 6.1 $y_i^{(\lambda_1, \lambda_2)}$ es la variable dependiente transformada, y_i es la variable dependiente sin transformar y λ_1 y λ_2 son los parámetros de la transformación de Box-Cox. El parámetro λ_1 es el que garantiza que la transformación de y_i sea la mejor aproximación a la normalidad y homocedasticidad de los residuos de $y_i^{(\lambda_1)}$, y su óptimo se obtiene a través del método de máxima verosimilitud y/o métodos bayesianos. La transformada de potencia solo es válida para valores positivos de y_i , por lo que para $y_i < 0$, λ_2 toma un valor tal que $y_i + \lambda_2 \geq 0 \forall i$ (Box y Cox, 1964).

Debido a la existencia de valores de aceleración lateral negativos, se utilizaron valores de λ_2 variables según cada caso, tal que $y_i + \lambda_2$ tuviera siempre un valor positivo. La forma funcional de los modelos se muestra en la Ecuación 6.2.

$$y_i^{(\lambda_1, \lambda_2)} = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i, \quad (6.2)$$

En la Ecuación 6.3 $y_i^{(\lambda_1, \lambda_2)}$ es la variable dependiente transformada, β_0 es el término constante del modelo lineal y β_i son los coeficientes de las i variables independientes x_i .

6.4 Calibración y validación de modelos

Se calibraron modelos de regresión lineal múltiple y modelos de regresión no lineal, que permiten estimar los valores de aceleración lateral en cada uno de los puntos característicos de la Figura 6.1. Tomando en consideración lo visto en el Capítulo 2 y lo analizado en el Capítulo 5, la base de datos de aceleración lateral se segmentó de acuerdo a lo siguiente.

- i. Curva de entrada: (1) Base de datos completa, (2) radios de 190 a 399 m y (3) radios de 400 a 700 m.
- ii. Tangente intermedia: (1) Base de datos completa, (2) longitud entre 80 y 169 m, (3) longitud entre 170 y 260 m y (4) longitud mayor a 261 m.
- iii. Curva de salida: (1) Base de datos completa, (2) radios de 190 a 399 m y (3) radios de 400 a 700 m.

Los modelos que se muestran en esta sección son los que obtuvieron el mejor ajuste estadístico entre todas las especificaciones analizadas. Estas se detallan en el Anexo 6.1. A continuación se muestran los criterios utilizados para seleccionar los mejores modelos.

- a. Nivel de ajuste de los modelos: Se evaluó el nivel de ajuste de los modelos por medio de los indicadores R cuadrado (R^2) y R cuadrado ajustado (R_a^2).
- b. Significancia estadística de las variables independientes: Se estimó a través de la prueba estadística t (su valor se muestra bajo los coeficientes del modelo entre paréntesis) y el valor p asociado a cada variable (ver Anexo 6.1).
- c. Validación: La validación de los modelos calibrados se realizó con el 20% de la base de datos de modelación, esta base de datos de validación fue escogida aleatoriamente y no se utilizó para calibrar los modelos. El objetivo de la validación fue evaluar la precisión de los modelos, por medio de cuatro indicadores: gráfica de valores observados v/s estimados, y el cálculo de los errores del pronóstico MSE, MAE, MAPE, los cuales son descritos a continuación.
 - a) Gráfica de valores observados v/s estimados: Para cada modelo calibrado, se comparan los valores estimados de aceleración lateral con los observados de la misma variable y se observa el ajuste de estos a una recta de referencia de 45° . Si los puntos se alejan de dicha recta, se concluye que el modelo no tiene un buen comportamiento.
 - b) Cálculo de errores del pronóstico: El error del pronóstico entrega la diferencia entre los valores estimados y observados. Los indicadores utilizados son el error cuadrático medio (MSE), el error absoluto de la media (MAE) y el error absoluto porcentual de la media (MAPE).

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{observado}_i - \text{estimado}_i)^2, \quad (6.3)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{observado}_i - \text{estimado}_i|, \quad (6.4)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{observado}_i - \text{estimado}_i}{\text{estimado}_i} \right| 100, \quad (6.5)$$

En las ecuaciones 6.3, 6.4 y 6.5 n es el número de registros, observado_i y estimado_i son el valor de aceleración lateral observado y estimado para el registro i .

- d. Autocorrelación: Los valores del estadístico de Durbin-Watson se utilizaron para detectar autocorrelación en los modelos calibrados. El valor del estadístico fue calculado a través de la Ecuación 6.6.

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (\text{residual}_i - \text{residual}_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \text{residual}_i^2}, \quad (6.6)$$

En la Ecuación 6.6 n es el número de registros, residual_i es la diferencia entre el valor observado y estimado de cada registro. Para $d > 1.5$ se descarta la presencia de autocorrelación (Gujarati, 2003).

- e. Número de datos: Cuando el número de datos considerados para la calibración es menor a 30, puede producirse un sesgo en el nivel de los indicadores de ajuste.

La nomenclatura utilizada en los modelos calibrados se describe a continuación:

- R_1, R_2 : Radio de la curva de entrada y salida, respectivamente, en m
- w_1, w_2 : Ángulo de deflexión de la curva de entrada y salida, respectivamente, en grad
- d_1, d_2 : Desarrollo de la curva de entrada y salida, respectivamente, en m
- L_t : Longitud de la tangente intermedia, en m
- a_i : Aceleración predicha en el punto i del alineamiento, en m/s^2

- V_{85i} : Velocidad de operación en el punto i del alineamiento, en km/h

El índice “i” se refiere a cada uno de los puntos característicos de la curva que se muestran en la Figura 6.1.

6.4.1 Modelos para el principio de la curva de entrada

- a) Radio de la curva de entrada entre 190 y 700 m.

Los modelos calibrados para este punto característico presentan un ajuste bajo el 5%.

- b) Radio de la curva de entrada entre 190 y 399 m.

Los modelos calibrados para este punto característico presentan un ajuste bajo el 5%.

- c) Radio de la curva de entrada entre 400 y 700 m.

$$0,342 + 0,00426 V_{85PC1} + 0,00955 w_1 - 0,00152 d_1 = Y,$$

(2,31)
(2,86)
(3,54)
(-4,22)

donde $Y = 1 + \frac{(aPC1 + 0,184)^{-0,1375} - 1}{0,368}$ (6.8)

$R^2_a = 0,11$

Tabla 6.1 Indicadores de validación de la Ecuación 6.8

MAE (m/s ²)	0,15	MAPE (%)	62,87
MSE (m/s ²)	0,04	Durbin-Watson	0,25
Número de datos para la validación			41

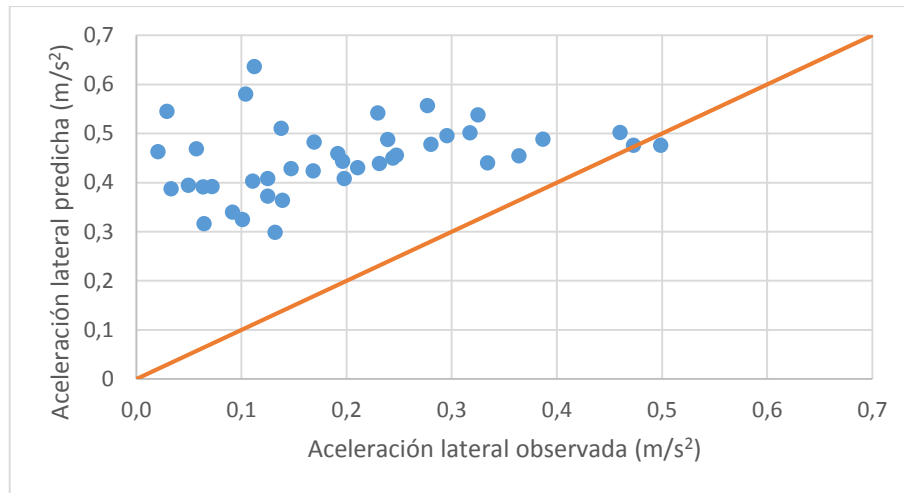
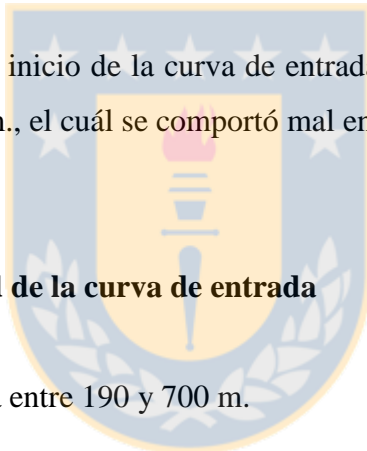


Figura 6.2 Aceleración observada v/s predicha para la Ecuación 6.8

d) Comentario: En el punto de inicio de la curva de entrada sólo fue posible calibrar un modelo para radios mayores a 400 m., el cuál se comportó mal en la validación.



6.4.2 Modelos para la mitad de la curva de entrada

a) Radio de la curva de entrada entre 190 y 700 m.

$$0,283 + 0,0338 V_{85} MC1 - 0,00386 R_1 = Y$$

(2,53) (22,43) (-34,37)

donde $Y = 1 + \frac{(aMC1)^{0,26432} - 1}{0,184}$, (6.9)

$R_a^2 = 0,74$

Tabla 6.2 Indicadores de validación de la Ecuación 6.9

MAE (m/s²)	0,21	MAPE (%)	12,77
MSE (m/s²)	0,09	Durbin-Watson	1,59
Número de datos para validación			98

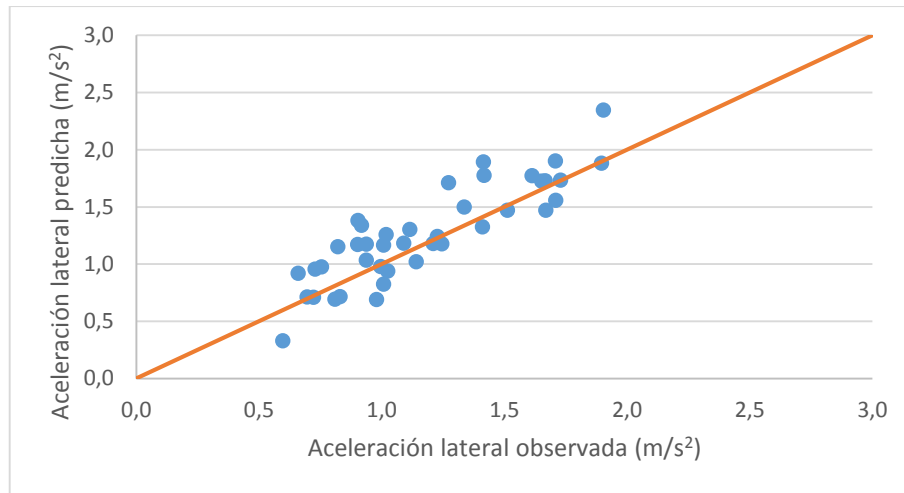


Figura 6.3 Aceleración observada v/s predicha para la Ecuación 6.9

b) Radio de la curva de entrada entre 190 y 399 m.

$$-1,513 + 0,0433 V_{85}MC1 + 0,0244 w_1 - 0,00588 d_1 = Y$$

(-12,87)
(31,15)
(24,23)
(-18,27)

donde $Y = 1 + \frac{(aMC1)^{0,46784} - 1}{0,331}$, (6.10)

$R^2_a = 0,85$

Tabla 6.3 Indicadores de validación de la Ecuación 6.10

MAE (m/s²)	0,15	MAPE (%)	7,63
MSE (m/s²)	0,04	Durbin-Watson	2,08
Número de datos para validación			57

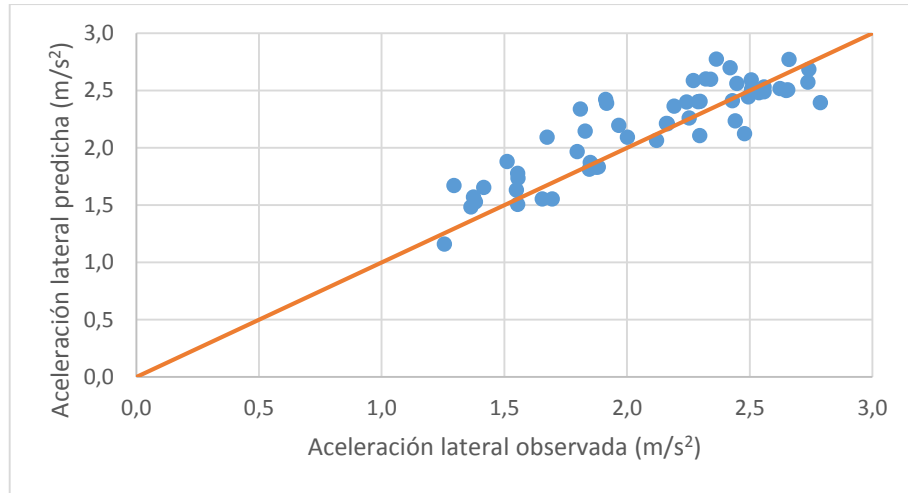


Figura 6.4 Aceleración observada v/s predicha para la Ecuación 6.10

c) Radio de la curva de entrada entre 400 y 700 m.

$$1,012 + 0,025 V_{85} MC1 - 0,108 \sqrt{R_1} + 0,0125 w_1 = Y \tag{6.11}$$

(3,9)
(14,39)
(-11,7)
(8,65)

donde $Y = 1 + \frac{(aMC1)^{-0,20938} - 1}{-0,158}$,

$R^2_a = 0,72$

Tabla 6.4 Indicadores de validación de la Ecuación 6.11

MAE (m/s²)	0,16	MAPE (%)	12,29
MSE (m/s²)	0,05	Durbin-Watson	1,71
Número de datos para validación			41

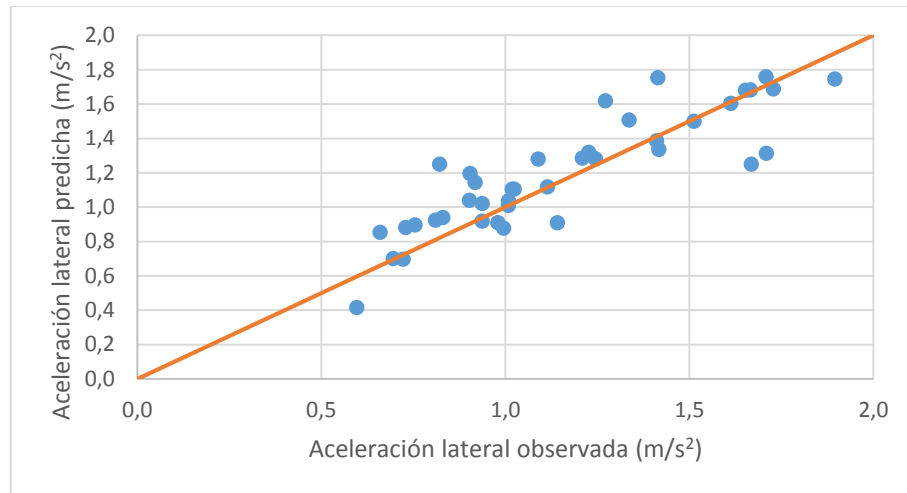


Figura 6.5 Aceleración observada v/s predicha para la Ecuación 6.11

- d) Comentario: Para la mitad de la curva de entrada se calibraron modelos bien comportados para la base de datos completa y por segmento, los 3 modelos fueron validados.

6.4.3 Modelos para el final de la curva de entrada

- a) Radio de la curva de entrada entre 190 y 700 m.

Los modelos calibrados para este punto característico presentan un ajuste bajo el 5%.

- b) Radio de la curva de entrada entre 190 y 399 m.

Los modelos calibrados para este punto característico presentan un ajuste bajo el 5%.

- c) Radio de la curva de entrada entre 400 y 700 m.

$$-0,692 + 0,010 V_{85FC1} - 0,00203 d_1 + 0,0181 w_1 = aFC1, \quad (6.12)$$

$$R_a^2 = 0,24$$

Tabla 6.5 Indicadores de validación de la Ecuación 6.12

MAE (m/s ²)	0,17	MAPE (%)	54,91
MSE (m/s ²)	0,05	Durbin-Watson	0,39
Número de datos para validación			41

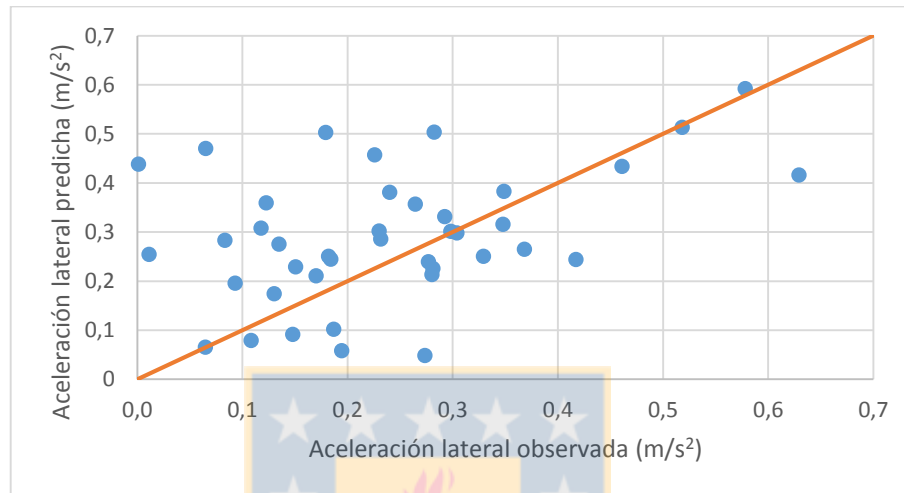


Figura 6.6 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.12

- d) Comentario: En el final de la curva de entrada sólo fue posible calibrar un modelo para radios mayores a 400 m. en la validación se muestra un ajuste correcto pero con amplia dispersión.

6.4.4 Discusión de los modelos para la curva de entrada

Para el principio de curva fue posible calibrar un modelo para radios amplios, superiores a 400 m. La capacidad predictiva de este modelo es baja, pero sus valores se encuentran entre 0,03 y 0,06 g, lo cual coincide con los valores obtenidos en la caracterización estadística del Capítulo 5. Para radios menores a 400 m, así como para la base de datos completa, no fue posible calibrar modelos de aceleración lateral en este punto característico. No se recomienda el uso de este modelo para la predicción de aceleraciones.

Los modelos calibrados para la mitad de la curva de entrada muestran que al trabajar con datos segmentados, se disminuyen los errores del pronóstico, y aumenta el valor del estadístico Durbin-

Watson. El ajuste de los modelos mejora considerablemente en el caso de los radios bajos, y disminuye de forma marginal para radios mayores a 400 m. A pesar de esto se recomienda utilizar los modelos calibrados por segmento de la base de datos, debido a la mejora en los errores del pronóstico.

En el caso del final de la curva de entrada, al igual que en el principio de ésta, el único modelo calibrado fue el de radios mayores a 400 m. El ajuste de este modelo es bajo, pero a pesar de eso captura el fenómeno de manera correcta para valores de aceleración lateral superiores a 0,03 g, y los sobrestima para valores menores al indicado.

6.4.5 Modelos para la tangente intermedia

a) Longitud de tangente entre 80 y 700 m.

Los modelos calibrados para este punto característico presentan un ajuste bajo el 5%.

b) Longitud de tangente entre 80 y 169 m.

$$1,525 - 0,00453 V_{85}FC1 + 0,00579 Lt - 0,981 \frac{R_1}{R_2} = Y$$

(5,89)
(-3,40)
(4,75)
(-4,13)

donde $Y = 1 + \frac{(aMT+0,798)^{1,16252} - 1}{1,106}$, (6.13)

$R^2_a = 0,24$

Tabla 6.6 Indicadores de validación de la Ecuación 6.13

MAE (m/s ²)	0,12	MAPE (%)	486,21
MSE (m/s ²)	0,02	Durbin-Watson	2,25
Número de datos para validación			35

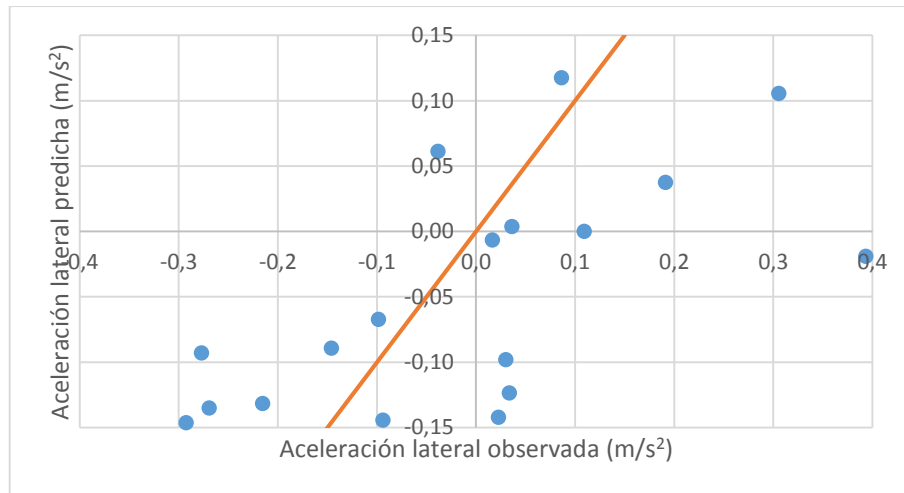


Figura 6.7 Aceleración lateral observada v/s predicha para a Ecuación 6.13

c) Longitud de tangente entre 170 y 260 m.

$$0,399 - 0,0108 V_{85FC1} + 0,00807 V_{85PC2} + 0,0728 \frac{R_1}{R_2} = Y$$

(4,91) (-5,71) (4,00) (2,96)

donde $Y = 1 + \frac{(aMT+0,471)^{1,73993} - 1}{0,961}$, (6.14)

$R^2_a = 0,25$

Tabla 6.7 Indicadores de validación de la Ecuación 6.14

MAE (m/s²)	0,1	MAPE (%)	97,58
MSE (m/s²)	0,01	Durbin-Watson	1,67
Número de datos para validación			41

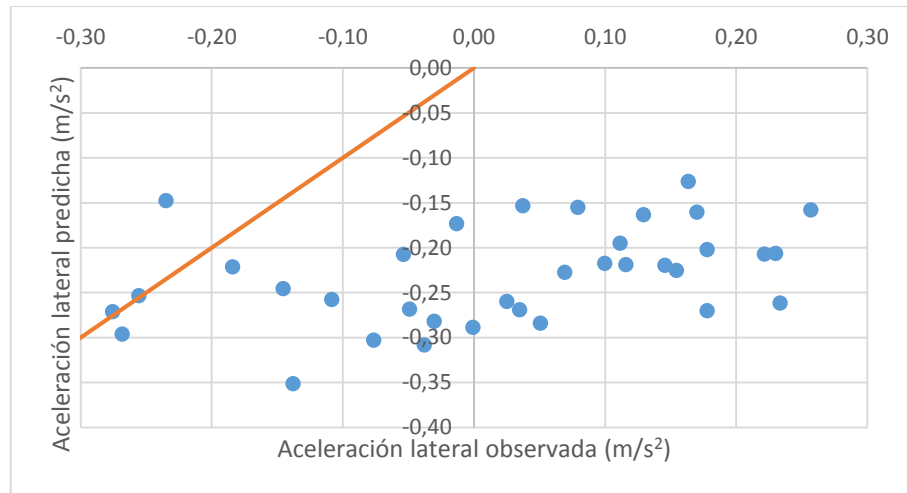


Figura 6.8 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.14

d) Longitud de tangente mayor a 260 m.

