

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS
ACTUACIONES EN CARRETERAS SOBRE LA
ACCIDENTALIDAD.
APLICACIÓN AL CASO DE LA COMUNIDAD DE MADRID**

Tomo I. MEMORIA

TESIS DOCTORAL

Ignacio Pérez Pérez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

MADRID, 1996

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL: TRANSPORTES

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS
ACTUACIONES EN CARRETERAS SOBRE LA ACCIDENTALIDAD.
APLICACIÓN AL CASO DE LA COMUNIDAD DE MADRID**

por

IGNACIO PÉREZ PÉREZ
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

dirigida por

Rafael Izquierdo de Bartolomé
Catedrático de Universidad

presentada en la

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

para la obtención del grado de
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

MADRID, 1996

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS
ACTUACIONES EN CARRETERAS SOBRE LA ACCIDENTALIDAD.
APLICACIÓN AL CASO DE LA COMUNIDAD DE MADRID**

por Ignacio Pérez Pérez

dirigida por Rafael Izquierdo de Bartolomé

Tribunal de la tesis:

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Fecha: _____ de _____ de _____.

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer al profesor Rafael Izquierdo la labor de dirección de esta tesis doctoral. De la misma forma, agradezco las aportaciones prestadas a la misma por parte de los profesores de la Cátedra de Transportes: Aniceto Zaragoza, Mario Aymerich y Andrés Monzón.

En segundo lugar, mi especial gratitud a Miguel Sobrino por la gran ayuda y dedicación otorgadas en lo concerniente a la revisión de esta investigación.

También quisiera agradecer las ideas y consejos transmitidos por Mariano Gullón y José María Pardillo que sirvieron para orientar y enriquecer esta tesis.

Mi agradecimiento a los integrantes de la Consejería de Transportes de la Comunidad de Madrid: Juan José Jarillo, Rosa Olivé, Rosario de Juan y Felipe Velasco, por las facilidades y atenciones ofrecidas que permitieron la obtención de una parte de los datos necesarios para la realización de este trabajo. Del mismo modo, mi gratitud a Isabel Herrarte, Jesús Izarzugaza y Manuel Martínez por la valiosa información proporcionada por la Dirección General de Tráfico.

Tampoco podría faltar el agradecimiento para Carlos y Aida Bonelly por su continuo estímulo y ánimo incluso desde antes del inicio de la tesis. También, para mis compañeros del Departamento de Transportes: María José Guerrero, Javier Villanueva, Hernando de Orellana-Pizarro, Javier Rodríguez, Ulises Wensell, Carmen Pérez, Gonzalo Valseca, Daniel Echeverría, José Manuel Vassallo y, en especial, para Teresa Alcaide por su revisión ortográfica.

De igual forma quisiera agradecer la valiosa ayuda otorgada por Concepción García y Luis Catalán de las bibliotecas de las Escuelas de Ingenieros de Caminos e Ingenieros Navales.

Por último, les doy las gracias a mis padres por la comprensión y el apoyo recibido durante los años de realización de esta tesis.

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	<i>xii</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>xiv</i>
RESUMEN	<i>xvii</i>
ABSTRACT	<i>xix</i>
INTRODUCCIÓN	1
1.- LA POLÍTICA DE SEGURIDAD VIAL DE LA COMUNIDAD DE MADRID	10
1.1.- INTRODUCCIÓN.....	11
1.2.- CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LA RED DE CARRETERAS DE LA COMUNIDAD.....	11
1.3.- PLANES DE CARRETERAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID MADRID	15
1.3.1.- Programas de actuación.....	18
1.3.1.1.- Actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación.....	18
1.3.1.2.- Actuaciones preventivas.....	22
2.- LA INFORMACIÓN SOBRE LA ACCIDENTALIDAD Y SU TRATAMIENTO	27
2.1.- INTRODUCCIÓN.....	28
2.2.- PARTES DE ACCIDENTES.....	28
2.3.- ANÁLISIS PARA LA MEJORA DE LA SEGURIDAD EN LA CIRCULACIÓN.....	33
2.4.- BASE DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD EN LA CIRCULACIÓN.....	38
3.- LA IDENTIFICACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS PELIGROSOS	42
3.1.- INTRODUCCIÓN.....	42
3.2.- EL CONCEPTO DE PUNTO NEGRO.....	43