Los modelos calibrados para este punto característico presentan un ajuste bajo el 5%.

e) Comentario: El valor teórico de la aceleración lateral en rectas es cero, pero según lo observado en el Capítulo 5, existen variaciones en la tangente intermedia. Fue posible calibrar modelos para longitudes de tangente entre 80 y 169 m y 170 a 260 m. En ambos casos se observan ajustes cercanos al 25%, con valores predichos entre 0,015 g a -0,036 g, coincidiendo con lo encontrado en la caracterización estadística.

6.4.6 Modelos para el principio de la curva de salida

a) Radio de la curva de salida entre 190 y 700 m.

Los modelos calibrados para este punto característico presentan un ajuste bajo el 5%.

b) Radio de la curva de salida entre 190 y 399 m.

$$0,931 - 0,00530 V_{85}PC2 + 0,000833 d_2 = Y$$

(10,71) (-4,96) (5,54)

donde $Y = 1 + \frac{(aPC2+0,985)^{1,47813} - 1}{1,209}$, (6.15)

$$R^2_a = 0,16$$

Tabla 6.8 Indicadores de validación de la Ecuación 6.15

MAE (m/s ²)	0,13	MAPE (%)	53,28
MSE (m/s ²)	0,03	Durbin-Watson	0,32
Número de datos para validación			51

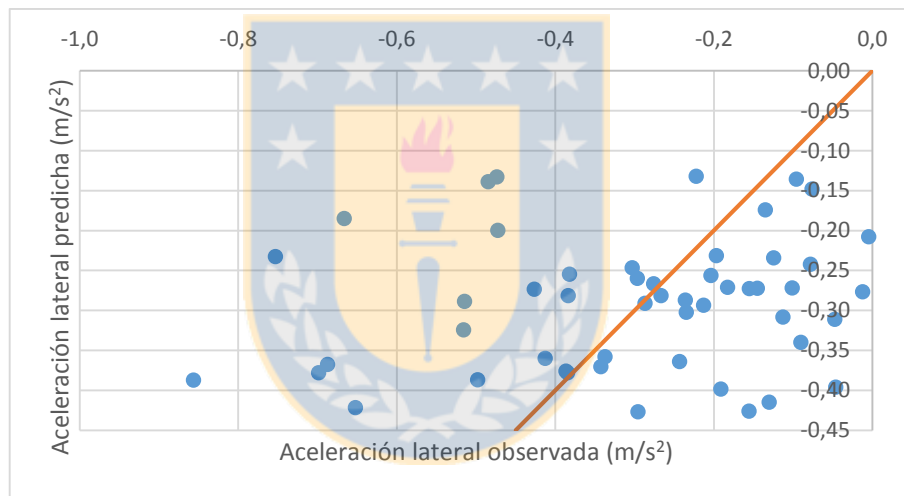


Figura 6.9 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.15

c) Radio de la curva de salida entre 400 y 700 m.

$$0,745 - 0,00453 V_{85}PC2 + 0,000741 d_2 = Y$$

(8,48) (-4,95) (5,92)

donde $Y = 1 + \frac{(aPC2+0,5)^{0,554277} - 1}{1,102}$, (6.16)

$$R^2_a = 0,23$$

Tabla 6.9 Indicadores de validación de la Ecuación 6.16

MAE (m/s ²)	0,11	MAPE (%)	161,70
MSE (m/s ²)	0,02	Durbin-Watson	0,40
Número de datos para validación		45	

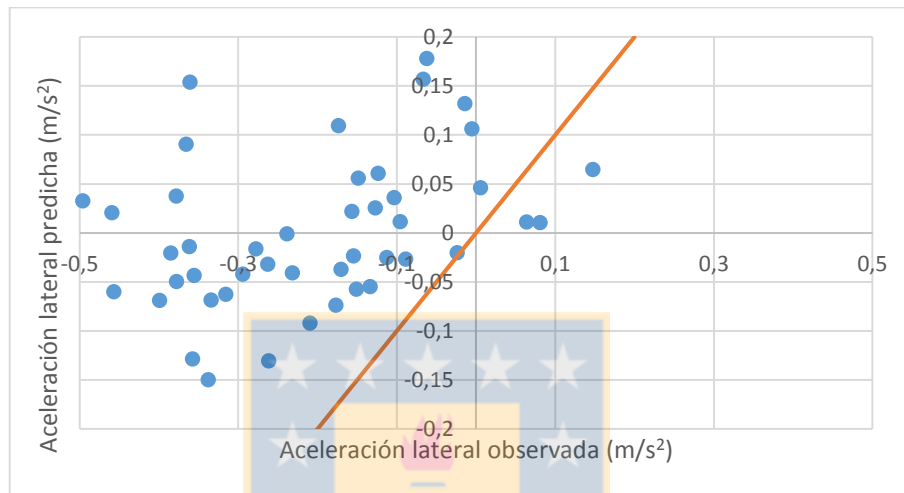


Figura 6.10 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.16

d) Comentario: Fue posible calibrar modelos para la base de datos segmentada por radio, pero estos modelos no se comportaron bien en la validación. No se recomienda su uso en la predicción.

6.4.7 Modelos para la mitad de la curva de salida

a) Radio de la curva de salida entre 190 y 700 m.

$$5,508 - 0,028 V_{85}MC2 - 465,464 \frac{1}{R_2} = Y$$

(31,17) (-16,61) (-31,65)

donde $Y = 1 + \frac{(aMC2+3,221)^{0,89296} - 1}{0,859}$, (6.17)

$$R_a^2 = 0,71$$

Tabla 6.10 Indicadores de validación de la Ecuación 6.17

MAE (m/s ²)	0,27	MAPE (%)	18,51
MSE (m/s ²)	0,12	Durbin-Watson	1,39
Número de datos para validación			99

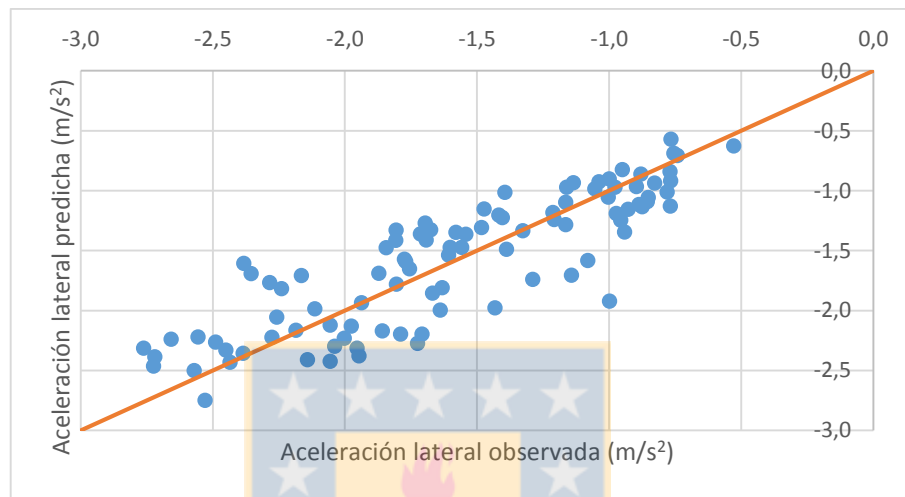


Figura 6.11 Aceleración lateral observada v/s predicha por la Ecuación 6.17

b) Radio de la curva de salida entre 190 y 399 m.

$$6,712 - 0,740 \sqrt{V_{85}MC2} + 0,00452 R_2 = Y$$

(32,33)
(-30,38)
(22,01)

donde $Y = 1 + \frac{(aMC2+3,221)^{1,10231} - 1}{1,118}$, (6.18)

$R_a^2 = 0,85$

Tabla 6.11 Indicadores de validación de la Ecuación 6.18

MAE (m/s ²)	0,15	MAPE (%)	8,03
MSE (m/s ²)	0,03	Durbin-Watson	1,54
Número de datos para validación			54

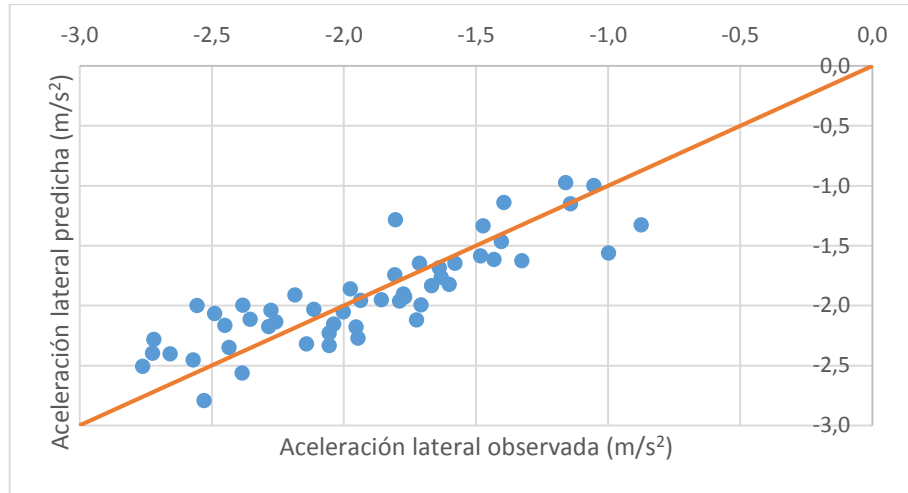


Figura 6.12 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.18

c) Radio de la curva de salida entre 400 y 700 m.

$$5,199 - 0,0229 V_{85}MC2 - 751,547 \frac{1}{R_2} - 0,00482 w_2 = Y$$

(30,89)
(-15,99)
(-14,40)
(-3,23)

donde $Y = 1 + \frac{(aMC2+2,789)^{2,13233} - 1}{3,548}$, (6.19)

$R^2_a = 0,77$

Tabla 6.12 Indicadores de validación de la Ecuación 6.19

MAE (m/s²)	0,16	MAPE (%)	13,38
MSE (m/s²)	0,04	Durbin-Watson	1,90
Número de datos para validación			45

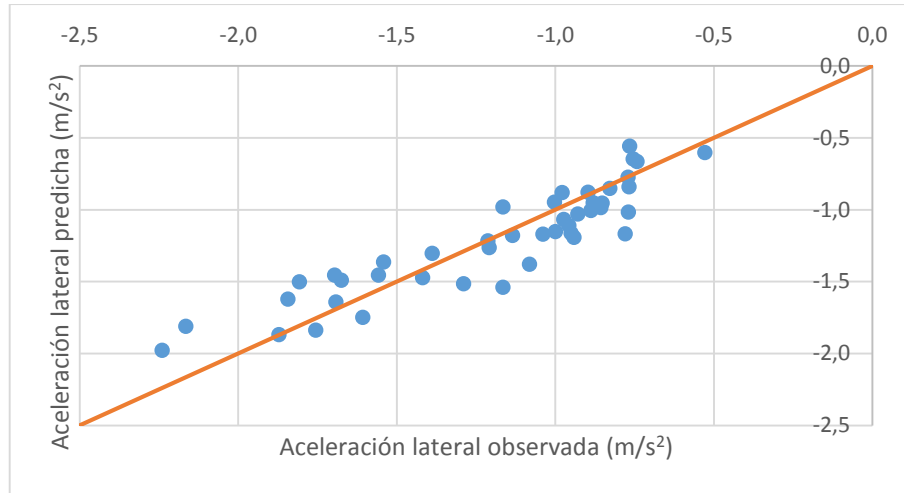


Figura 6.13 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.19

- d) Comentario: Para la mitad de la curva de salida se calibraron modelos bien comportados para la base de datos que considera todos los valores de radio y por segmento de estos, los 3 modelos fueron validados.

6.4.8 Modelos para el final de la curva de salida

- a) Radio de la curva de salida entre 190 y 700 m.

$$1,985 + 0,00235 d_2 + 99,55 \frac{1}{R_2} - 0,0103 w_2 = Y$$

(17,34) (5,32) (3,36) (-5,37)

donde $Y = 1 + \frac{(aFC2+2,76)^{1,2737} - 1}{1,630}$, (6.20)

$R_a^2 = 0,11$

Tabla 6.13 Indicadores de validación de la Ecuación 6.20

MAE (m/s²)	0,22	MAPE (%)	163
MSE (m/s²)	0,1	Durbin-Watson	1,28
Número de datos para validación			98

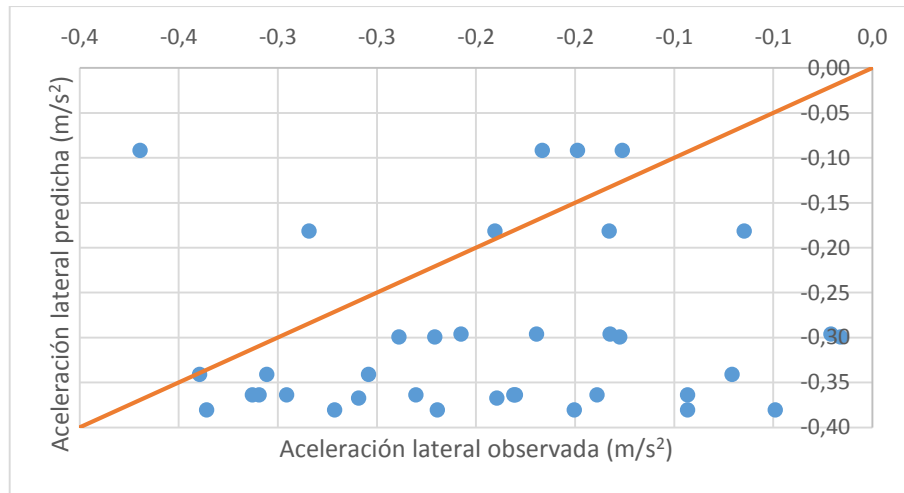


Figura 6.14 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.20

b) Radio de la curva de salida entre 190 y 399 m.

$$1,757 - 0,00569 V_{85FC2} - 0,00212 w_2 = Y$$

(14,35) (-3,85) (-3,38)

donde $Y = 1 + \frac{(aFC2+1,44)^{2,0553} - 1}{2,289}$, (6.21)

$R^2_a = 0,13$

Tabla 6.14 Indicadores de validación de la Ecuación 6.21

MAE (m/s ²)	0,19	MAPE (%)	72,11
MSE (m/s ²)	0,06	Durbin-Watson	2,06
Número de datos para validación			54

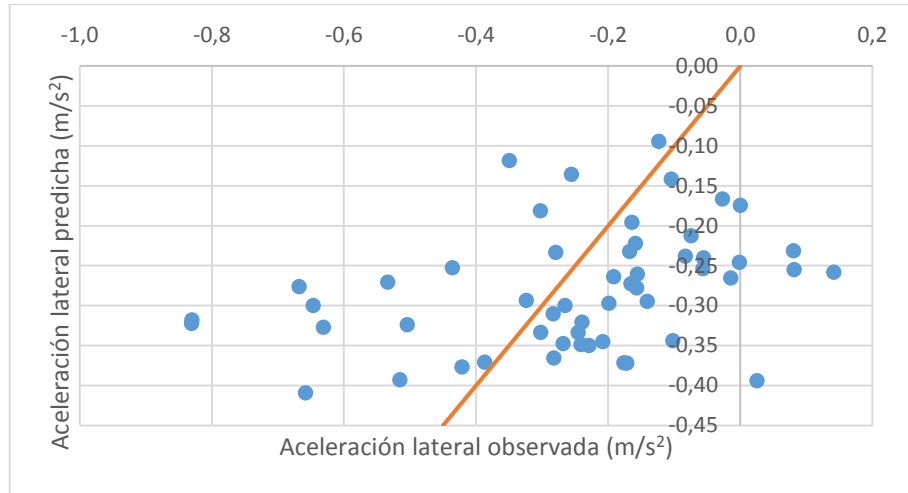


Figura 6.15 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.21

c) Radio de la curva de salida entre 400 y 700 m.

$$-0,00493 V_{85FC2} + 0,0120 w_2 - 0,00169 d_2 + 0,000462 R_2 = aFC2, \tag{6.22}$$

$R^2_a = 0,18$

Tabla 6.15 Indicadores de validación de la Ecuación 6.22

MAE (m/s ²)	0,11	MAPE (%)	42,65
MSE (m/s ²)	0,02	Durbin-Watson	2,07
Número de datos para validación			44

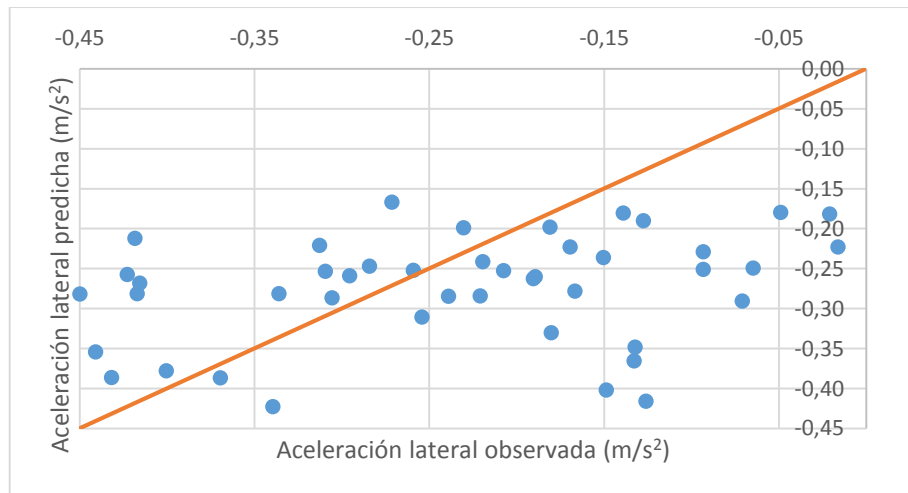


Figura 6.16 Aceleración lateral observada v/s predicha para la Ecuación 6.22

- d) Comentario: Para el final de la curva de salida se calibraron modelos para la base de datos segmentada por radio y no segmentada, encontrándose ajustes pobres. En la validación se observó una tendencia a capturar los valores empíricos de aceleración lateral, a pesar de la amplia dispersión en los datos.

6.4.9 Discusión de los modelos para la curva de salida

Se observa un comportamiento similar al de la curva de entrada, donde los modelos calibrados por segmento de la base de datos poseen mejor ajuste y menores errores del pronóstico (MSE, MAE, MAPE) que los calibrados para la base de datos completa.

Para el principio de curva no fue posible calibrar un modelo para la base de datos completa, pero al segmentarla en función del radio de curva se obtuvieron modelos que a pesar de no poseer un ajuste mayor al 25%, capturan el fenómeno correctamente.

Al comparar los modelos calibrados en los distintos puntos del alineamiento es posible concluir que aquellos formulados con la base de datos segmentada en función del radio de la curva, entregan resultados más confiables y robustos que aquellos realizados con la base de datos completa. Se propone trabajar con los segundos.

6.5 Conclusiones

En este capítulo se describió la metodología usada para calibrar y validar los modelos de aceleración lateral que fueron formulados en este trabajo y la selección de los mejores de ellos.

La aceleración lateral en los puntos medios de las curvas uno y dos son representados como una combinación lineal de variables geométricas y la velocidad de operación correspondiente a dicho punto de la curva.

Se calibraron modelos para la base de datos completa, pero estos no entregaron buenos ajustes o bien no capturaron de manera correcta los valores alcanzados de aceleración lateral. Para solucionar estos problemas se segmentó la base de datos por radio de la curva (entrada o salida, respectivamente), mejorando los indicadores de validación en todos los casos. Esto ayudó a demostrar que para radios bajo 400 m, los valores de aceleración lateral alcanzados son mayores que en los radios mayores.

Los modelos de principio y final de curva poseen ajustes pobres, pero son una buena aproximación al comportamiento de los conductores al ingresar a una curva. Los bajos valores del indicador R_a^2 son explicados por las distintas decisiones que toman los conductores al momento de ingresar a una curva, lo que provoca una dispersión en los valores de aceleración lateral.

En la tangente intermedia, los modelos poseen un bajo nivel de ajuste, pero entregan valores concordantes con lo observado en el Capítulo 5, encontrando que para los valores de tangente intermedia menores a 260 m el valor de la aceleración lateral es función de la velocidad en el final de la curva uno, y la relación de radios entre ambas curvas. Para largos de tangente intermedia mayores a 260 m no fue posible calibrar modelos con ajuste mayor al 5%. Estos resultados son una primera aproximación a un criterio de independencia de curvas utilizando los valores de aceleración lateral en la tangente intermedia. En la sección 5.6 se propusieron valores de aceleración lateral para la tangente intermedia entre 0,07 a 0,1 g. Estos valores representan la operación de mejor forma que los modelos calibrados en este Capítulo.

Para la mitad de curva, se obtuvieron modelos con ajustes superiores al 70% y con buenos indicadores de validación. Estos modelos pueden ser utilizados para predecir los valores de aceleración lateral y también para estudiar la consistencia de una curva, mediante el criterio que relaciona la fricción demandada con la de diseño.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

En esta Tesis se caracterizaron y modelaron las aceleraciones laterales a las que se ven sometidos los conductores al transitar una curva horizontal sucesiva e inversa, para cada punto característico definido de dicha entidad geométrica.

Según los resultados obtenidos, se verificó la hipótesis de que la aceleración lateral en curvas como variable aleatoria está explicada por factores fijos, como la geometría y factores pseudo-aleatorios como la velocidad de operación.

Se calibraron 62 modelos, de los cuales se muestran los 15 que lograron representar de mejor manera el comportamiento de los conductores en cada punto del trazado.

Los modelos y valores de aceleración lateral encontrados en la literatura corresponden a estudios realizados en curvas horizontales aisladas. En el estado del arte no se encontraron estudios relativos a la aceleración lateral en curvas horizontales sucesivas e inversas, por lo que no se tiene claridad del efecto de la dependencia de curvas en el valor de esta variable.

Los valores de comodidad encontrados en la literatura varían entre 0,2 y 0,4 g, que es el valor límite para desplazarse de manera cómoda en una curva, percibido por la mayoría de los ocupantes de un vehículo.