3.3.- IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS NEGROS.....	47
3.3.1.- Método del número total de accidentes.....	48
3.3.2.- Método del índice de accidentes o de peligrosidad.....	50
3.3.3.- Método del número total-índice de accidentes.....	54
3.3.4.- Método del índice de control de calidad.....	55
3.3.5.- Método de la capacidad de reducción de accidentes.....	56
3.3.6.- Método del índice de gravedad de accidentes.....	57
3.3.7.- Evaluación crítica de los métodos empleados en la identificación de puntos negros.....	60
3.4.- FACTORES DE LOS ACCIDENTES.....	62
3.4.1.- Introducción.....	62
3.4.2.- Identificación de las características comunes.....	64
3.4.3.- Identificación de los factores contribuyentes.....	66
4.- LA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS ACTUACIONES DE MEJORA DE LA SEGURIDAD EN LA CIRCULACIÓN.....	71
4.1.- INTRODUCCIÓN.....	72
4.2.- ESTUDIOS ANTES Y DESPUÉS CONVENCIONALES.....	75
4.2.1.- Contrastes de significación.....	76
4.2.2.- Factores de sesgo inherentes a los estudios antes y después convencionales.....	86
4.3.- DISEÑO EXPERIMENTAL MEDIANTE EMPLAZAMIENTOS DE CONTROL.....	95
4.4.- EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS ACTUACIONES POR MEDIO DE LA ESTIMACIÓN DEL NÚMERO ESPERADO DE ACCIDENTES.....	99
4.4.1.- Introducción.....	99
4.4.2.- Método no-paramétrico.....	103
4.4.3.- Método bayesiano.....	109
4.4.3.1.- Método empírico bayesiano.....	115
4.4.3.2.- Método de la regresión multivariante.....	124
4.4.3.3.- Método de la función de regresión.....	129
4.5.- TÉCNICA DE LOS CONFLICTOS DE TRÁFICO.....	132
5.- LA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD MEDIANTE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD Y DE PELIGROSIDAD A LARGO PLAZO.....	137

5.1.- INTRODUCCIÓN.....	138
5.2.- ANÁLISIS CLÁSICO.....	140
5.2.1.- Evaluación de la efectividad a nivel individual.....	140
5.2.1.1.- Contrastes de significación basados en la distribución de Poisson.....	142
5.2.1.2.- Estimación de intervalos de confianza.....	148
5.2.2.- Evaluación para la totalidad de las actuaciones conjuntamente.....	150
5.2.3.- Evaluación para la totalidad de las actuaciones conjuntamente con corrección de la tendencia temporal.....	157
5.3.- ANÁLISIS BAYESIANO.....	160
5.3.1.- Evaluación de la efectividad a nivel individual.....	160
5.3.1.1.- Estimación del índice de peligrosidad a largo plazo.....	161
5.3.1.2.- Significación de la efectividad de una actuación a nivel individual.....	170
5.3.2.- Evaluación para la totalidad de las actuaciones conjuntamente.....	172
5.3.3.- Evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones con corrección de la tendencia temporal.....	174
6.- TOMA DE DATOS Y CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID.....	177
6.1.- INTRODUCCIÓN.....	178
6.2.- TOMA DE DATOS.....	179
6.2.1.- Datos de actuaciones.....	180
6.2.2.- Datos de intensidades de tráfico y características geométricas.....	183
6.2.3.- Datos de accidentes.....	183
6.3.- BASE DE DATOS.....	185
6.4.- CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID SEGÚN LA ACCIDENTALIDAD.....	187
7.- ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	192
7.1.- INTRODUCCIÓN.....	193
7.2.- DATOS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS.....	193
7.3.- ANÁLISIS CLÁSICO.....	196
7.3.1.- Evaluación de la efectividad a nivel individual.....	196
7.3.1.1.- Aplicación de los contrastes de significación.....	198