Los modelos propuestos en el estado del arte coinciden en que la velocidad longitudinal es una de las principales variables que describen la aceleración lateral. Se determinó que el radio de la curva horizontal es un buen descriptor de la variable. Esto se condice con el modelo de masa puntual, que relaciona la aceleración lateral con las mismas variables que se observan en los modelos.

Las aceleraciones obedecen a una distribución Burr de 4 parámetros. Se encontró que existe una correlación entre el parámetro γ y las variables geométricas relativas a la mitad de curva. Producto de la asimetría de la distribución Burr 4P, pequeños cambios en los percentiles de la aceleración lateral implican grandes cambios de aceleraciones en la cola.

Dado lo anterior, y en base a los resultados de la presente investigación, se propone representar la aceleración lateral mediante el percentil 90 de la distribución Burr y no con un valor medio, ya que este último no considera la varianza existente en la distribución.

En el principio y final de la curva de entrada se encontraron valores de aceleración entre 0,07 y 0,13 g. En la tangente intermedia el percentil 90 no supera los 0,05 g y en la mitad de la curva alcanza valores cercanos a 0,3 g para radios menores a 400 m., y a 0,2 g en radios mayores a 400m.

Se observó que el modelo de masa puntual subestima los valores de aceleraciones laterales, encontrándose generalmente bajo el percentil 50, por lo que no es una herramienta confiable y debe ser modificado para entregar información realista sobre el comportamiento de los conductores.

Se presentó un conjunto de modelos lineales que permiten predecir la aceleración lateral para los puntos característicos de una C.H.S.I definidos. Esto representa un aporte al estado del arte, pues no existían modelos de aceleración lateral para curvas de inflexión en S en trabajos previos a esta Tesis.

Los modelos calibrados para la mitad de la curva presentan buenos índices de validación, con MSE entre 0,03 y 0,12 (m/s^2), MAE entre 0,15 y 0,27 (m/s^2) y MAPE entre 7,63 y 18,51 % y nivel de ajuste superiores al 70%, llegando incluso al 85% al segmentar la base de datos por radio de curva, por lo que resulta confiable su utilización. Los modelos para los otros puntos característicos resultan una buena primera aproximación para comprender el comportamiento de los conductores en los puntos extremos de la curva, pero no para la predicción de aceleración lateral, pues no alcanzan ajustes mayores al 30%. Los indicadores de validación, como el MAPE, para estos modelos alcanzan 486 %.

Los resultados obtenidos en este trabajo difieren de los encontrados en el estado del arte por distintos motivos. Uno de ellos es la metodología de recolección de datos, pues los resultados obtenidos en simuladores y con mediciones puntuales son distintos a los obtenidos con la utilización de un GPS. Otro motivo es la caracterización estadística realizada, pues en trabajos

anteriores no se consideró la distribución de probabilidades de los datos. Por último en el estado del arte no existen modelos de aceleración lateral por punto característico de una curva, lo que hace que esta investigación sea distinta de cualquier otra.

Para finalizar, a pesar de los bajos ajustes de los modelos para ciertos puntos del trazado, se concluye que los modelos calibrados en esta investigación representan una buena aproximación a comprender la aceleración lateral en curvas sucesivas e inversas, pues el valor de esta variable en las colas de la curva se ve contaminada por las tangentes lo que provoca los malos resultados en los indicadores del modelo.

El trabajo realizado en este estudio permite sugerir las siguientes líneas de investigación:

- i. Utilizar los modelos de aceleración lateral calibrados para modificar el tercer criterio de consistencia de Lamm, basado en la diferencia entre la aceleración lateral de diseño y de operación.
- ii. Estudiar técnicas de suavización para registros de aceleraciones, debido al ruido existente en toda la entidad geométrica.
- iii. Identificar la influencia de las características del vehículo, principalmente del tamaño, capacidad del motor y sistemas de amortiguación en la aceleración lateral.
- iv. Estudiar el comportamiento de los conductores según edad y género, y relacionarlo con la agresividad en la conducción, con el objetivo de encontrar variables que afecten la aceleración lateral en los puntos extremos de la curva
- v. Calibrar modelos de *wandering* que expliquen la existencia de aceleración lateral en tangentes.
- vi. Analizar el impacto de otras variables geométricas y del entorno, tales como visibilidad, pendiente longitudinal y número de pistas, en los valores de aceleración lateral.

REFERENCIAS

Bosetti, P., M. Da Lio, y A. Saroldi (2015) On curve negotiation: From driver support to automation. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, **16(4)**. 2082-2093.

Box, G. y D. Cox (1964) An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, **(26)**. 211-252.

Burr, I. (1942) Cumulative frequency functions. **Annals of Mathematical Statistics**, **13**. 215-32.

Cohen, J. (1988) **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2a Edición. Academic Press. Nueva York.

Dhahir, B. y Y. Hassan (2015) Using Vehicle Simulation In Reliability Analysis Of Horizontal Curves Based On Vehicle Stability And Driver Comfort. **Road Safety and Simulation International Conference**. Orlando. Estados Unidos. Octubre.

Echaveguren, T., Á. Díaz, y S. Vargas-Tejeda (2015) Operating speed models for horizontal reverse curves. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport**, **168(6)**. 510-522.

Echaveguren, T., y S. Vargas-Tejeda (2013) A model for estimating advisory speeds for horizontal curves in two-lane rural roads. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **40(999)**. 1234-1243.

Erdfelder, E., F. Faul y A. Buchner (1996) GPOWER: A general power analysis program. **Behavior Research Methods, Instruments & Computers**, **28**. 1-11.

Felipe, E. y F. Navin (1998) Automobiles on Horizontal Curves Experiments and Observations. **Transportation Research Record**, **1628**. 50-56.

Glaser, S., y V. Aguilera (2003) Vehicle-infrastructure-driver speed profile: towards the next generation of curve warning systems. **In Proc. 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services**. Madrid. España. Noviembre.

Gujarati, D. N. (2003) **Basics Econometrics**. 4th. McGraw-Hill. Nueva York.

Hasan, N. (2014) Spiral Length Design. **Journal of Transportation Engineering**, 140(5). 04014006.

Herrin, G. y J. Neuhardt (1974) An Empirical Model for Automobile Driver Horizontal Curve Negotiation. **Human Factors**, 16(2). 129-133

Jiménez, F., F. Aparicio, y J. Paez (2008) Evaluation of in-vehicle dynamic speed assistance in Spain: algorithm and driver behaviour. **Intelligent Transport Systems, IET**, 2(2). 132-142.

Kenda, J., y J. Kopač (2011) Measurements and analyses of lateral acceleration in traffic of vehicles. **Tehnički vjesnik**, 18(2). 281-286.

Lamm, R., E. Choueiri y J. Hayward (1988) Tangent as an independent design element. **Transportation Research Record**, 1195. 123 – 131.

MathWave Technologies (2010) **EasyFit Professional v. 5.5**. Ucrania.

McDonald, J. B. (1984) Some generalized functions for the size distribution of income. **Econometrica**, 52 (3). 647-663.

Ministerio de Obras Públicas, MOP (2015) **Instrucciones y Criterios de Diseño**. Manual de Carreteras, Volumen 3. Santiago.

Minitab Inc. (2007) **Software para estadísticas de Minitab**, Versión 16 para Windows. State College, Pennsylvania.

Neuhardt, J. B., y H. E. Bradley (1971) On the selection of multi-factor experimental arrangements with resource constraints. **Journal of the American Statistical Association**, **66(335)**. 618-621.

Neukum, A., E. Ufer, J. Paulig, y H. P. Kruger (2008) Controllability of superposition steering system failures. **Steering tech**.

Racelogic (2008). **VBOX Mini User Guide**. Reino Unido.

Reymond, G., A. Kemeny, J. Droulez y A. Berthoz (2001) Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator. **Human Factors**, **43**. 483–495.

Ritchie, M., W. McCoy y W. Welde (1968) A Study of the Relation between Forward Velocity and Lateral Acceleration in Curves During Normal Driving. **Human Factors**, **10(3)**. 255-258

Singhi, S. K., y G. S. Maddala (1976) A function for the size distribution of incomes. **Econometrica**, **44(5)**. 963-970.

Syed, L. (2006) **Experimental Investigation of Vehicle's Lateral Acceleration on Highway Horizontal Curves**. Published MSc. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Carleton University. Ottawa. Canada.

Xu, J., K. Yang, Y. Shao y G. Lu (2015) An experimental study on lateral acceleration of cars in different environments in Sichuan, Southwest China. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, 2015.

ANEXOS

ANEXO 5.1 Distribuciones de probabilidad y test de bondad de ajuste

En la presente sección se listan las distribuciones de probabilidad que se probaron en la base de datos de trabajo. Este proceso fue realizado mediante el *software* EasyFit, el cual evalúa la bondad de ajuste mediante tres test estadísticos.

Las funciones de distribución de probabilidad, pdf, que se ajustaron a los datos del presente estudio, son las siguientes:

1. *Beta*
2. *Johnson SB*
3. *Kumaraswamy*
4. *Pert*
5. *Power Function*
6. *Reciprocal*
7. *Triangular*
8. *Uniform*
9. *Cauchy*
10. *Error*
11. *Error Function*
12. *Gumbel Max*
13. *Gumbel Min*
14. *Hyperbolic Secant*
15. *Johnson SU*
16. *Laplace (Double Exponential)*
17. *Logistic*
18. *Normal*
19. *Student's t*
20. *Burr*
21. *Chi-Squared*
22. *Dagum*
23. *Erlang*
24. *Exponential*
25. *F Distribution*
26. *Fatigue Life (Birnbaum-Saunders)*
27. *Frechet*
28. *Gamma*
29. *Generalized Gamma*
30. *Inverse Gaussian*
31. *Levy*
32. *Log-Gamma*
33. *Log-Logistic*
34. *Lognormal*
35. *Nakagami*
36. *Pareto (First Kind)*
37. *Pareto (Second Kind)*
38. *Pearson Type 5*
39. *Pearson Type 6*
40. *Rayleigh*



- | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| 41. <i>Rice</i> | 46. <i>Log-Pearson 3</i> |
| 42. <i>Weibull</i> | 47. <i>Phased Bi-Exponential</i> |
| 43. <i>Generalized Extreme Value</i> | 48. <i>Phased Bi-Weibull</i> |
| 44. <i>Generalized Logistic</i> | 49. <i>Wakeby</i> |
| 45. <i>Generalized Pareto</i> | |

Los test estadísticos utilizados para evaluar la bondad de ajuste son:

- a) Kolmogorov-Smirnov: Es una prueba que se utiliza para decidir si una muestra procede o no de una distribución continua de hipótesis.
- b) Anderson-Darling: Es un test que compara el ajuste de una función de distribución acumulada observada con una función de distribución acumulada esperada. Esta prueba da más peso a las colas que la prueba de Kolmogorov-Smirnov.
- c) Chi-Cuadrado: Es una prueba que se usa para determinar si una muestra proviene o no de una población con distribución específica. Se aplica sólo a datos agrupados.

ANEXO 5.2 Ranking de distribuciones según estadístico Anderson-Darling

En la Tabla A.5.1, se muestran los resultados del test Anderson-Darling para cada punto característico en las 23 curvas del estudio. Estos resultados llevaron a escoger la distribución Burr 4P como la que mejor se ajusta a los datos de aceleración lateral.

Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	1			2			3			4			5		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
PC-200	Error	0,39222	1	Dagum (4P)	0,27214	1	Dagum (4P)	0,75132	1	Fatigue Life (3P)	0,40803	1	Error	0,75658	1
	Hypersecant	0,41857	2	Weibull (3P)	0,31377	2	Gen. Logistic	0,89489	2	Pearson 6 (4P)	0,40839	2	Johnson SU	0,77076	2
	Dagum (4P)	0,45316	3	Burr (4P)	0,31462	3	Burr (4P)	0,91501	3	Gen. Gamma (4P)	0,40967	3	Burr (4P)	0,77775	3
	Burr (4P)	0,47147	4	Johnson SB	0,34906	4	Johnson SU	1,0043	4	Inv. Gaussian (3P)	0,413	4	Log-Logistic (3P)	0,84579	4
PC-100	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	0,21122	1	Burr (4P)	0,33169	1	Burr (4P)	0,77163	1	Gen. Logistic	0,31896	1	Error	0,3898	1
	Normal	0,21689	2	Johnson SU	0,40386	2	Johnson SU	0,77579	2	Dagum (4P)	0,36944	2	Johnson SU	0,39983	2
	Error	0,21743	3	Dagum (4P)	0,45901	3	Beta	0,80712	3	Burr (4P)	0,40338	3	Beta	0,41886	3
PC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Hypersecant	0,29624	1	Gen. Extreme Value	0,21802	1	Dagum (4P)	0,53272	1	Log-Logistic (3P)	0,30587	1	Dagum (4P)	0,32027	1
	Error	0,32676	2	Pearson 5 (3P)	0,28031	2	Burr (4P)	0,57529	2	Burr (4P)	0,32196	2	Johnson SB	0,67878	2
	Dagum (4P)	0,33736	3	Pearson 6 (4P)	0,28164	3	Log-Logistic (3P)	0,5762	3	Dagum (4P)	0,33262	3	Kumaraswamy	0,72486	3
INT1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Johnson SB	0,22358	1	Gen. Extreme Value	0,35974	1	Dagum (4P)	0,63487	1	Johnson SU	0,2646	1	Burr (4P)	0,32809	1
	Normal	0,23164	2	Johnson SU	0,52481	2	Log-Logistic (3P)	0,6949	2	Error	0,35914	2	Dagum (4P)	0,35874	2
	Error	0,23635	3	Dagum (4P)	0,56109	3	Gen. Logistic	0,7212	3	Fatigue Life (3P)	0,36886	3	Johnson SU	0,35938	3
MC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,27126	1	Dagum (4P)	0,51507	1	Johnson SB	0,34125	1	Dagum (4P)	0,26481	1	Gamma (3P)	0,27624	1
	Burr (4P)	0,30648	2	Dagum (4P)	0,55099	2	Beta	0,35016	2	Log-Logistic (3P)	0,28576	2	Lognormal (3P)	0,27763	2
	Weibull (3P)	0,33099	3	Burr (4P)	0,69942	3	Gen. Extreme Value	0,35079	3	Gen. Logistic	0,28862	3	Pearson 5 (3P)	0,28007	3
INT2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gen. Gamma (4P)	0,33108	4	Logistic	0,82658	4	Gen. Gamma (4P)	0,35394	4	Burr (4P)	0,29458	4	Johnson SU	0,28033	4
	Burr (4P)	0,45111	1	Johnson SU	0,33563	1	Dagum (4P)	0,26987	1	Johnson SU	0,17526	1	Dagum (4P)	0,29948	1
	Gen. Gamma (4P)	0,45697	2	Burr (4P)	0,35196	2	Gen. Logistic	0,32368	2	Dagum (4P)	0,19541	2	Johnson SU	0,30167	2
FC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Weibull (3P)	0,46875	3	Gen. Logistic	0,3958	3	Burr (4P)	0,38369	3	Error	0,21417	3	Gen. Extreme Value	0,34899	3
	Beta	0,47593	4	Dagum (4P)	0,41357	4	Log-Logistic (3P)	0,45893	4	Gen. Gamma (4P)	0,25451	4	Burr (4P)	0,40679	4
	Johnson SU	0,27226	1	Johnson SU	0,37069	1	Burr (4P)	1,1047	1	Dagum (4P)	0,32221	1	Dagum (4P)	0,55918	1
INT3	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Log-Logistic (3P)	0,29589	2	Gamma (3P)	0,37157	2	Dagum (4P)	1,1901	2	Gen. Logistic	0,3501	2	Triangular	1,3388	2
	Dagum (4P)	0,29713	3	Lognormal (3P)	0,37399	3	Log-Logistic (3P)	1,226	3	Log-Logistic (3P)	0,37286	3	Kumaraswamy	1,7852	3
	Burr (4P)	0,30601	4	Pearson 6 (4P)	0,37434	4	Gen. Logistic	1,3712	4	Burr (4P)	0,40666	4	Beta	1,8891	4
INT3	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	0,31246	1	Burr (4P)	0,43612	1	Burr (4P)	0,16989	1	Gen. Logistic	0,30705	1	Error	0,36629	1
	Lognormal (3P)	0,33574	2	Johnson SU	0,45683	2	Johnson SU	0,1874	2	Dagum (4P)	0,38052	2	Dagum (4P)	0,39306	2
	Fatigue Life (3P)	0,33589	3	Beta	0,49883	3	Gen. Logistic	0,20522	3	Burr (4P)	0,39121	3	Log-Logistic (3P)	0,4128	3
Gamma (3P)	0,33653	4	Normal	0,58186	4	Dagum (4P)	0,23101	4	Log-Logistic (3P)	0,44738	4	Gen. Logistic	0,42539	4	

Continuación Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	1			2			3			4			5		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
MT	Dagum (4P)	0,2529	1	Lognormal (3P)	0,31307	1	Johnson SU	0,37522	1	Johnson SU	0,39354	1	Johnson SU	0,47471	1
	Gen. Logistic	0,25486	2	Inv. Gaussian (3P)	0,33288	2	Burr (4P)	0,46846	2	Burr (4P)	0,42226	2	Burr (4P)	0,47772	2
	Log-Logistic (3P)	0,25944	3	Fatigue Life (3P)	0,33862	3	Log-Logistic (3P)	0,55619	3	Error	0,44166	3	Gen. Logistic	0,48451	3
	Burr (4P)	0,26412	4	Gen. Extreme Value	0,34376	4	Dagum (4P)	0,56508	4	Log-Logistic (3P)	0,44521	4	Dagum (4P)	0,53598	4
INT4	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Log-Logistic (3P)	0,31218	1	Burr (4P)	0,30315	1	Burr (4P)	0,36939	1	Pearson 6 (4P)	0,56325	1	Fatigue Life (3P)	0,407	1
	Burr (4P)	0,31814	2	Dagum (4P)	0,30323	2	Gen. Logistic	0,39233	2	Lognormal (3P)	0,56346	2	Pearson 6 (4P)	0,41272	2
	Gen. Logistic	0,32125	3	Error	0,36081	3	Dagum (4P)	0,40081	3	Fatigue Life (3P)	0,56495	3	Inv. Gaussian (3P)	0,41392	3
PC2	Dagum (4P)	0,32531	4	Gen. Logistic	0,36659	4	Log-Logistic (3P)	0,43834	4	Gen. Gamma (4P)	0,57179	4	Gen. Gamma (4P)	0,42059	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,2246	1	Dagum (4P)	0,25678	1	Dagum (4P)	0,46623	1	Johnson SU	0,39626	1	Gen. Logistic	0,22141	1
	Burr (4P)	0,23607	2	Johnson SB	0,58825	2	Johnson SU	0,61818	2	Beta	0,42303	2	Log-Logistic (3P)	0,22507	2
INT5	Log-Logistic (3P)	0,23984	3	Weibull (3P)	0,5987	3	Burr (4P)	0,85762	3	Burr (4P)	0,42612	3	Dagum (4P)	0,24163	3
	Hypersecant	0,23988	4	Burr (4P)	0,60459	4	Log-Logistic (3P)	1,9591	4	Weibull (3P)	0,46596	4	Burr (4P)	0,25363	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	0,4115	1	Error	0,22827	1	Gen. Logistic	0,48228	1	Dagum (4P)	0,76175	1	Dagum (4P)	0,43917	1
MC2	Dagum (4P)	0,42878	2	Burr (4P)	0,23297	2	Beta	0,55588	2	Burr (4P)	1,2836	2	Gen. Gamma (4P)	0,52073	2
	Weibull (3P)	0,43551	3	Johnson SU	0,26081	3	Burr (4P)	0,56683	3	Weibull (3P)	1,3565	3	Johnson SB	0,65571	3
	Kumaraswamy	0,43993	4	Dagum (4P)	0,26354	4	Dagum (4P)	0,60469	4	Johnson SU	1,3745	4	Kumaraswamy	0,69094	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
Weibull (3P)	0,53193	1	Dagum (4P)	0,44631	1	Kumaraswamy	0,28007	1	Dagum (4P)	0,28893	1	Lognormal (3P)	0,26131	1	
Burr (4P)	0,53353	2	Johnson SB	0,49023	2	Johnson SB	0,29284	2	Burr (4P)	0,52738	2	Pearson 6 (4P)	0,26157	2	
INT6	Kumaraswamy	0,53825	3	Kumaraswamy	0,58278	3	Beta	0,29606	3	Gen. Logistic	0,62157	3	Pearson 5 (3P)	0,26177	3
	Beta	0,56743	4	Gen. Extreme Value	0,66884	4	Burr (4P)	0,30132	4	Johnson SU	0,78674	4	Fatigue Life (3P)	0,26265	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gen. Logistic	0,4098	1	Gamma (3P)	0,26308	1	Burr (4P)	0,33251	1	Dagum (4P)	0,34502	1	Pearson 6 (4P)	0,13538	1
FC2	Beta	0,48529	2	Gen. Extreme Value	0,26542	2	Weibull (3P)	0,34645	2	Kumaraswamy	0,46021	2	Lognormal (3P)	0,13559	2
	Johnson SB	0,48808	3	Johnson SU	0,27699	3	Kumaraswamy	0,3534	3	Burr (4P)	0,46126	3	Fatigue Life (3P)	0,13595	3
	Burr (4P)	0,50923	4	Lognormal (3P)	0,27873	4	Johnson SB	0,38134	4	Weibull (3P)	0,46474	4	Gen. Gamma (4P)	0,13784	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
Gen. Logistic	0,46484	1	Dagum (4P)	0,32765	1	Dagum (4P)	0,86727	1	Dagum (4P)	0,23208	1	Fatigue Life (3P)	1,553	1	
Weibull (3P)	0,97111	2	Gen. Logistic	0,44641	2	Burr (4P)	1,5367	2	Weibull (3P)	0,58498	2	Inv. Gaussian (3P)	1,5776	2	
FC2	Burr (4P)	0,98281	3	Johnson SU	1,1539	3	Gumbel Min	1,6214	3	Johnson SB	0,58731	3	Lognormal (3P)	1,6852	3
	Dagum (4P)	1,0468	4	Burr (4P)	1,7187	4	Gen. Logistic	1,6289	4	Kumaraswamy	0,58806	4	Gamma (3P)	1,7474	4

Continuación Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	6			7			8			9			10		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
PC-200	Johnson SU	0,29855	1	Weibull (3P)	0,47224	1	Error	0,36307	1	Burr (4P)	0,43069	1	Burr (4P)	0,2946	1
	Burr (4P)	0,29951	2	Kumaraswamy	0,47418	2	Dagum (4P)	0,41863	2	Gen. Logistic	0,54338	2	Error	0,31087	2
	Beta	0,47141	3	Burr (4P)	0,47986	3	Johnson SU	0,42014	3	Dagum (4P)	0,55417	3	Normal	0,31222	3
	Weibull (3P)	0,51924	4	Error	0,5353	4	Burr (4P)	0,43802	4	Log-Logistic (3P)	0,62449	4	Johnson SB	0,31437	4
PC-100	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	0,23448	1	Gen. Extreme Value	0,35717	1	Gen. Extreme Value	0,34576	1	Johnson SB	0,22511	1	Burr (4P)	0,40306	1
	Johnson SU	0,26613	2	Pearson 5 (3P)	0,41703	2	Pearson 5 (3P)	0,35428	2	Burr (4P)	0,23374	2	Johnson SU	0,4485	2
	Beta	0,32216	3	Gamma (3P)	0,42536	3	Erlang (3P)	0,35512	3	Beta	0,23526	3	Dagum (4P)	0,46934	3
PC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,30669	1	Dagum (4P)	0,41992	1	Pearson 6 (4P)	0,22221	1	Error	0,35435	1	Johnson SU	0,2524	1
	Burr (4P)	0,35091	2	Log-Logistic (3P)	0,42484	2	Fatigue Life (3P)	0,22227	2	Johnson SU	0,3839	2	Beta	0,29293	2
	Weibull (3P)	0,37483	3	Gen. Logistic	0,4254	3	Lognormal (3P)	0,22236	3	Burr (4P)	0,41076	3	Burr (4P)	0,31631	3
INT1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Johnson SB	0,46209	1	Wakeby	1,8332	1	Wakeby	0,88898	1	Johnson SU	0,17602	1	Error	0,33123	1
	Gen. Extreme Value	0,66173	2	Cauchy	6,9689	2	Burr (4P)	10,638	2	Burr (4P)	0,17622	2	Burr (4P)	0,34151	2
	Beta	0,75485	3	Dagum (4P)	14,508	3	Kumaraswamy	10,821	3	Beta	0,21123	3	Dagum (4P)	0,36431	3
MC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gen. Extreme Value	0,53877	1	Wakeby	2,2729	1	Wakeby	2,8325	1	Burr (4P)	0,30555	1	Burr (4P)	0,45904	1
	Pearson 5 (3P)	0,60833	2	Cauchy	6,2275	2	Cauchy	10,459	2	Johnson SB	0,32801	2	Johnson SU	0,51349	2
	Lognormal (3P)	0,61693	3	Dagum (4P)	12,694	3	Dagum (4P)	17,967	3	Weibull (3P)	0,32946	3	Dagum (4P)	0,59431	3
INT2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	0,14508	1	Wakeby	1,5388	1	Wakeby	1,9836	1	Error	0,21493	1	Gen. Extreme Value	0,50834	1
	Johnson SU	0,16709	2	Cauchy	9,9087	2	Cauchy	12,638	2	Johnson SB	0,223	2	Dagum (4P)	0,53179	2
	Error	0,20146	3	Gen. Logistic	14,488	3	Dagum (4P)	16,54	3	Gen. Extreme Value	0,23144	3	Log-Logistic (3P)	0,56027	3
FC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	1,48	1	Burr (4P)	0,88359	1	Log-Logistic (3P)	0,5844	1	Dagum (4P)	0,22216	1	Dagum (4P)	1,5178	1
	Kumaraswamy	3,1728	2	Hypersecant	1,0559	2	Gen. Logistic	0,63159	2	Gen. Logistic	0,41349	2	Weibull (3P)	3,4018	2
	Weibull (3P)	3,5987	3	Log-Logistic (3P)	1,1043	3	Burr (4P)	0,64413	3	Burr (4P)	0,46529	3	Kumaraswamy	3,4156	3
INT3	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Johnson SB	0,33816	1	Kumaraswamy	0,39218	1	Burr (4P)	0,33775	1						
	Gen. Extreme Value	0,34349	2	Weibull (3P)	0,39684	2	Johnson SU	0,44654	2						
	Beta	0,36876	3	Burr (4P)	0,40152	3	Dagum (4P)	0,46762	3						

Continuación Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	6			7			8			9			10		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
MT	Dagum (4P)	0,25953	1	Burr (4P)	0,30689	1	Log-Logistic (3P)	0,53538	1	Burr (4P)	0,25028	1	Johnson SU	0,17206	1
	Burr (4P)	0,27695	2	Gen. Logistic	0,32731	2	Gen. Logistic	0,55464	2	Gen. Logistic	0,29036	2	Burr (4P)	0,18423	2
	Log-Logistic (3P)	0,28214	3	Log-Logistic (3P)	0,33072	3	Dagum (4P)	0,6246	3	Log-Logistic (3P)	0,29452	3	Pearson 6 (4P)	0,23246	3
	Gen. Logistic	0,29672	4	Dagum (4P)	0,34904	4	Logistic	0,74505	4	Dagum (4P)	0,30012	4	Lognormal (3P)	0,23342	4
INT4	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,33401	1	Johnson SU	0,27728	1	Burr (4P)	0,20782	1						
	Johnson SU	0,34996	2	Lognormal (3P)	0,28253	2	Beta	0,22382	2						
	Log-Logistic (3P)	0,36822	3	Fatigue Life (3P)	0,28456	3	Gen. Gamma (4P)	0,22605	3						
PC2	Burr (4P)	0,36834	4	Pearson 6 (4P)	0,28479	4	Johnson SB	0,2325	4						
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gamma (3P)	0,20979	1	Hypersecant	0,58994	1	Gen. Logistic	0,43441	1	Dagum (4P)	0,34694	1	Burr (4P)	0,40241	1
	Lognormal (3P)	0,21341	2	Dagum (4P)	0,66489	2	Dagum (4P)	0,54602	2	Burr (4P)	0,36678	2	Gen. Logistic	0,43549	2
INT5	Fatigue Life (3P)	0,2143	3	Error	0,77918	3	Burr (4P)	0,71442	3	Gen. Extreme Value	0,43103	3	Log-Logistic (3P)	0,444	3
	Pearson 6 (4P)	0,21473	4	Log-Logistic (3P)	0,80655	4	Log-Logistic (3P)	0,80834	4	Log-Logistic (3P)	0,44878	4	Dagum (4P)	0,45431	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Error	0,3737	1	Burr (4P)	2,5948	1	Burr (4P)	1,16	1	Johnson SU	0,22748	1	Burr (4P)	0,28265	1
MC2	Log-Logistic (3P)	0,38043	2	Dagum (4P)	3,5541	2	Gen. Logistic	1,6825	2	Gen. Extreme Value	0,26083	2	Gen. Logistic	0,30399	2
	Gen. Logistic	0,41317	3	Log-Logistic (3P)	3,7387	3	Dagum (4P)	1,7095	3	Dagum (4P)	0,273	3	Log-Logistic (3P)	0,30629	3
	Johnson SU	0,44948	4	Cauchy	5,3136	4	Wakeby	1,829	4	Pearson 6 (4P)	0,3135	4	Dagum (4P)	0,32262	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
INT6	Lognormal (3P)	0,25825	1	Burr (4P)	5,0414	1	Burr (4P)	4,0708	1	Gen. Extreme Value	0,3469	1	Lognormal (3P)	0,30124	1
	Johnson SU	0,26687	2	Cauchy	5,718	2	Wakeby	4,3462	2	Dagum (4P)	0,3975	2	Fatigue Life (3P)	0,30212	2
	Gamma (3P)	0,27271	3	Dagum (4P)	6,1045	3	Gen. Logistic	4,8237	3	Johnson SB	0,44789	3	Pearson 6 (4P)	0,30223	3
	Erlang (3P)	0,27851	4	Wakeby	6,1396	4	Dagum (4P)	4,8825	4	Pearson 5 (3P)	0,45586	4	Pearson 5 (3P)	0,3024	4
FC2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Johnson SB	0,21814	1	Burr (4P)	1,5973	1	Burr (4P)	2,9829	1	Gen. Extreme Value	0,17038	1	Burr (4P)	0,23827	1
	Beta	0,21981	2	Log-Logistic (3P)	1,808	2	Dagum (4P)	4,3123	2	Johnson SB	0,24776	2	Dagum (4P)	0,2838	2
	Weibull (3P)	0,25672	3	Gen. Logistic	1,8367	3	Gen. Extreme Value	4,6769	3	Gamma (3P)	0,2872	3	Johnson SU	0,31031	3
FC2	Burr (4P)	0,25724	4	Dagum (4P)	1,91	4	Log-Logistic (3P)	4,9423	4	Gen. Gamma (4P)	0,29372	4	Gen. Gamma (4P)	0,32277	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	0,71245	1	Dagum (4P)	0,22483	1	Dagum (4P)	0,33745	1	Gen. Logistic	0,54767	1	Burr (4P)	0,18782	1
	Gen. Logistic	0,82807	2	Gen. Logistic	0,33793	2	Burr (4P)	0,96658	2	Burr (4P)	0,61559	2	Pearson 6 (4P)	0,21065	2
FC2	Dagum (4P)	0,83893	3	Burr (4P)	0,38822	3	Johnson SB	0,99011	3	Dagum (4P)	0,69716	3	Lognormal (3P)	0,21282	3
	Log-Logistic (3P)	0,91369	4	Johnson SU	0,54134	4	Weibull (3P)	0,99159	4	Log-Logistic (3P)	0,84794	4	Pearson 5 (3P)	0,21303	4

Continuación Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	11			12			13			14			15		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
PC-200	Burr (4P)	0,37846	1	Log-Logistic (3P)	0,41937	1	Johnson SU	0,38942	1	Dagum (4P)	0,27132	1	Burr (4P)	0,26994	1
	Log-Logistic (3P)	0,4235	2	Gen. Logistic	0,43944	2	Burr (4P)	0,40975	2	Burr (4P)	0,29553	2	Johnson SU	0,28354	2
	Dagum (4P)	0,43498	3	Dagum (4P)	0,44215	3	Error	0,47225	3	Johnson SU	0,37035	3	Error	0,28402	3
	Johnson SU	0,4851	4	Burr (4P)	0,51401	4	Beta	0,52961	4	Error	0,46619	4	Fatigue Life (3P)	0,28844	4
PC-100	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	0,39673	1	Kumaraswamy	0,45597	1	Dagum (4P)	0,39549	1	Dagum (4P)	0,30465	1	Dagum (4P)	0,42216	1
	Johnson SB	0,41799	2	Weibull (3P)	0,45801	2	Burr (4P)	0,42679	2	Gen. Logistic	0,40682	2	Burr (4P)	0,45013	2
	Beta	0,42948	3	Burr (4P)	0,46087	3	Weibull (3P)	0,47463	3	Burr (4P)	0,4131	3	Normal	0,66651	3
Dagum (4P)	0,48048	4	Johnson SB	0,51575	4	Normal	0,48237	4	Log-Logistic (3P)	0,48651	4	Beta	0,74362	4	
PC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,30467	1	Johnson SB	0,1933	1	Dagum (4P)	0,48549	1	Burr (4P)	0,59868	1	Burr (4P)	0,47767	1
	Gen. Logistic	0,41789	2	Beta	0,20251	2	Burr (4P)	1,0281	2	Dagum (4P)	0,831	2	Dagum (4P)	0,48099	2
	Burr (4P)	0,43812	3	Burr (4P)	0,21866	3	Johnson SB	1,2494	3	Dagum (4P)	0,83337	3	Johnson SB	0,50969	3
Johnson SU	0,79346	4	Weibull (3P)	0,23408	4	Weibull (3P)	1,3156	4	Gen. Logistic	0,97466	4	Beta	0,52339	4	
INT1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Pearson 6 (4P)	0,12975	1	Gen. Logistic	0,23541	1	Dagum (4P)	0,858	1	Burr (4P)	0,14613	1	Dagum (4P)	0,61653	1
	Fatigue Life (3P)	0,13056	2	Dagum (4P)	0,27745	2	Log-Logistic (3P)	0,8585	2	Johnson SU	0,19752	2	Burr (4P)	0,89474	2
	Burr (4P)	0,1351	3	Log-Logistic (3P)	0,39756	3	Burr (4P)	0,8823	3	Log-Logistic (3P)	0,2066	3	Gen. Extreme Value	0,94147	3
Gen. Gamma (4P)	0,13651	4	Johnson SU	0,40104	4	Gen. Logistic	0,89916	4	Gen. Logistic	0,20799	4	Pearson 5 (3P)	0,96084	4	
MC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Fatigue Life (3P)	0,16887	1	Dagum (4P)	0,28884	1	Gen. Gamma (4P)	0,29184	1	Johnson SU	0,25202	1	Burr (4P)	2,683	1
	Johnson SU	0,17403	2	Burr (4P)	0,33736	2	Error	0,30021	2	Burr (4P)	0,27041	2	Dagum (4P)	3,6438	2
	Error	0,18464	3	Burr (4P)	0,34236	3	Fatigue Life (3P)	0,3018	3	Log-Logistic (3P)	0,4104	3	Log-Logistic (3P)	3,9013	3
Lognormal (3P)	0,18633	4	Dagum (4P)	0,42342	4	Inv. Gaussian (3P)	0,31224	4	Error	0,41873	4	Gen. Extreme Value	4,4209	4	
INT2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gen. Extreme Value	0,71093	1	Burr (4P)	0,12104	1	Johnson SU	0,32361	1	Gen. Extreme Value	0,1719	1	Burr (4P)	1,275	1
	Pearson 5 (3P)	0,81558	2	Gen. Logistic	0,12792	2	Lognormal (3P)	0,33491	2	Johnson SB	0,18423	2	Gen. Logistic	1,3327	2
	Gen. Gamma (4P)	0,83254	3	Log-Logistic (3P)	0,12866	3	Gen. Gamma (4P)	0,33711	3	Weibull (3P)	0,20444	3	Dagum (4P)	1,3512	3
Gamma (3P)	0,83793	4	Dagum (4P)	0,13303	4	Pearson 6 (4P)	0,34027	4	Burr (4P)	0,21255	4	Log-Logistic (3P)	1,3523	4	
FC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gen. Logistic	0,60292	1	Johnson SB	0,53751	1	Dagum (4P)	1,6622	1	Gen. Extreme Value	0,33172	1	Gen. Logistic	0,14154	1
	Dagum (4P)	0,61068	2	Gen. Extreme Value	0,60103	2	Beta	3,52	2	Dagum (4P)	0,35469	2	Dagum (4P)	0,15784	2
	Gumbel Min	1,0069	3	Beta	0,65372	3	Kumaraswamy	3,6117	3	Log-Logistic (3P)	0,39213	3	Johnson SU	0,20515	3
Burr (4P)	1,0982	4	Gen. Gamma (4P)	0,79021	4	Burr (4P)	4,5547	4	Pearson 5 (3P)	0,41714	4	Log-Logistic (3P)	0,26417	4	
INT3	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Johnson SU	0,27998	1	Johnson SU	0,21414	1	Johnson SU	0,18579	1						
	Burr (4P)	0,31263	2	Burr (4P)	0,2433	2	Dagum (4P)	0,24532	2						
	Beta	0,38718	3	Error	0,25797	3	Burr (4P)	0,26028	3						
Gen. Logistic	0,58356	4	Beta	0,28156	4	Log-Logistic (3P)	0,34748	4							

Continuación Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	11			12			13			14			15		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
MT	Johnson SB	0,2284	1	Johnson SB	0,45981	1	Burr (4P)	0,3244	1	Gen. Extreme Value	0,27089	1	Error	0,2908	1
	Beta	0,23657	2	Beta	0,46196	2	Gen. Logistic	0,38459	2	Johnson SB	0,34685	2	Fatigue Life (3P)	0,32199	2
	Gen. Extreme Value	0,26173	3	Gen. Gamma (4P)	0,4742	3	Log-Logistic (3P)	0,39367	3	Fatigue Life (3P)	0,40427	3	Gen. Gamma (4P)	0,33525	3
	Burr (4P)	0,29611	4	Gen. Extreme Value	0,47606	4	Johnson SU	0,79236	4	Lognormal (3P)	0,40565	4	Normal	0,33921	4
INT4	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,28846	1	Burr (4P)	0,2688	1	Gen. Extreme Value	0,26732	1						
	Log-Logistic (3P)	0,30123	2	Johnson SU	0,3329	2	Johnson SB	0,28248	2						
	Gen. Logistic	0,30237	3	Dagum (4P)	0,34399	3	Beta	0,31793	3						
PC2	Burr (4P)	0,31283	4	Gen. Logistic	0,45976	4	Gen. Gamma (4P)	0,33216	4						
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gen. Extreme Value	0,95811	1	Dagum (4P)	0,56617	1	Burr (4P)	0,28241	1	Dagum (4P)	0,1812	1	Johnson SB	0,25494	1
	Dagum (4P)	1,2324	2	Burr (4P)	1,5288	2	Dagum (4P)	0,34259	2	Johnson SU	0,25725	2	Kumaraswamy	0,32085	2
INT5	Pearson 5 (3P)	1,3812	3	Weibull (3P)	1,6908	3	Gen. Logistic	0,34429	3	Burr (4P)	0,30119	3	Beta	0,34212	3
	Pearson 6 (4P)	1,3843	4	Kumaraswamy	1,7391	4	Log-Logistic (3P)	0,37349	4	Gen. Logistic	0,30486	4	Gen. Extreme Value	0,38842	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Johnson SB	0,29983	1	Lognormal (3P)	0,43022	1	Burr (4P)	0,20454	1	Error	0,2686	1	Dagum (4P)	1,9453	1
MC2	Beta	0,31204	2	Fatigue Life (3P)	0,46726	2	Johnson SB	0,24744	2	Johnson SB	0,2866	2	Gen. Logistic	2,1123	2
	Error	0,32621	3	Inv. Gaussian (3P)	0,47935	3	Beta	0,27165	3	Beta	0,31038	3	Burr (4P)	3,2468	3
	Burr (4P)	0,32959	4	Gamma (3P)	0,49352	4	Dagum (4P)	0,30106	4	Gen. Extreme Value	0,38056	4	Log-Logistic (3P)	3,7972	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
INT6	Johnson SB	0,28713	1	Lognormal (3P)	0,23088	1	Burr (4P)	0,31908	1	Johnson SU	0,0814	1	Gen. Logistic	1,7337	1
	Beta	0,30902	2	Gen. Gamma (4P)	0,23695	2	Burr (4P)	0,32557	2	Fatigue Life (3P)	0,08209	2	Burr (4P)	4,4605	2
	Burr (4P)	0,31189	3	Fatigue Life (3P)	0,24129	3	Dagum (4P)	0,34387	3	Lognormal (3P)	0,08215	3	Weibull (3P)	4,7735	3
	Weibull (3P)	0,47265	4	Error	0,24656	4	Dagum (4P)	0,36401	4	Pearson 6 (4P)	0,08219	4	Kumaraswamy	4,8911	4
FC2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Johnson SU	0,34027	1	Johnson SB	0,58976	1	Johnson SB	0,27473	1	Johnson SB	0,88036	1	Wakeby	0,32995	1
	Beta	0,39031	2	Gen. Extreme Value	0,60837	2	Beta	0,29925	2	Gen. Extreme Value	0,97475	2	Hypersecant	1,6942	2
	Gen. Gamma (4P)	0,50032	3	Burr (4P)	0,60837	3	Log-Pearson 3	0,31056	3	Gamma (3P)	1,1776	3	Burr (4P)	1,9822	3
FC2	Gen. Logistic	0,53502	4	Weibull (3P)	0,61868	4	Gen. Extreme Value	0,31665	4	Beta	1,1874	4	Gen. Logistic	2,0238	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gen. Extreme Value	0,31373	1	Dagum (4P)	2,127	1	Wakeby	0,64555	1	Dagum (4P)	0,28819	1	Dagum (4P)	0,32462	1
	Fatigue Life (3P)	0,38792	2	Beta	3,3804	2	Frechet (3P)	1,004	2	Burr (4P)	0,46395	2	Gen. Logistic	0,33487	2
FC2	Lognormal (3P)	0,39612	3	Kumaraswamy	3,5444	3	Dagum (4P)	1,0249	3	Weibull (3P)	0,46949	3	Log-Logistic (3P)	0,33964	3
	Gamma (3P)	0,39749	4	Gumbel Min	4,4701	4	Gen. Extreme Value	1,0733	4	Kumaraswamy	0,48294	4	Error	0,3444	4

Continuación Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	16			17			18			19			20		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
PC-200	Johnson SB	0,64797	1	Log-Logistic (3P)	0,52411	1	Error	0,67657	1	Error	0,35224	1	Dagum (4P)	0,53028	1
	Gen. Gamma (4P)	0,64963	2	Gen. Logistic	0,5309	2	Laplace	0,67657	2	Log-Logistic (3P)	0,39692	2	Gen. Logistic	0,53492	2
	Beta	0,65091	3	Burr (4P)	0,53325	3	Johnson SU	0,85933	3	Dagum (4P)	0,41157	3	Burr (4P)	0,55442	3
	Burr (4P)	0,67964	4	Dagum (4P)	0,53593	4	Dagum (4P)	1,0204	4	Johnson SU	0,42594	4	Error	0,57476	4
PC-100	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Normal	1,4574	1	Dagum (4P)	0,5744	1	Dagum (4P)	0,46024	1	Dagum (4P)	0,25725	1	Burr (4P)	0,28183	1
	Beta	1,4587	2	Error	0,59446	2	Gen. Logistic	0,4694	2	Gen. Logistic	0,25967	2	Gen. Logistic	0,29625	2
	Burr (4P)	1,4596	3	Burr (4P)	0,60187	3	Burr (4P)	0,50263	3	Log-Logistic (3P)	0,26109	3	Log-Logistic (3P)	0,29884	3
PC1	Gen. Gamma (4P)	1,4672	4	Log-Logistic (3P)	0,60393	4	Johnson SU	0,53627	4	Logistic	0,29399	4	Dagum (4P)	0,31606	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Lognormal (3P)	0,81013	1	Dagum (4P)	0,3353	1	Dagum (4P)	0,50314	1	Dagum (4P)	0,42416	1	Dagum (4P)	0,45503	1
	Gen. Extreme Value	0,81041	2	Johnson SU	0,39283	2	Johnson SU	0,52542	2	Gen. Logistic	0,52182	2	Gen. Logistic	0,62126	2
INT1	Pearson 6 (4P)	0,82709	3	Burr (4P)	0,42117	3	Gen. Logistic	0,58583	3	Burr (4P)	0,68358	3	Burr (4P)	0,62574	3
	Johnson SB	0,84327	4	Log-Logistic (3P)	0,44007	4	Log-Logistic (3P)	0,58593	4	Johnson SU	1,1745	4	Error	0,66605	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	1,1935	1	Dagum (4P)	0,46188	1	Gen. Extreme Value	0,3348	1	Burr (4P)	0,26212	1	Gen. Logistic	1,2376	1
MC1	Beta	1,223	2	Gen. Logistic	0,6009	2	Johnson SB	0,41713	2	Weibull (3P)	0,2625	2	Dagum (4P)	1,4878	2
	Weibull (3P)	1,2862	3	Hypersecant	0,62471	3	Lognormal (3P)	0,46086	3	Johnson SB	0,27891	3	Burr (4P)	1,5723	3
	Johnson SU	1,3065	4	Burr (4P)	0,70992	4	Pearson 6 (4P)	0,46888	4	Gen. Extreme Value	0,29603	4	Weibull (3P)	1,7315	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
INT2	Gen. Extreme Value	0,39435	1	Johnson SU	0,68878	1	Johnson SB	0,84818	1	Gen. Extreme Value	0,9429	1	Gen. Extreme Value	1,3381	1
	Beta	0,93861	2	Normal	0,70001	2	Pearson 6 (4P)	0,86454	2	Johnson SB	1,0488	2	Inv. Gaussian (3P)	1,3938	2
	Gen. Logistic	1,0756	3	Gen. Extreme Value	0,70494	3	Gamma (3P)	0,91729	3	Gen. Gamma (4P)	1,1606	3	Fatigue Life (3P)	1,3944	3
	Normal	1,5161	4	Error	0,89071	4	Erlang (3P)	0,91914	4	Pearson 5 (3P)	1,1984	4	Normal	1,396	4
INT3	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Johnson SU	0,25976	1	Dagum (4P)	0,23542	1	Burr (4P)	0,30292	1	Wakeby	0,55508	1	Gen. Logistic	0,5511	1
	Beta	0,28138	2	Gen. Logistic	0,30663	2	Dagum (4P)	0,34182	2	Gen. Extreme Value	0,99327	2	Dagum (4P)	0,59572	2
	Burr (4P)	0,31705	3	Log-Logistic (3P)	0,32256	3	Log-Logistic (3P)	0,34322	3	Pearson 5 (3P)	1,2089	3	Burr (4P)	0,70888	3
FC1	Error	0,31857	4	Burr (4P)	0,33079	4	Lognormal (3P)	0,38629	4	Johnson SB	1,2749	4	Johnson SU	0,79352	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	0,98186	1	Dagum (4P)	0,58814	1	Dagum (4P)	0,39793	1	Dagum (4P)	1,0556	1	Weibull (3P)	0,28781	1
	Dagum (4P)	0,99132	2	Kumaraswamy	0,66441	2	Burr (4P)	0,40833	2	Gen. Logistic	1,288	2	Burr (4P)	0,29117	2
INT3	Log-Logistic (3P)	0,99413	3	Weibull (3P)	0,66878	3	Pearson 5 (3P)	0,43637	3	Kumaraswamy	3,1718	3	Dagum (4P)	0,34743	3
	Gen. Logistic	0,99464	4	Burr (4P)	0,69992	4	Gen. Extreme Value	0,45291	4	Weibull (3P)	3,1967	4	Beta	0,41199	4
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,75414	1	Fatigue Life (3P)	0,31882	1	Log-Logistic (3P)	0,21166	1	Error	0,69563	1			
INT3	Gen. Logistic	0,79812	2	Inv. Gaussian (3P)	0,3208	2	Gen. Logistic	0,21495	2	Burr (4P)	0,69989	2			
	Burr (4P)	0,81544	3	Pearson 6 (4P)	0,32101	3	Burr (4P)	0,24368	3	Gen. Logistic	0,71641	3			
	Log-Logistic (3P)	0,91088	4	Gen. Gamma (4P)	0,32544	4	Dagum (4P)	0,24752	4	Dagum (4P)	0,72681	4			

Continuación Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	16			17			18			19			20		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
MT	Johnson SU	0,52327	1	Burr (4P)	0,30128	1	Dagum (4P)	0,27387	1	Dagum (4P)	0,37573	1	Burr (4P)	0,36987	1
	Burr (4P)	0,53008	2	Dagum (4P)	0,32125	2	Burr (4P)	0,28431	2	Gen. Logistic	0,41387	2	Johnson SU	0,38823	2
	Error	0,58161	3	Johnson SU	0,34436	3	Gen. Logistic	0,31645	3	Burr (4P)	0,48285	3	Error	0,39536	3
	Beta	0,66038	4	Error	0,35588	4	Logistic	0,32253	4	Johnson SU	0,69772	4	Log-Logistic (3P)	0,40339	4
INT4	Johnson SU	0,77118	1	Error	0,52964	1	Dagum (4P)	0,97246	1	Johnson SU	0,18513	1			
	Burr (4P)	0,80992	2	Hypersecant	0,56495	2	Gen. Logistic	1,3426	2	Error	0,18892	2			
	Error	0,83793	3	Dagum (4P)	0,60348	3	Johnson SU	1,5216	3	Burr (4P)	0,19087	3			
	Log-Logistic (3P)	0,84289	4	Log-Logistic (3P)	0,62424	4	Burr (4P)	1,5592	4	Normal	0,27478	4			
PC2	Johnson SU	0,69256	1	Burr (4P)	0,56606	1	Burr (4P)	0,2022	1	Gen. Extreme Value	0,35387	1	Dagum (4P)	0,21576	1
	Dagum (4P)	0,7868	2	Log-Logistic (3P)	0,58981	2	Beta	0,24279	2	Pearson 5 (3P)	0,36172	2	Johnson SU	0,23094	2
	Johnson SU	0,80091	3	Gen. Logistic	0,59047	3	Johnson SB	0,24299	3	Gen. Gamma (4P)	0,36217	3	Burr (4P)	0,25301	3
	Burr (4P)	0,81337	4	Dagum (4P)	0,6065	4	Weibull (3P)	0,26479	4	Fatigue Life (3P)	0,36433	4	Log-Logistic (3P)	0,263	4
INT5	Dagum (4P)	0,55941	1	Burr (4P)	0,28589	1	Gen. Extreme Value	0,27339	1	Error	0,28406	1	Gen. Extreme Value	0,30599	1
	Burr (4P)	0,69261	2	Dagum (4P)	0,30368	2	Johnson SB	0,27691	2	Burr (4P)	0,29495	2	Johnson SB	0,31057	2
	Gen. Logistic	0,69514	3	Pearson 5 (3P)	0,32285	3	Error	0,36314	3	Johnson SU	0,33185	3	Beta	0,32082	3
	Johnson SU	0,78253	4	Pearson 6 (4P)	0,3236	4	Beta	0,36678	4	Dagum (4P)	0,35626	4	Burr (4P)	0,33108	4
MC2	Johnson SB	0,46444	1	Burr (4P)	0,60458	1	Burr (4P)	0,31163	1	Lognormal (3P)	0,23433	1	Kumaraswamy	0,33131	1
	Burr (4P)	0,49291	2	Johnson SB	0,74632	2	Johnson SU	0,32493	2	Pearson 6 (4P)	0,23481	2	Gen. Gamma (4P)	0,33324	2
	Gen. Gamma (4P)	0,55282	3	Weibull (3P)	0,77584	3	Gen. Logistic	0,41107	3	Fatigue Life (3P)	0,23495	3	Weibull (3P)	0,33686	3
	Weibull (3P)	0,59329	4	Kumaraswamy	0,79208	4	Dagum (4P)	0,48123	4	Gamma (3P)	0,23724	4	Burr (4P)	0,34263	4
INT6	Johnson SB	0,36311	1	Gen. Logistic	0,23503	1	Johnson SU	0,29054	1	Gen. Extreme Value	0,32172	1	Lognormal (3P)	0,39869	1
	Gen. Gamma (4P)	0,37419	2	Burr (4P)	0,25435	2	Burr (4P)	0,32247	2	Lognormal (3P)	0,35048	2	Fatigue Life (3P)	0,40345	2
	Lognormal (3P)	0,37689	3	Dagum (4P)	0,29894	3	Gen. Logistic	0,39	3	Pearson 6 (4P)	0,35557	3	Log-Logistic (3P)	0,40745	3
	Pearson 6 (4P)	0,37689	4	Johnson SU	0,3948	4	Dagum (4P)	0,41322	4	Fatigue Life (3P)	0,36939	4	Pearson 6 (4P)	0,40934	4
FC2	Dagum (4P)	0,49469	1	Weibull (3P)	0,20506	1	Dagum (4P)	0,49178	1	Dagum (4P)	0,32948	1	Log-Logistic (3P)	0,23525	1
	Burr (4P)	0,5589	2	Kumaraswamy	0,20581	2	Burr (4P)	0,73108	2	Log-Logistic (3P)	0,34183	2	Dagum (4P)	0,23687	2
	Johnson SU	0,63384	3	Burr (4P)	0,20678	3	Gen. Logistic	0,84623	3	Gen. Logistic	0,35798	3	Gen. Logistic	0,2407	3
	Beta	0,68459	4	Johnson SB	0,21211	4	Johnson SB	1,2486	4	Burr (4P)	0,37478	4	Burr (4P)	0,27234	4

Continuación Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	21			22			23		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
PC-200	Dagum (4P)	0,46671	1	Burr (4P)	0,31287	1	Gen. Logistic	0,3412	1
	Burr (4P)	0,69073	2	Johnson SU	0,36138	2	Burr (4P)	0,37158	2
	Logistic	0,72076	3	Error	0,41132	3	Dagum (4P)	0,38101	3
	Gen. Logistic	0,78311	4	Gen. Logistic	0,41565	4	Johnson SU	0,57925	4
PC-100	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Log-Logistic (3P)	0,30977	1	Burr (4P)	0,39814	1	Burr (4P)	0,35968	1
	Gen. Logistic	0,32305	2	Dagum (4P)	0,41146	2	Johnson SU	0,3662	2
	Dagum (4P)	0,33443	3	Log-Logistic (3P)	0,42073	3	Lognormal (3P)	0,37653	3
Burr (4P)	0,39857	4	Error	0,42846	4	Fatigue Life (3P)	0,38486	4	
PC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,26599	1	Dagum (4P)	0,66413	1	Dagum (4P)	0,22207	1
	Burr (4P)	0,3775	2	Gen. Logistic	0,95226	2	Burr (4P)	0,22323	2
	Gen. Logistic	0,43017	3	Burr (4P)	0,98478	3	Johnson SB	0,31029	3
Gumbel Min	0,51685	4	Logistic	1,0082	4	Gen. Logistic	0,32204	4	
INT1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gen. Logistic	0,19483	1	Error	0,50886	1	Dagum (4P)	0,30302	1
	Dagum (4P)	0,25579	2	Kumaraswamy	0,59788	2	Weibull (3P)	0,79974	2
	Burr (4P)	0,29103	3	Weibull (3P)	0,60939	3	Burr (4P)	0,80081	3
Johnson SU	0,55957	4	Burr (4P)	0,62018	4	Kumaraswamy	0,8122	4	
MC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,36895	1	Gen. Extreme Value	0,21896	1	Burr (4P)	0,64195	1
	Gen. Logistic	0,43607	2	Johnson SB	0,22425	2	Dagum (4P)	0,71438	2
	Burr (4P)	0,43906	3	Beta	0,27612	3	Gen. Logistic	0,73676	3
Weibull (3P)	0,66395	4	Weibull (3P)	0,2873	4	Log-Logistic (3P)	0,76082	4	
INT2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,44285	1	Lognormal (3P)	0,44009	1	Johnson SB	0,28508	1
	Burr (4P)	0,4461	2	Gen. Gamma (4P)	0,46167	2	Burr (4P)	0,28688	2
	Log-Logistic (3P)	0,44824	3	Erlang (3P)	0,47672	3	Gen. Logistic	0,29329	3
Gen. Logistic	0,4579	4	Gamma (3P)	0,48792	4	Beta	0,30139	4	
FC1	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,52454	1	Dagum (4P)	1,1399	1	Dagum (4P)	0,3832	1
	Burr (4P)	2,1434	2	Error	1,2586	2	Gen. Logistic	0,4935	2
	Kumaraswamy	2,3168	3	Pert	1,4511	3	Kumaraswamy	1,3931	3
Weibull (3P)	2,3692	4	Kumaraswamy	1,4726	4	Weibull (3P)	1,397	4	
INT3	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	0,2694	1						
	Log-Logistic (3P)	0,28813	2						
	Gen. Logistic	0,29766	3						
Burr (4P)	0,30089	4							

Continuación Tabla A.5.1 Resultados del test de Anderson Darling

Curva	21			22			23		
	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
MT	Burr (4P)	0,22389	1	Johnson SB	0,26864	1	Dagum (4P)	0,31373	1
	Gen. Logistic	0,27376	2	Kumaraswamy	0,27595	2	Burr (4P)	0,43848	2
	Log-Logistic (3P)	0,29478	3	Beta	0,28035	3	Johnson SU	0,49893	3
	Dagum (4P)	0,30292	4	Weibull (3P)	0,28519	4	Error	0,51018	4
INT4	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Error	0,46739	1						
	Dagum (4P)	0,48015	2						
	Gen. Logistic	0,48734	3						
PC2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr (4P)	0,58426	1	Burr (4P)	0,36423	1	Burr (4P)	0,21226	1
	Log-Logistic (3P)	1,0253	2	Hypersecant	0,40723	2	Gen. Logistic	0,21378	2
	Gen. Extreme Value	1,1605	3	Dagum (4P)	0,41063	3	Log-Logistic (3P)	0,21493	3
INT5	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Dagum (4P)	1,21	4	Log-Logistic (3P)	0,41287	4	Johnson SU	0,2362	4
	Gen. Extreme Value	0,73126	1	Gen. Extreme Value	0,31012	1	Gen. Extreme Value	0,36477	1
	Error	0,7931	2	Log-Pearson 3	0,32244	2	Gamma (3P)	0,37986	2
MC2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Normal	0,80086	3	Gamma (3P)	0,34606	3	Fatigue Life (3P)	0,3963	3
	Johnson SB	1,0062	4	Gen. Gamma (4P)	0,34947	4	Lognormal (3P)	0,39667	4
	Dagum (4P)	0,32252	1	Johnson SB	0,19223	1	Gen. Extreme Value	0,38172	1
INT6	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Burr	0,33789	2	Beta	0,20625	2	Johnson SB	0,41619	2
	Dagum	0,38456	3	Kumaraswamy	0,22174	3	Gamma (3P)	0,42183	3
	Burr (4P)	0,39358	4	Pert	0,23981	4	Fatigue Life (3P)	0,42702	4
FC2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Gen. Logistic	0,39302	1	Johnson SB	0,20079	1	Dagum (4P)	0,20262	1
	Dagum (4P)	0,53567	2	Gen. Extreme Value	0,25923	2	Johnson SB	0,60064	2
	Burr (4P)	0,56357	3	Normal	0,35061	3	Kumaraswamy	0,68104	3
FC2	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango	Distribución	Anderson-Darling	Rango
	Johnson SB	0,73324	4	Error	0,36225	4	Weibull (3P)	0,70004	4
	Gen. Logistic	0,17466	1	Dagum (4P)	0,43527	1	Burr (4P)	0,30946	1
	Log-Logistic (3P)	0,17737	2	Burr (4P)	0,48725	2	Dagum (4P)	0,33464	2
FC2	Logistic	0,18364	3	Gen. Logistic	0,54132	3	Gen. Logistic	0,45675	3
	Burr (4P)	0,20028	4	Log-Logistic (3P)	0,57744	4	Log-Logistic (3P)	0,479	4

ANEXO 5.3 Gráficas de percentiles de distribución por celda

En esta sección se muestran las gráficas de los percentiles 50, 70, 85, 90, 95 y 99, para cada una de las filas no vacías de la matriz factorial de la Tabla 4.5.



Figura A.5.1 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor a 70 km/h



Figura A.5.2 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h



Figura A.5.3 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h



Figura A.5.4 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h



Figura A.5.5 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h



Figura A.5.6 Percentiles de aceleración para radio de entrada menor a 200 m, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h



Figura A.5.7 Percentiles de aceleración para radio de entrada menor a 200 m, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h

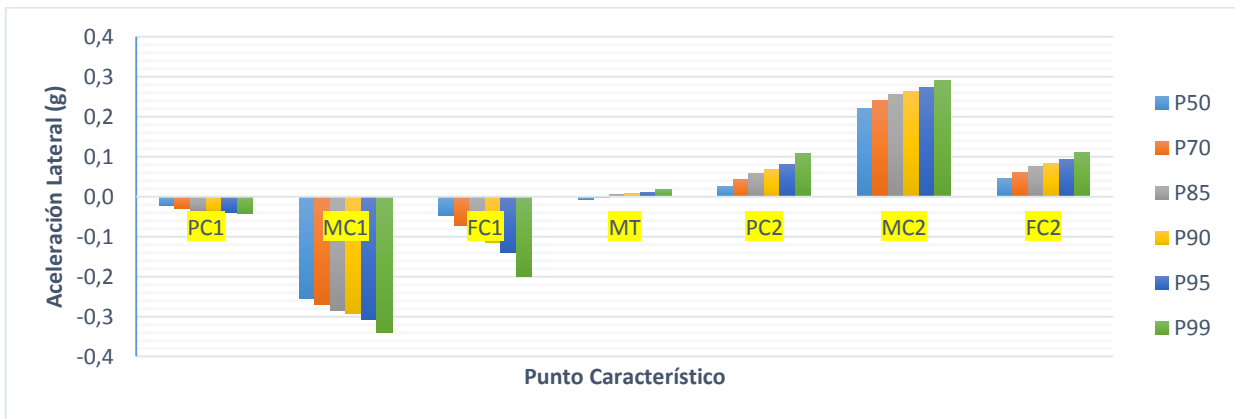


Figura A.5.8 Percentiles de aceleración para radio de entrada menor a 200 m, radio de salida, tangente intermedia entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h

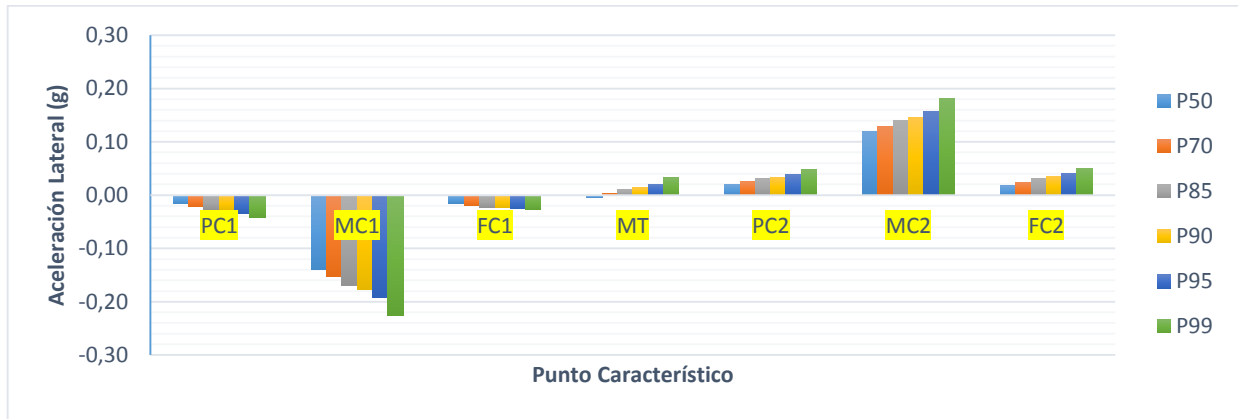


Figura A.5.9 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h



Figura A.5.10 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h

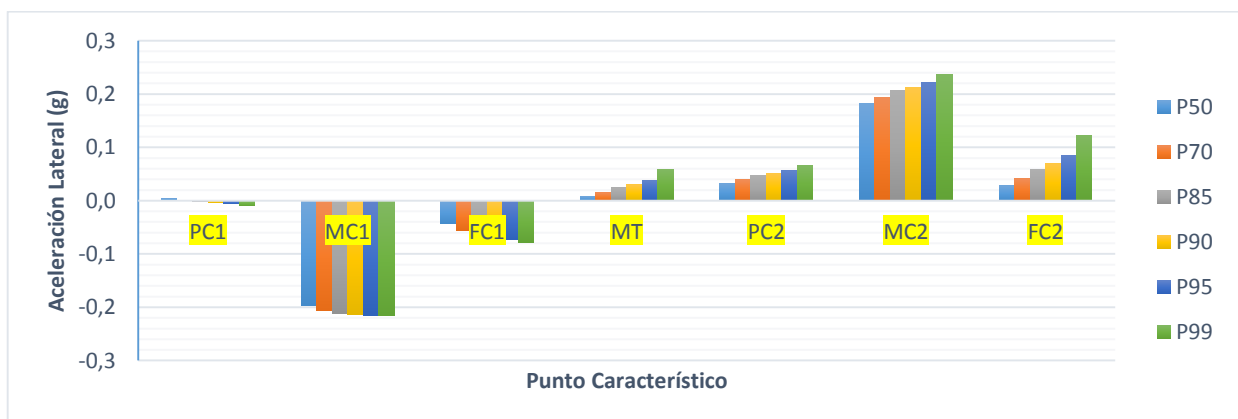


Figura A.5.11 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h



Figura A.5.12 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h



Figura A.5.13 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida entre 200 y 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 110 y 120 km/h



Figura A.5.14 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia entre 200 y 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h



Figura A.5.15 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia entre 200 y 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h



Figura A.5.16 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia entre 200 y 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h

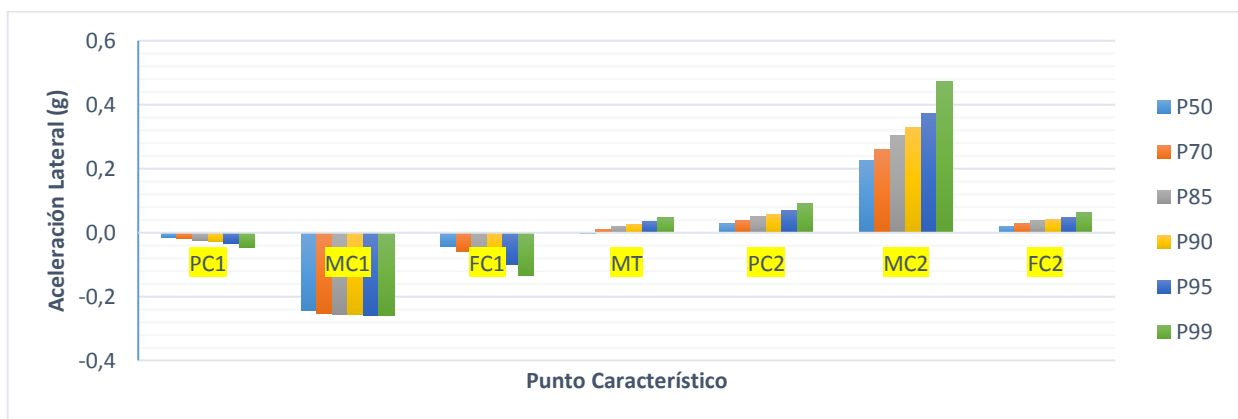


Figura A.5.17 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia entre 200 y 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h



Figura A.5.18 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m, y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h



Figura A.5.19 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m, y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h

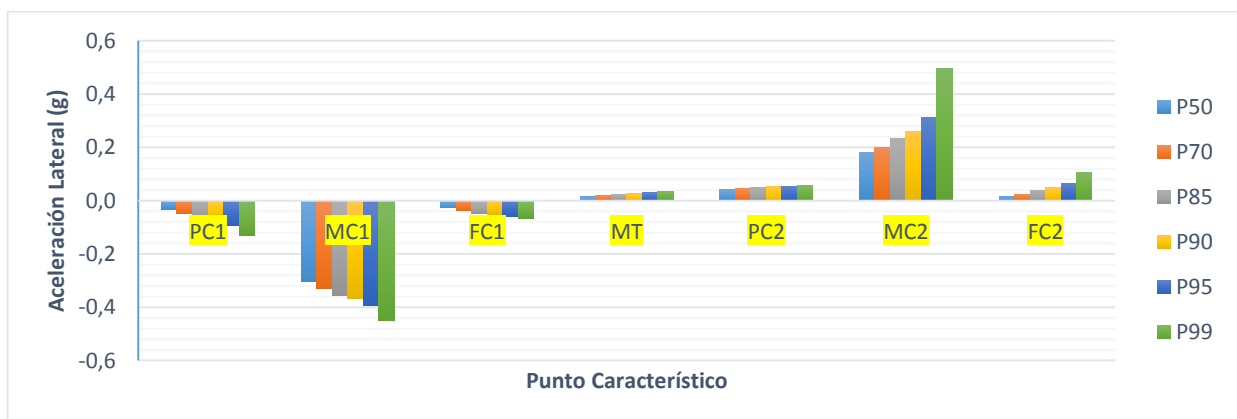


Figura A.5.20 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida y tangente intermedia entre 200 y 400 m, y velocidad de aproximación entre 110 y 120 km/h

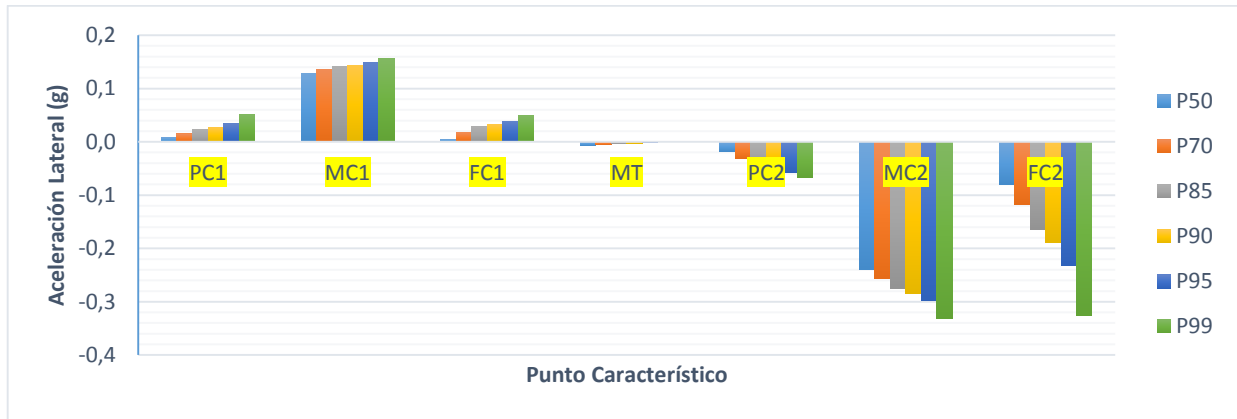


Figura A.5.21 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, L_{Ti} mayor a 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h



Figura A.5.22 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, L_{Ti} mayor a 400 m, radio de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h

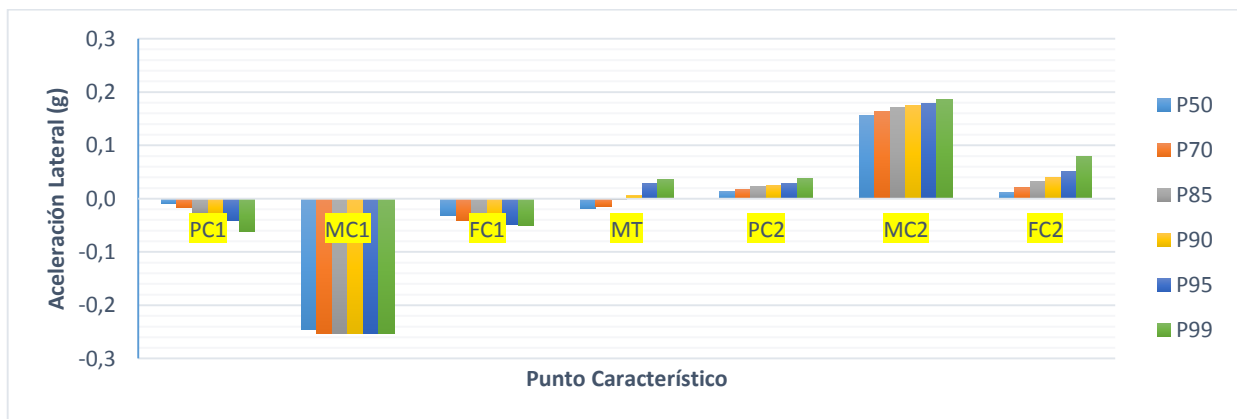


Figura A.5.23 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, tangente intermedia y radio de salida mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h



Figura A.5.24 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, tangente intermedia y radio de salida mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h



Figura A.5.25 Percentiles de aceleración para radio de entrada entre 200 y 400 m, tangente intermedia y radio de salida mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h



Figura A.5.26 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida mayor a 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h

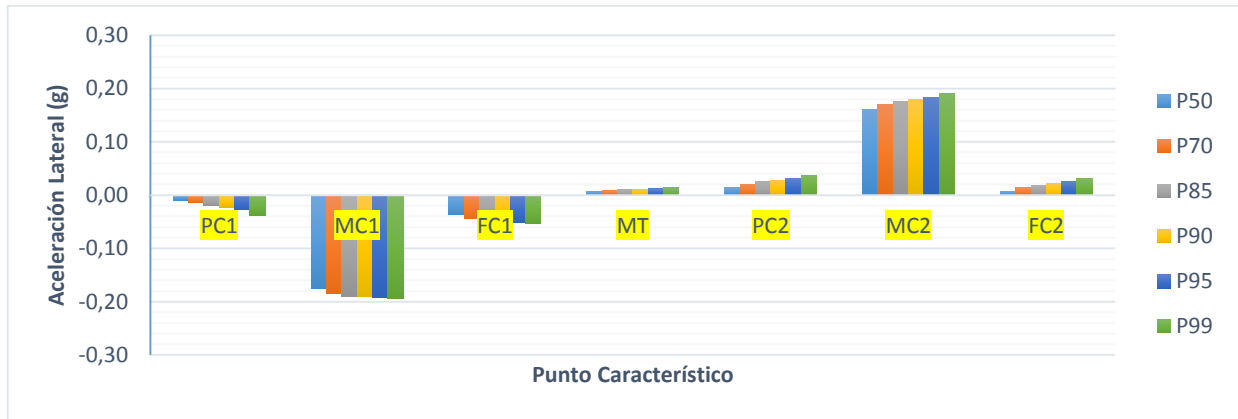


Figura A.5.27 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida mayor a 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h



Figura A.5.28 Percentiles de aceleración para radio de entrada y salida mayor a 400 m, tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 110 y 120 km/h

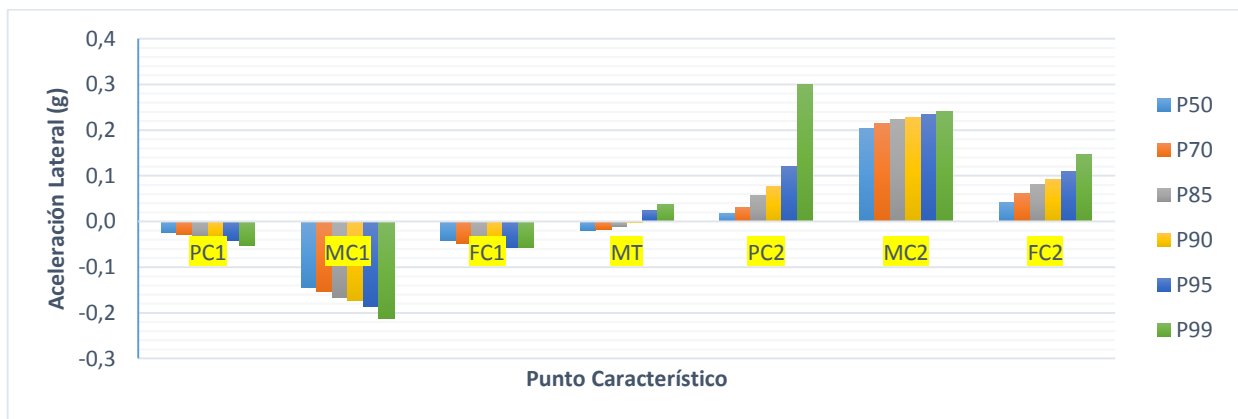


Figura A.5.29 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia mayor a 400 m, radio de salida entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h



Figura A.5.30 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia mayor a 400 m, radio de salida entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h



Figura A.5.31 Percentiles de aceleración para radio de entrada y tangente intermedia mayor a 400 m, radio de salida entre 200 y 400 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h

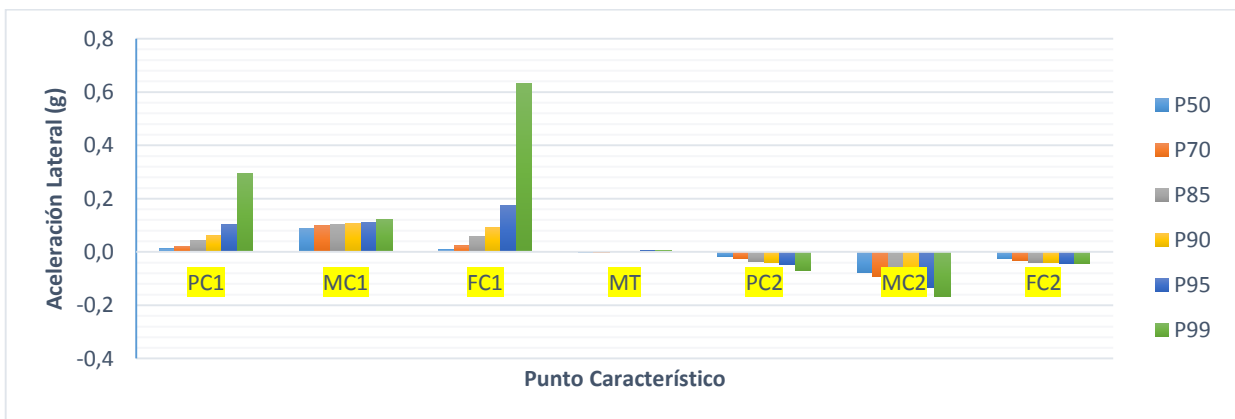


Figura A.5.32 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 70 y 80 km/h

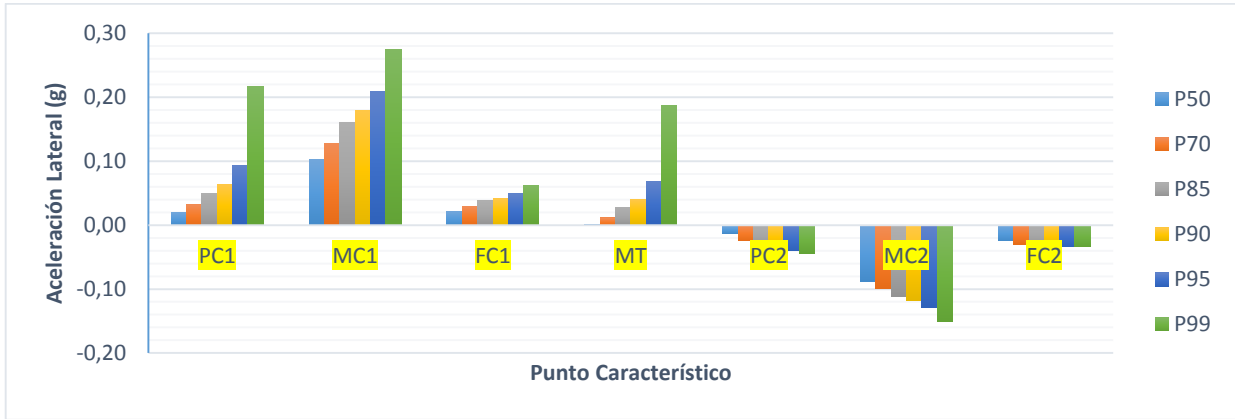


Figura A.5.33 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 80 y 90 km/h

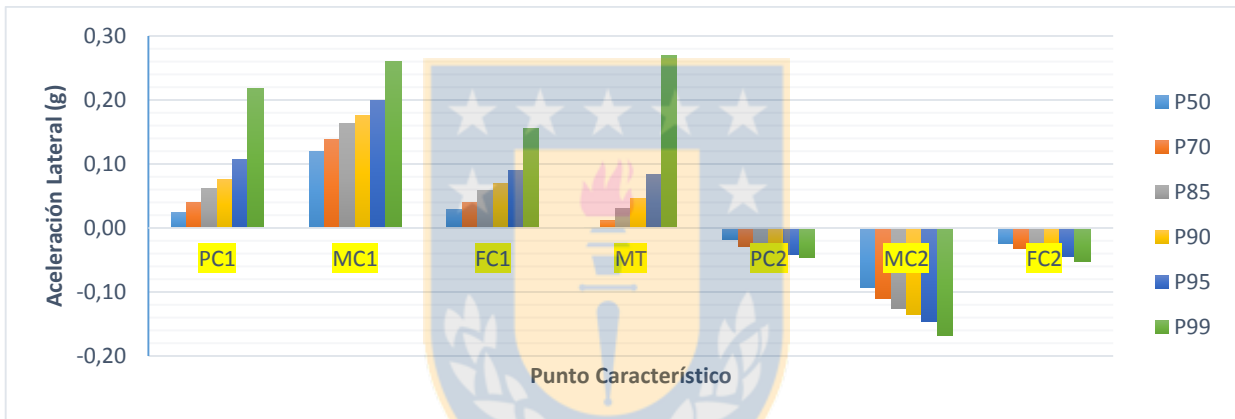


Figura A.5.34 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 90 y 100 km/h



Figura A.5.35 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 100 y 110 km/h



Figura A.5.36 Percentiles de aceleración para radio de entrada, radio de salida, tangente intermedia mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 110 y 120 km/h

ANEXO 5.4 Gráficas de percentiles de distribución por curva

En este anexo se presentan las gráficas de los percentiles 50, 70, 85, 90 y 99 para cada una de las curvas de la investigación.



Figura A.5.37 Percentiles de aceleración para la curva 1

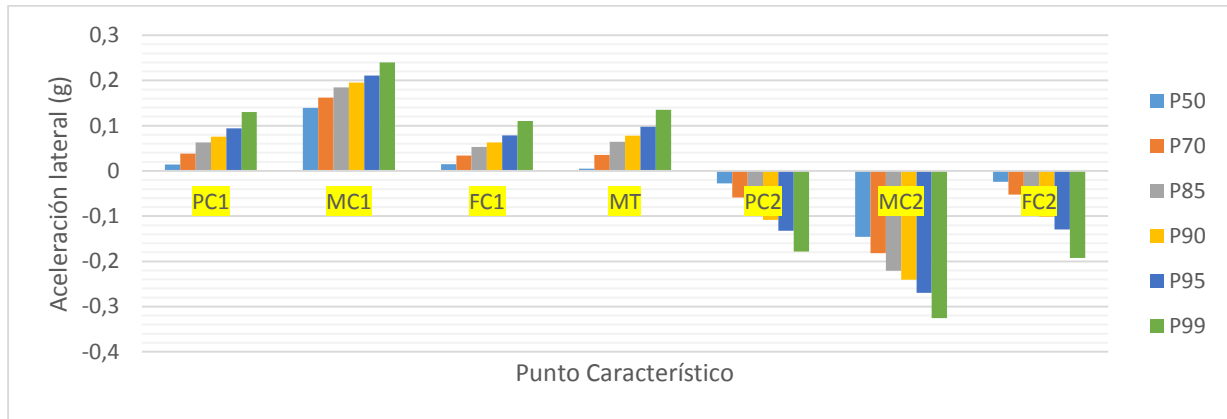


Figura A.5.38 Percentiles de aceleración para la curva 2



Figura A.5.39 Percentiles de aceleración para la curva 3

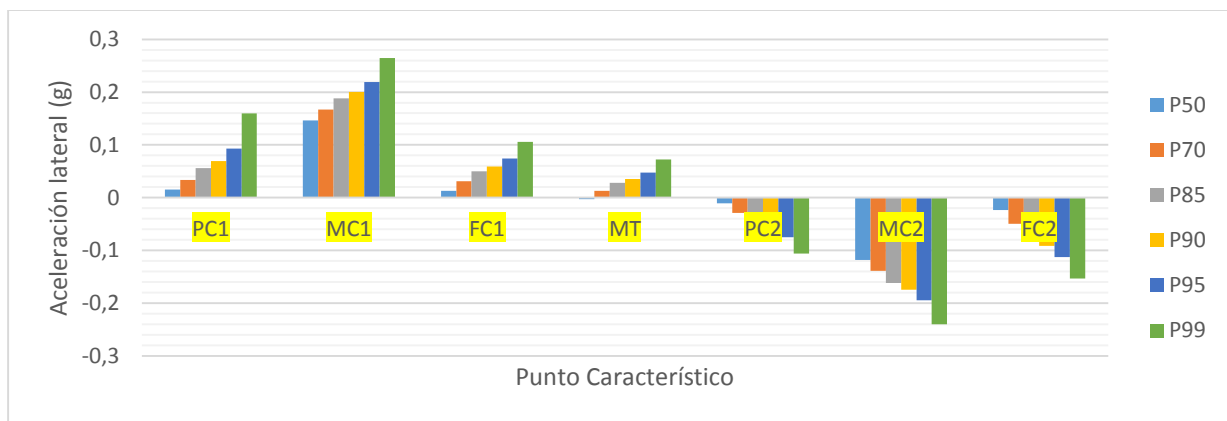


Figura A.5.40 Percentiles de aceleración para la curva 4

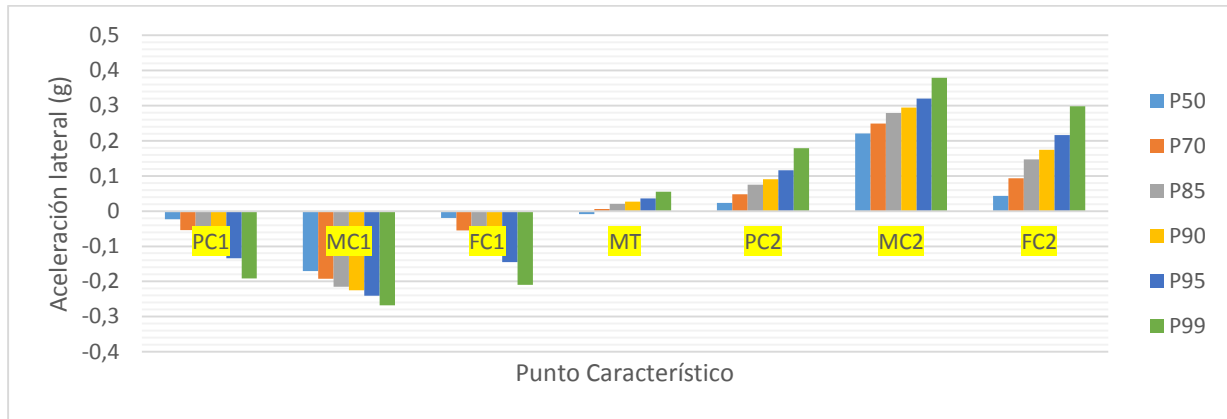


Figura A.5.41 Percentiles de aceleración para la curva 5

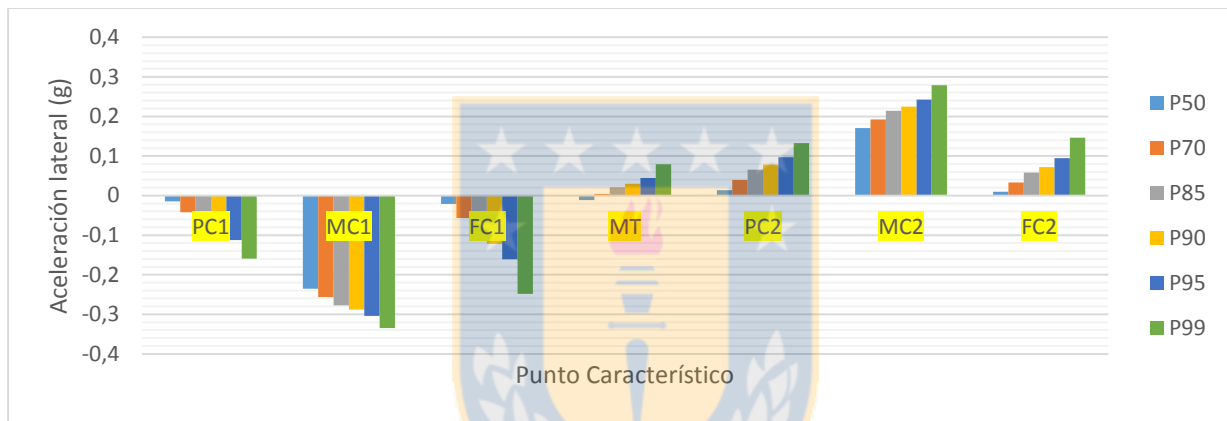


Figura A.5.42 Percentiles de aceleración para la curva 6

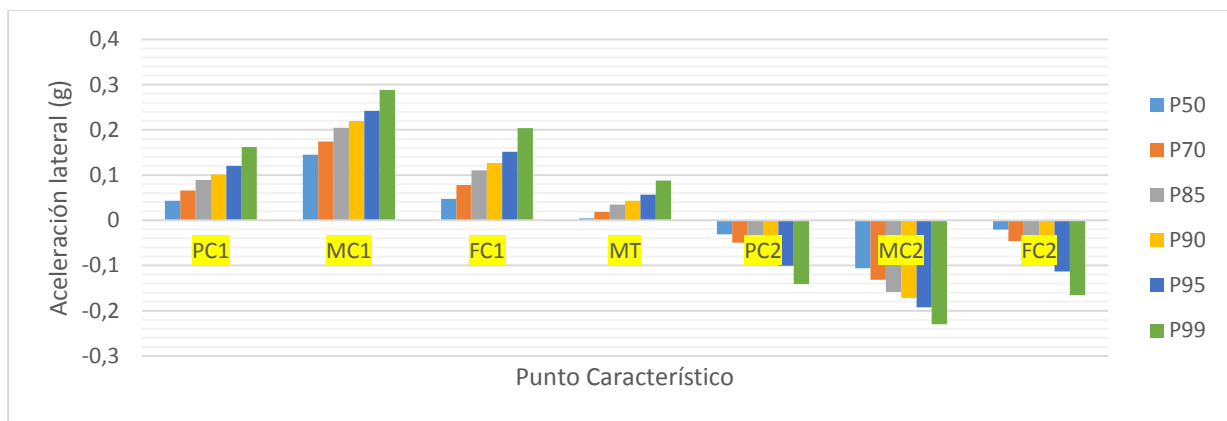


Figura A.5.43 Percentiles de aceleración para la curva 7

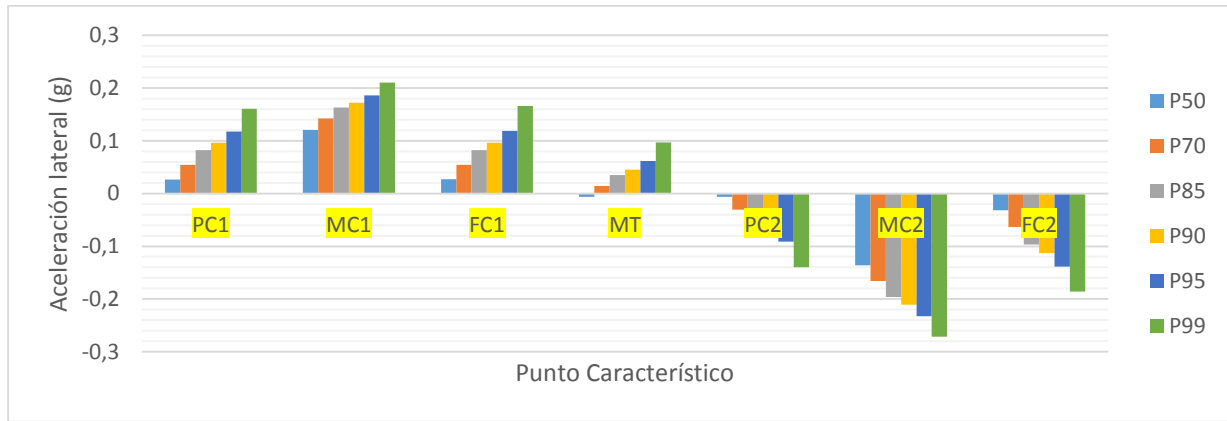


Figura A.5.44 Percentiles de aceleración para la curva 8



Figura A.5.45 Percentiles de aceleración para la curva 9

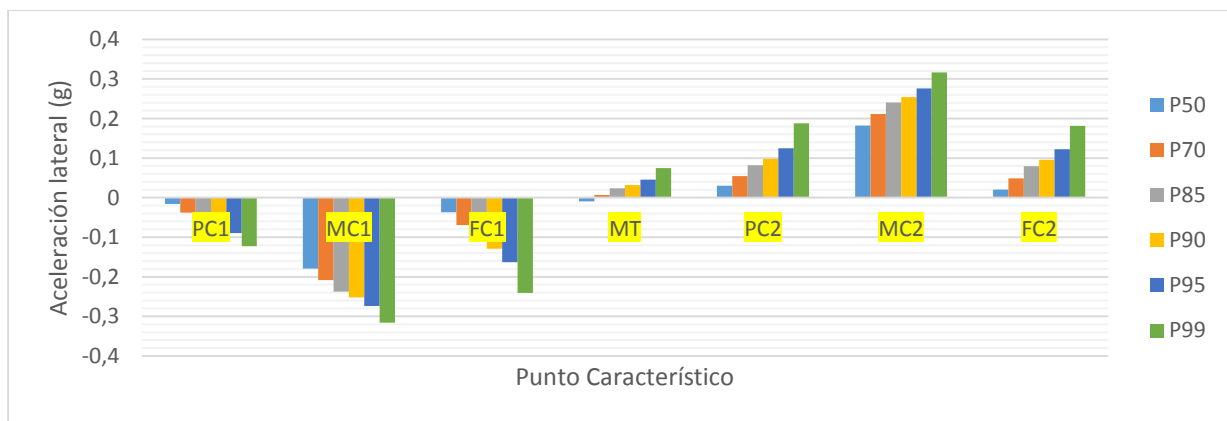


Figura A.5.46 Percentiles de aceleración para la curva 10

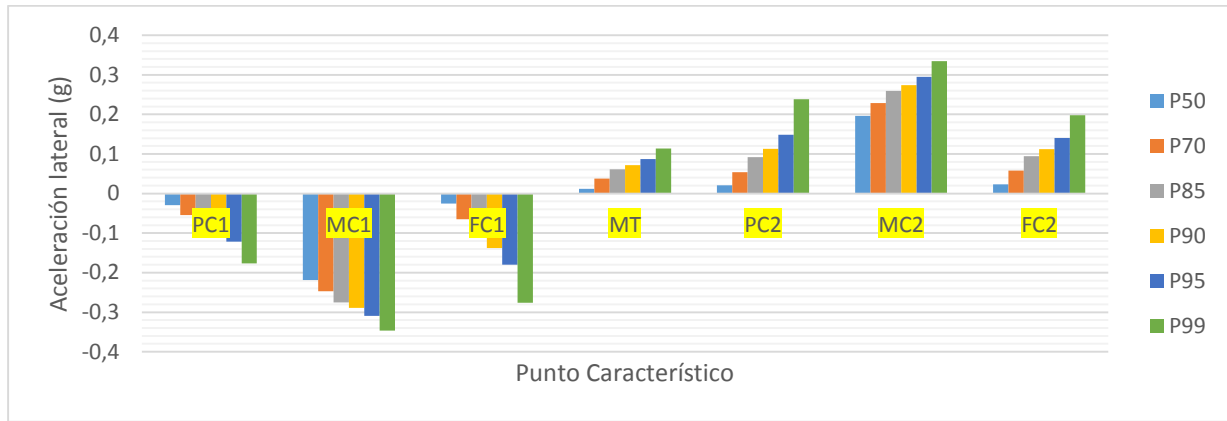


Figura A.5.47 Percentiles de aceleración para la curva 11

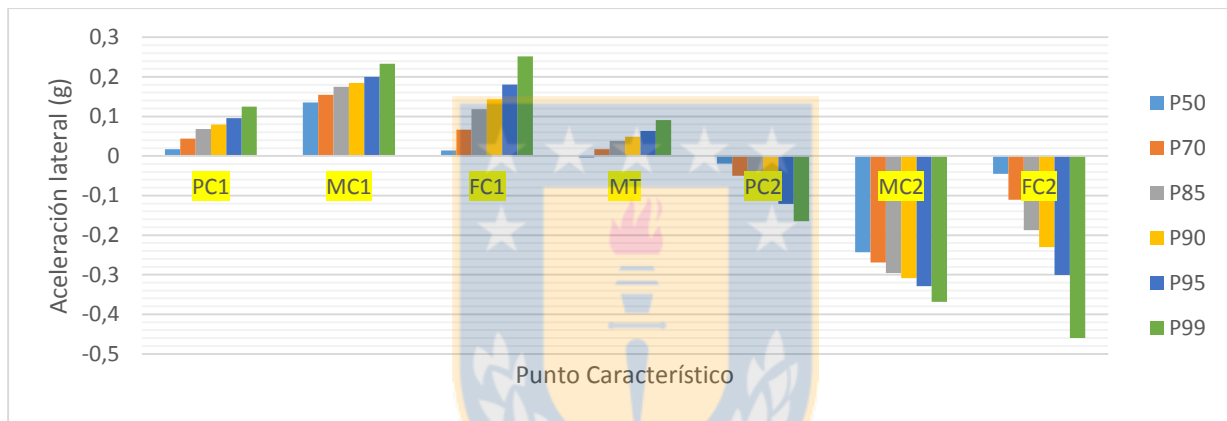


Figura A.5.48 Percentiles de aceleración para la curva 12

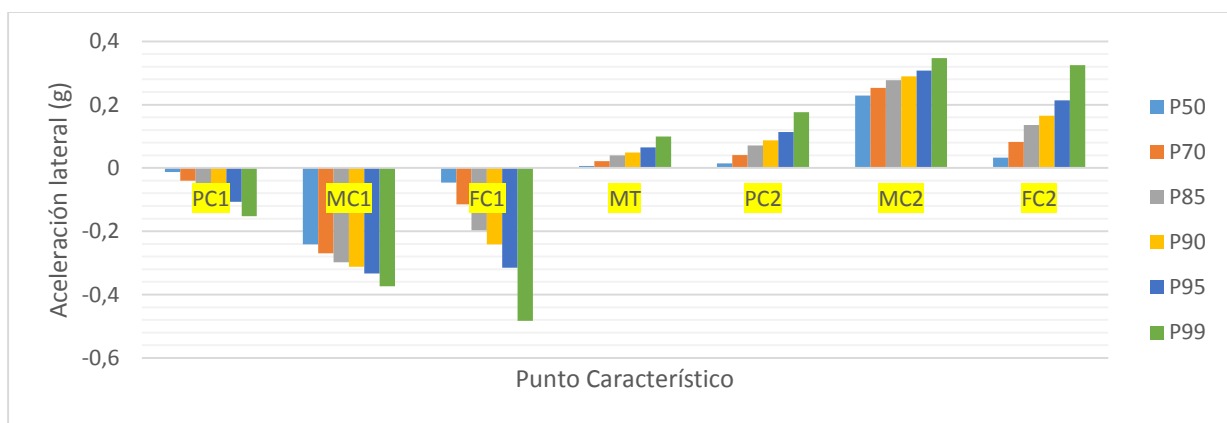


Figura A.5.49 Percentiles de aceleración para la curva 13

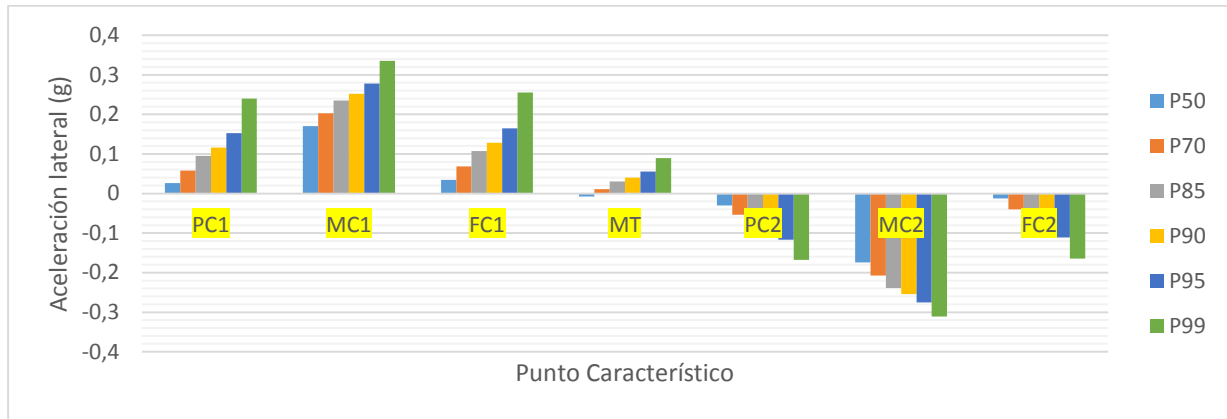


Figura A.5.50 Percentiles de aceleración para la curva 14



Figura A.5.51 Percentiles de aceleración para la curva 15

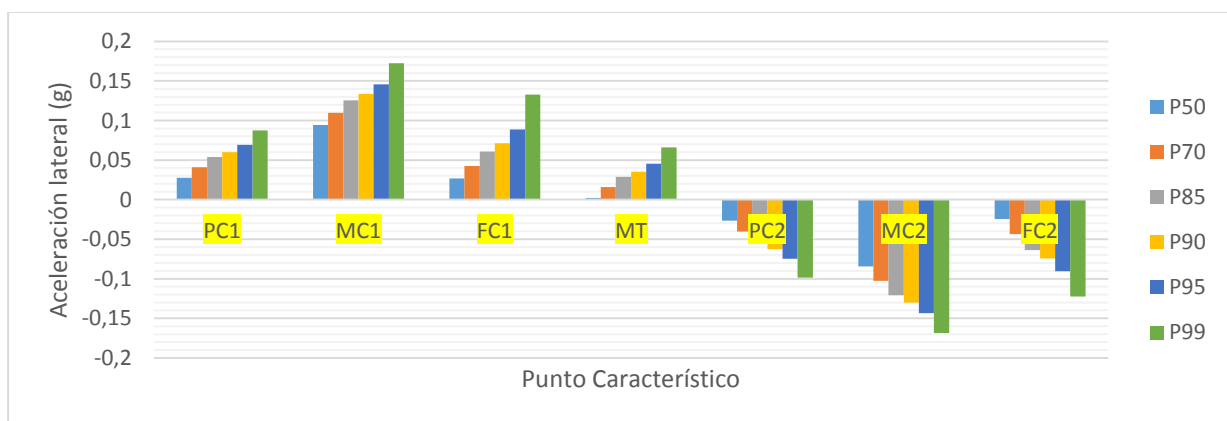


Figura A.5.52 Percentiles de aceleración para la curva 16

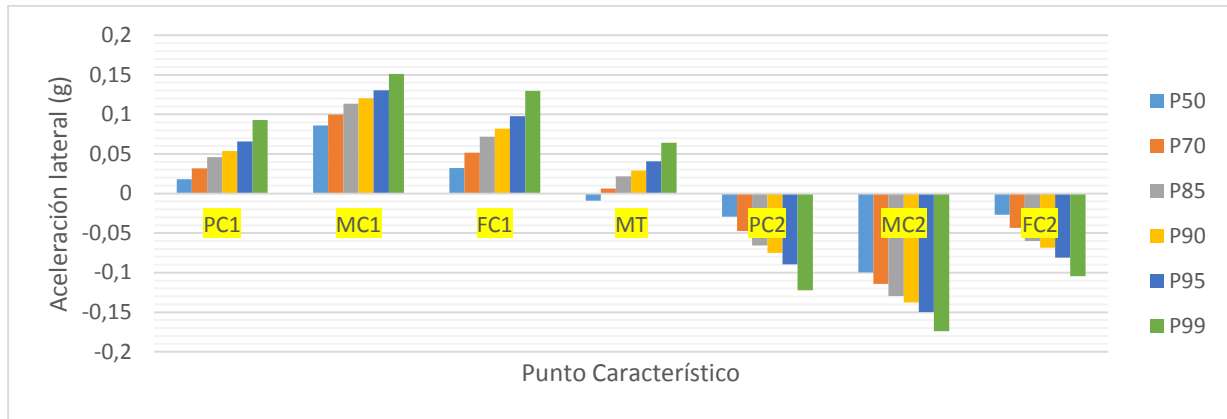


Figura A.5.53 Percentiles de aceleración para la curva 17



Figura A.5.54 Percentiles de aceleración para la curva 18

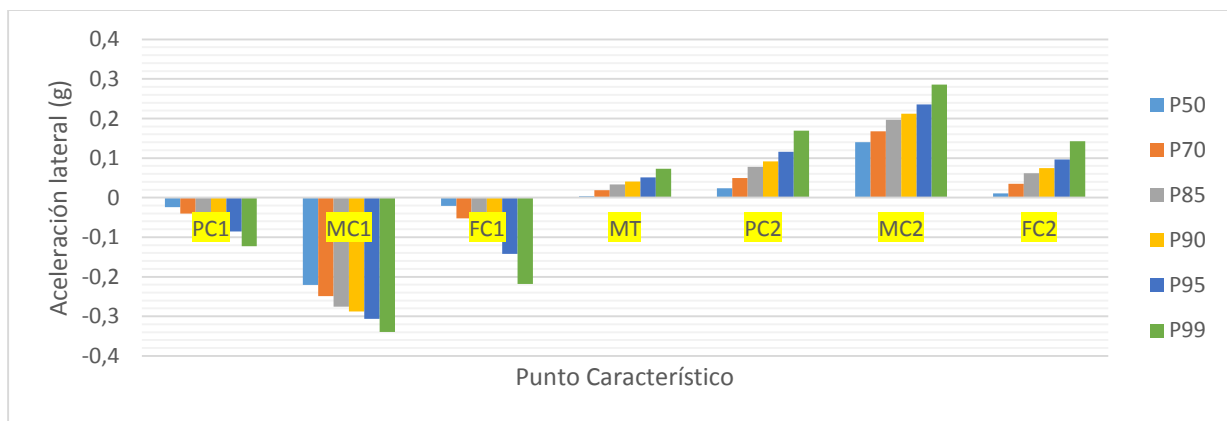


Figura A.5.55 Percentiles de aceleración para la curva 19

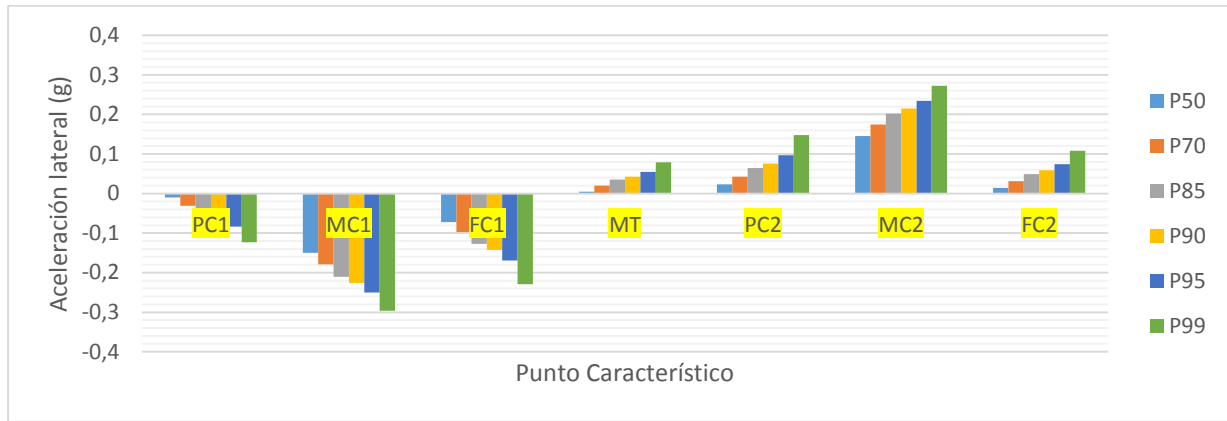


Figura A.5.56 Percentiles de aceleración para la curva 20



Figura A.5.57 Percentiles de aceleración para la curva 21

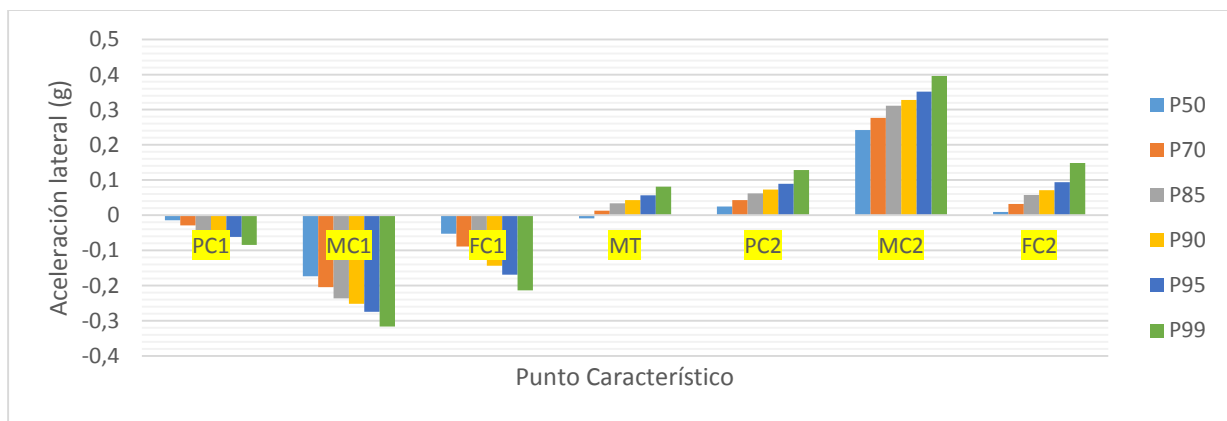


Figura A.5.58 Percentiles de aceleración para la curva 22

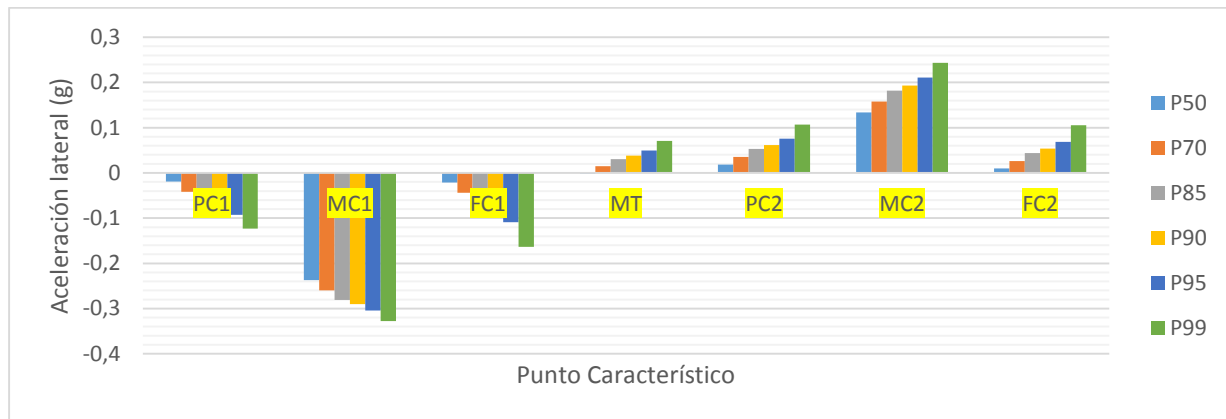


Figura A.5.59 Percentiles de aceleración para la curva 23



ANEXO 6.1 Modelos de aceleración lateral

A continuación se muestran los 62 modelos calibrados para los distintos puntos característicos de la C.H.S.I., se resalta en cada caso el modelo escogido.

Tabla A.6.1 Modelos para el principio de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes					R_a^2
		V85 PC1	$\sqrt{R_1}$	w_1	d_1	Constante	
PC1.1	$1 - \frac{(aPC1+0,184)^{-0,13125}-1}{-0,349}$	0,00461	0,0304	0,0207	-0,00284	-0,410	11,56
	Test t	3,08	1,53	2,67	-3,05	-0,80	
	Valor p	,002	0,127	0,008	0,003	0,424	
PC1.2	$1 - \frac{(aPC1+0,184)^{-0,1375}-1}{-0,368}$	0,00426		0,00955	-0,00152	0,342	10,84
	Test t	2,87		3,54	-4,22	2,31	
	Valor p	0,005		0,001	0,00	0,022	

Tabla A.6.2 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.1

Indicadores	Modelo	
	PC1.1	PC1.2
Durbin-Watson	0,291	0,254
MSE (m/s ²)	0,04	0,04
MAE (m/s ²)	0,14	0,15
MAPE (%)	61,09	62,87

Tabla A.6.3 Modelos para la mitad de la curva de entada con radios entre 190 y 700 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R_a^2
		V85 MC1	R_1	w_1	d_1	$\sqrt{R_1}$	$1/R_1$	Cte.	
MC1.1	$1 - \frac{aMC1^{0,26432} - 1}{0,184}$	0,0338	-0,00386					0,283	73,95
	Test t	22,43	-34,37					2,53	
	Valor p	0,000	0,000					0,011	
MC1.2	$1 - \frac{aMC1^{0,721294} - 1}{0,629}$,0266		0,0261	-0,00374			-0,866	56,64
	Test t	14,21		23,28	-14,47			-5,06	
	Valor p	0,000		0,000	0,000			0,000	
MC1.3	$1 - \frac{aMC1^{0,381843} - 1}{0,282}$	0,0337				-0,149		1,648	72,51
	Test t	21,79				-33,12		15,15	
	Valor p	0,000				0,000		0,000	
MC1.4	aMC1	$0,16 \cdot 0^{0,72}$	$23,5 \cdot 0^{-0,27}$					-7,189	67,11
	Intervalo menor	-0,66	5,2					-13,3	
	Intervalo mayor	0,99	41,7					-1,1	
MC1.5	aMC1	0,034	-0,0038					0,213	71,18
	Intervalo menor	0,030	-0,004					-0,02	
	Intervalo mayor	0,037	-0,003					0,45	
MC1.6	aMC1	0,037	-0,0039						71,02
	Intervalo menor	0,036	-0,0041						
	Intervalo mayor	0,038	-0,0037						
MC1.7	aMC1	$0^{0,53}$					$0^{0,72}$		64,72
	Intervalo menor	0,5					0,67		
	Intervalo mayor	0,57					0,78		

Tabla A.6.4 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.3

Indicadores	Modelo						
	MC1.1	MC1.2	MC1.3	MC1.4	MC1.5	MC1.6	MC1.7
Durbin-Watson	1,59	1,58	1,55	1,53	1,60	1,59	1,59
MSE (m/s ²)	0,09	0,14	0,09	0,10	0,09	0,09	0,11
MAE (m/s ²)	0,21	0,29	0,22	0,24	0,22	0,22	0,26
MAPE (%)	12,77	17,15	13,30	14,78	14,67	15,71	15,66

Tabla A.6.5 Modelos para la mitad de la curva de entrada con radios entre 190 y 399 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R _a ²
		V85 MC1	R ₁	w ₁	d ₁	$\sqrt{R_1}$	1/R ₁	Cte.	
MC1.8	$1 - \frac{aMC1^{0,482645} - 1}{0,345}$	0,0423		0,0049		-0,126		0,389	82,88
	Test t	28,77		7,65		-16,39		2,42	
	Valor p	0,000		0,000		0,000		0,016	
MC1.9	$1 - \frac{aMC1^{0,469345} - 1}{0,333}$	0,042	-0,00462					-0,120	78,53
	Test t	25,51	-18,90					-0,93	
	Valor p	0,000	0,000					0,352	
MC1.10	$1 - \frac{aMC1^{0,448955} - 1}{0,314}$	0,0422					295,432	-2,544	76,88
	Test t	24,58					17,78	-14,49	
	Valor p	0,000					0,000	0,000	
MC1.11	$1 - \frac{aMC1^{0,468039} - 1}{0,331}$	0,043		0,0053			248,737	-2,68	82,46
	Test t	28,48		8,27			16,03	-17,44	

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R_a^2
		V85 MC1	R_1	w_1	d_1	$\sqrt{R_1}$	$1/R_1$	Cte.	
	Valor p	0,000		0,000			0,000	0,000	
MC1.12	$1 - \frac{aMC1^{0,467838} - 1}{0,331}$	0,043		0,024	-0,0059			-1,513	84,94
	Test t	31,15		24,23	-18,27			-12,87	
	Valor p	0,000		0,000	0,000			0,000	
MC1.13	aMC1	0,039	-0,0046						77,05
	Intervalo menor	0,037	-0,0051						
	Intervalo mayor	0,040	-0,0041						

Tabla A.6.6 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.5

Indicadores	Modelo					
	MC1.8	MC1.9	MC1.10	MC1.11	MC1.12	MC1.13
Durbin-Watson	2,04	1,86	1,82	2,02	2,08	1,81
MSE (m/s ²)	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05
MAE (m/s ²)	0,16	0,18	0,19	0,16	0,15	0,18
MAPE (%)	8,19	9,04	9,30	8,18	7,63	8,86

Tabla A.6.7 Modelos para la mitad de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes						R_a^2
		V85 MC1	w_1	d_1	$\sqrt{R_1}$	$1/R_1$	Cte.	
MC1.14	$1 - \frac{aMC1^{0,027833} - 1}{0,022}$	0,025	0,052	-0,0046			-1,54	67,46
	Test t	13,42	14,59	-10,03			-8,07	

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes						R_a^2
		V85 MC1	w_1	d_1	$\sqrt{R_1}$	$1/R_1$	Cte.	
	Valor p	0,000	0,000	0,000			0,000	
MC1.15	$1 - \frac{aMC1^{-0,1375} - 1}{0,105}$	0,023			-0,14		2,38	58,40
	Test t	10,92			-13,63		9,56	
	Valor p	0,000			0,000		0,000	
MC1.16	$1 - \frac{aMC1^{-0,071875} - 1}{-0,056}$	0,022				852,579	-2,45	54,94
	Test t	10,36				12,63	-8,83	
	Valor p	0,000				0,000	0,000	
MC1.17	$1 - \frac{aMC1^{-0,159375} - 1}{-0,122}$	0,025	0,013			660,078	-2,78	70,66
	Test t	14,16	9,24			11,26	-12,26	
	Valor p	0,000	0,000			0,000	0,000	
MC1.18	$1 - \frac{aMC1^{-0,209375} - 1}{-0,158}$	0,025	0,012		-0,11		1,01	71,69
	Test t	14,39	8,65		-11,70		3,9	
	Valor p	0,000	0,000		0,000		0,000	
MC1.19	aMC1	0,027	0,016		-0,077			62,89
	Intervalo menor	0,02	0,014		-0,09			
	Intervalo mayor	0,03	0,019		-0,06			
MC1.20	aMC1	0,022			-0,14		2,46	52,82
	Intervalo menor	0,017			-0,16		1,92	
	Intervalo mayor	0,026			-0,12		2,99	

Tabla A.6.8 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.7

Indicadores	Modelo						
	MC1.14	MC1.15	MC1.16	MC1.17	MC1.18	MC1.19	MC1.20
Durbin-Watson	1,83	1,64	1,64	1,71	1,71	1,48	1,54
MSE (m/s ²)	0,05	0,07	0,08	0,05	0,05	0,06	0,07
MAE (m/s ²)	0,16	0,20	0,21	0,16	0,16	0,17	0,20
MAPE (%)	12,80	15,24	16,07	12,31	12,29	13,93	14,43

Tabla A.6.9 Modelos para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes					R _a ²
		V85 FC1	1/R ₁	w ₁	d ₁	Constante	
FC1.1	$1 - \frac{(aFC1+0,004)^{-0,13125} - 1}{-0,349}$	0,0087		0,015	-0,0019	-0,232	23,20
	Test t	6,16		5,19	-4,87	-1,59	
	Valor p	0,000		0,000	0,000	0,113	
FC1.2	$1 - \frac{(aFC1+0,03)^{-0,1375} - 1}{-0,368}$	0,0081	162,823			-0,500	16,65
	Test t	5,53	3,36			-2,70	
	Valor p	0,000	0,001			0,008	
FC1.3	aFC1	0,00394		0,0154	0,00049		16,88
	Intervalo menor	0,00284		0,0086	-0,0029		
	Intervalo mayor	0,00503		0,0223	-0,0010		
FC1.4	aFC1	0,010		0,0181	-0,00203	-0,692	23,82
	Intervalo menor	0,007		0,0114	-0,00295	-1,03	
	Intervalo mayor	0,014		0,0248	-0,00110	-0,35	

Tabla A.6.10 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.9

Indicadores	Modelo			
	FC1.1	FC1.2	FC1.3	FC1.4
Durbin-Watson	0,39	0,29	0,18	0,39
MSE (m/s ²)	0,05	0,05	0,05	0,05
MAE (m/s ²)	0,17	0,18	0,18	0,17
MAPE (%)	54,61	56,41	49,58	54,91

Tabla A.6.11 Modelos para la mitad de tangente

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes					R _a ²
		V85 FC1	R ₁ /R ₂	Lt	V85 PC2	Constante	
MT 80-170	$1 - \frac{(aMT+0,798)^{1,16252} - 1}{1,106}$	-0,0045	-0,981	0,0058		1,525	23,74
	Test t	-3,40	-4,13	4,75		5,90	
	Valor p	0,001	0,000	0,000		0,000	
MT 170-260	$1 - \frac{(aMT+0,471)^{1,73993} - 1}{0,961}$	-0,0108	0,073		0,00807	0,399	25,02
	Test t	-5,71	2,96		4,00	4,91	
	Valor p	0,000	0,004		0,000	0,000	

Tabla A.6.12 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.11

Indicadores	Modelo	
	MT 80-170	MT 170-260
Durbin-Watson	2,25	1,67
MSE (m/s ²)	0,02	0,01
MAE (m/s ²)	0,12	0,10
MAPE (%)	486,21	97,58

Tabla A.6.13 Modelos para el principio de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes				R _a ²
		V85 PC2	w ₂	d ₂	Constante	
PC2.1	$1 - \frac{(aPC2+0,985)^{1,47311} - 1}{1,207}$	-0,0055	-0,00044	0,001	0,945	15,96
	Test t	-4,87	-0,53	3,46	10,38	
	Valor p	0,000	0,600	0,001	0,000	
PC2.2	$1 - \frac{(aPC2+0,985)^{1,47813} - 1}{1,209}$	-0,0053			0,931	16,25
	Test t	-4,96		5,54	10,71	
	Valor p	0,000		0,000	0,000	
PC2.3	aPC2	-0,0052		0,0008	-0,028	15,24
	Intervalo menor	-0,007		0,0005	-0,203	
	Intervalo mayor	-0,003		0,0011	0,147	

Tabla A.6.14 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.13

Indicadores	Modelo		
	PC2.1	PC2.2	PC2.3
Durbin-Watson	0,33	0,32	0,30
MSE (m/s ²)	0,03	0,03	0,03
MAE (m/s ²)	0,13	0,13	0,13
MAPE (%)	53,06	53,28	51,55

Tabla A.6.15 Modelos para el principio de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes				R _a ²
		V85 PC2	w ₂	d ₂	Constante	
PC2.4	$1 - \frac{(aPC2+0,5)^{1,47311}-1}{1,207}$	-0,0045	0,0024	0,00044	0,737	23,40
	Test t	-4,87	1,13	1,47	8,39	
	Valor p	0,000	0,260	0,143	0,000	
PC2.5	$1 - \frac{(aPC2+0,5)^{0,55428}-1}{1,102}$	-0,0045		0,00074	0,745	23,28
	Test t	-4,95		5,92	8,48	
	Valor p	0,000		0,000	0,000	
PC2.6	aPC2	-0,0040	0,0060			23,64
	Intervalo menor	-0,0046	0,0041			
	Intervalo mayor	-0,0034	0,0078			

Tabla A.6.16 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.15

Indicadores	Modelo		
	PC2.4	PC2.5	PC2.6
Durbin-Watson	0,40	0,40	0,37
MSE (m/s ²)	0,02	0,02	0,02
MAE (m/s ²)	0,11	0,11	0,11
MAPE (%)	84,12	161,70	109,49

Tabla A.6.17 Modelos para la mitad de la curva de salida con radios entre 190 y 700 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R_a^2
		V85 MC2	R_2	w_2	d_2	$\sqrt{R_2}$	$1/R_2$	Cte.	
MC2.1	$1 - \frac{(aMC2+3,221)^{1,0677} - 1}{1,094}$	-0,026	0,0039					2,37	69,26
	Test t	-15,26	30,65					18,81	
	Valor p	0,000	0,000					0,000	
MC2.2	$1 - \frac{(aMC2+3,221)^{0,89777} - 1}{0,865}$	-0,024		-0,028	0,0061			3,50	63,91
	Test t	-12,75		-27,00	19,76			22,63	
	Valor p	0,000		0,000	0,000			0,000	
MC2.3	$1 - \frac{(aMC2+3,221)^{0,89296} - 1}{0,859}$	-0,028					-465,464	5,51	70,60
	Test t	-16,61					-31,65	31,17	
	Valor p	0,000					0,000	0,000	
MC2.4	$1 - \frac{(aMC1+3,221)^{0,89229} - 1}{0,858}$	-0,028		-0,00057			-457,966	5,49	70,56
	Test t	-16,04		-0,61			-23,93	30,64	
	Valor p	0,000		0,54			0,000	0,000	
MC2.5	$1 - \frac{(aMC1+3,221)^{0,89377} - 1}{0,860}$	-0,029			0,00020		-464,26	5,49	70,59
	Test t	-16,36			0,94		-31,45	30,85	
	Valor p	0,000			0,35		0,000	0,000	
MC2.6	aMC1	-0,037	0,0041						65,78
	Intervalo menor	-0,038	0,0038						
	Intervalo mayor	-0,035	0,0043						
MC2.7	aMC1	$10,10^{-0,32}$	$-23,60^{-0,6}$						64,53
	Intervalo menor	2,93	-47,7						
	Intervalo mayor	17,26	0,55						

Tabla A.6.18 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.17

Indicadores	Modelo						
	MC2.1	MC2.2	MC2.3	MC2.4	MC2.5	MC2.6	MC2.7
Durbin-Watson	1,27	1,70	1,39	1,39	1,39	1,07	1,71
MSE (m/s ²)	0,13	0,15	0,12	0,12	0,12	0,14	0,15
MAE (m/s ²)	0,26	0,31	0,27	0,27	0,27	0,27	0,29
MAPE (%)	24,71	23,20	18,51	18,38	18,75	37,65	18,64

Tabla A.6.19 Modelos para la mitad de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R _a ²	
		V85 MC2	R ₂	w ₂	d ₂	√R ₂	1/R ₂	√V85 MC2		Cte.
MC2.8	$1 - \frac{(aMC2+3,221)^{1,0321}-1}{1,037}$	-0,043	0,0045						3,50	84,84
	Test t	-30,23	22,01						32,16	
	Valor p	0,000	0,000						0,000	
MC2.9	$1 - \frac{(aMC2+3,221)^{1,0207}-1}{1,024}$	-0,041		-0,020	0,0059				4,46	84,06
	Test t	-27,44		-21,28	17,64				39,55	
	Valor p	0,000		0,000	0,000				0,000	
MC2.10	$1 - \frac{(aMC2+3,221)^{1,0331}-1}{1,038}$	-0,043						-301,297	5,93	84,61
	Test t	-30,33						-21,78	41,72	
	Valor p	0,000						0,000	0,000	
MC2.11	$1 - \frac{(aMC1+3,221)^{1,0331}-1}{1,038}$	-0,043				0,15			2,34	84,87
	Test t	-30,34				22,04			18,17	
	Valor p	0,000				0,000			0,000	

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R_a^2	
		V85 MC2	R_2	w_2	d_2	$\sqrt{R_2}$	$1/R_2$	$\sqrt{V85 MC2}$	Cte.		
MC2.12	aMC1	-0,042	0,0045							0,27	84,76
	Intervalo menor	-0,045	0,0041							0,06	
	Intervalo mayor	-0,040	0,0049							0,49	
MC2.13	$1 - \frac{(aMC1+3,221)^{1,1023}-1}{1,118}$		0,0045						-0,74	6,71	84,96
	Test t		22,01						-30,38	32,33	
	Valor p		0,000						0,000	0,000	
MC2.14	$1 - \frac{(aMC1+3,221)^{1,0868}-1}{1,100}$			-0,02	0,0060				-0,72	7,57	83,96
	Test t			-21,07	17,59				-27,35	33,98	
	Valor p			0,000	0,000				0,000	0,000	

Tabla A.6.20 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.19

Indicadores	Modelo						
	MC2.8	MC2.9	MC2.10	MC2.11	MC2.12	MC2.13	MC2.14
Durbin-Watson	1,55	1,63	1,52	1,54	1,54	1,54	1,62
MSE (m/s ²)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
MAE (m/s ²)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16
MAPE (%)	7,89	8,08	7,85	7,88	7,88	8,03	8,48

Tabla A.6.21 Modelos para la mitad de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R _a ²
		V85 MC2	R ₂	w ₂	d ₂	$\sqrt{R_2}$	1/R ₂	Cte.	
MC2.15	$1 - \frac{(aMC2+2,789)^{2,0749} - 1}{3,364}$	-0,023	0,0027					2,21	75,70
	Test t	-15,92	17,80					14,98	
	Valor p	0,000	0,000					0,000	
MC2.16	$1 - \frac{(aMC2+2,789)^{2,1323} - 1}{3,548}$	-0,023		-0,0048			-751,547	5,20	77,22
	Test t	-15,99		-3,23			-14,40	30,89	
	Valor p	0,000		0,002			0,000	0,000	
MC2.17	$1 - \frac{(aMC2+2,789)^{2,1469} - 1}{3,596}$	-0,023		0,00092	-0,00059	0,127		0,79	76,69
	Test t	-15,70		0,09	-0,51	5,46		1,39	
	Valor p	0,000		0,927	0,614	0,000		0,163	
MC2.18	$1 - \frac{(aMC1+2,789)^{2,0445} - 1}{3,270}$	-0,023					-831,467	5,26	75,68
	Test t	-16,09					-17,8	30,67	
	Valor p	0,000					0,000	0,000	
MC2.19	$1 - \frac{(aMC1+2,789)^{1,9865} - 1}{3,096}$	-0,022		-0,051	0,0054			3,77	72,05
	Test t	-14,09		-15,38	11,94			25,77	
	Valor p	0,000		0,000	0,000			0,000	
MC2.20	aMC1	-0,022	0,0026					-0,61	71,97
	Intervalo menor	-0,025	0,0023					-0,91	
	Intervalo mayor	-0,019	0,0030					-0,30	
MC2.21	aMC1	-0,022				0,12		-2,05	72,05
	Intervalo menor	-0,025				0,11		-2,47	
	Intervalo mayor	-0,019				0,14		-1,64	

Tabla A.6.22 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.21

Indicadores	Modelo						
	MC2.15	MC2.16	MC2.17	MC2.18	MC2.19	MC2.20	MC2.21
Durbin-Watson	1,88	1,90	1,90	1,87	1,90	1,79	1,79
MSE (m/s ²)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
MAE (m/s ²)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16
MAPE (%)	13,43	13,38	13,38	13,57	14,77	13,96	13,96

Tabla A.6.23 Modelos para el final de la curva de salida con radios entre 190 y 700 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes					R _a ²
		R ₂	1/R ₂	w ₂	d ₂	Constante	
FC2.1	$1 - \frac{(aFC2+2,76)^{1,2737} - 1}{1,630}$		99,54	-0,010	0,0023	1,98	10,70
	Test t		3,36	-5,37	5,32	17,34	
	Valor p		0,001	0,000	0,000	0,000	
FC2.2	aFC2	-0,00076		-0,0096	0,0021		12,39
	Intervalo menor	-0,00096		-0,011	0,0015		
	Intervalo mayor	-0,00056		-0,008	0,0027		

Tabla A.6.24 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.23

Indicadores	Modelo	
	FC2.1	FC2.2
Durbin-Watson	1,28	1,36
MSE (m/s ²)	0,10	0,09
MAE (m/s ²)	0,22	0,21
MAPE (%)	162,99	161,55

Tabla A.6.25 Modelos para el final de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes					R_a^2
		V85 FC2	1/R ₂	w ₂	d ₂	Constante	
FC2.3	$1 - \frac{(aFC2+1,44)^{2,0576}-1}{2,292}$	-0,0063	-21,01	-0,0018		1,87	12,60
	Test t	-4,01	-1,12	-2,48		11,83	
	Valor p	0,000	0,262	0,014		0,000	
FC2.4	$1 - \frac{(aFC2+1,44)^{2,0553}-1}{2,289}$	-0,0057		-0,0021		1,76	12,49
	Test t	-3,85		-3,38		14,35	
	Valor p	0,000		0,001		0,000	
FC2.5	aFC2	-0,0056		-0,0024		0,30	12,71
	Intervalo menor	-0,0086		-0,0037		0,047	
	Intervalo mayor	-0,0025		-0,0011		0,55	
FC2.6	$1 - \frac{(aFC2+2,76)^{3,6609}-1}{39,61}$	-0,0058	142,815	-0,013	0,0035	1,56	14,18
	Test t	-3,77	1,87	-2,51	2,20	3,87	
	Valor p	0,000	0,064	0,013	0,029	0,000	

Tabla A.6.26 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.25

Indicadores	Modelo			
	FC2.3	FC2.4	FC2.5	FC2.6
Durbin-Watson	2,07	2,06	2,07	2,02
MSE (m/s ²)	0,06	0,06	0,06	0,06
MAE (m/s ²)	0,19	0,19	0,19	0,18
MAPE (%)	70,16	72,11	66,05	111,62

Tabla A.6.27 Modelos para el final de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m.

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes				R_a^2
		R_2	V85 FC2	w_2	d_2	
FC2.7	aFC2	0,00046	-0,0049	0,012	-0,0017	18,15
	Intervalo menor	0,00017	-0,0067	0,005	-0,0026	
	Intervalo mayor	0,00075	-0,0031	0,019	-0,0008	

Tabla A.6.28 Indicadores de los modelos de la Tabla A.6.27

Indicadores	Modelo
	FC2.7
Durbin-Watson	2,07
MSE (m/s ²)	0,02
MAE (m/s ²)	0,11
MAPE (%)	42,65