7.3.1.2.- Estimación de intervalos de confianza de la diferencia de medias.....	201
7.3.1.3.- Estimación de intervalos de confianza de los índices de peligrosidad.....	202
7.3.2.- Evaluación de la efectividad en el conjunto de actuaciones.....	208
7.3.2.1.- Evaluación de la efectividad sin corrección de la tendencia temporal.....	208
7.3.2.2.- Evaluación de la efectividad con corrección de la tendencia temporal.....	220
7.4.- MÉTODO EMPÍRICO BAYESIANO.....	231
7.4.1.- Introducción.....	231
7.4.2.- Evaluación de la efectividad a nivel individual.....	231
7.4.3.- Evaluación de la efectividad en el conjunto de actuaciones.....	243
7.4.3.1.- Evaluación de la efectividad sin corrección de la tendencia temporal.....	243
7.4.3.2.- Evaluación de la efectividad con corrección de la tendencia temporal.....	251
7.5.- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO CLÁSICO Y EL EMPÍRICO BAYESIANO.....	258
7.6.- COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN FINAL DE LOS RESULTADOS EN EL CONJUNTO DE ACTUACIONES.....	274
8.- CONCLUSIONES.....	279
BIBLIOGRAFÍA.....	285

ÍNDICE ANEXOS

- 1.- TRAMIFICACIÓN.
- 2.- DATOS GEOMÉTRICOS Y NOMENCLATURAS.
- 3.- INTENSIDADES MEDIAS DIARIAS
- 4.- CATEGORÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIANZA.
- 5.- ANÁLISIS DE LA VARIANZA.
- 6.- ACTUACIONES EN TRAMOS DE CARRETERA CON UNA IMD MENOR DE 1000 V/D.

7.- ANÁLISIS CLÁSICO.

7-A.- ACONDICIONAMIENTOS.

7-A-1.- ESTIMACIÓN DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD.

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD.

CONTRASTE NORMAL.

LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LA DIFERENCIA DE MEDIAS.

7-A-2.- CONTRASTE BINOMIAL.

7-A-3.- LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD.

7-A-4.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD GAMMA.

7-A-2.- CORRELACIÓN Y COVARIANZA.

7-B.- REFUERZOS.

7-B-1.- ESTIMACIÓN DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD.

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD.

CONTRASTE NORMAL.

LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LA DIFERENCIA DE MEDIAS.

7-B-2.- CONTRASTE BINOMIAL.

7-B-3.- LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD.

7-B-4.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD GAMMA.

7-B-5.- CORRELACIÓN Y COVARIANZA.

7-C.- ACONDICIONAMIENTOS CON CORRECCIÓN DE LA TENDENCIA TEMPORAL.

7-C-1.- FACTORES DE PONDERACIÓN.

ÍNDICES DE PELIGROSIDAD PONDERADOS.

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD.

7-C-2.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD GAMMA.

7-C-3.- CORRELACIÓN Y COVARIANZA.

7-D.- REFUERZOS CON CORRECCIÓN DE LA TENDENCIA TEMPORAL.

7-D-1.- FACTORES DE PONDERACIÓN.

ÍNDICES DE PELIGROSIDAD PONDERADOS.

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD.

7-D-2.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD GAMMA.

7-D-3.- CORRELACIÓN Y COVARIANZA.

8.- ANÁLISIS BAYESIANO.

8-A.- ACONDICIONAMIENTOS.

8-A-1.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN A PRIORI.

8-A-2.- ESTIMACIÓN DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD A LARGO PLAZO.

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD.

8-A-3.- SIGNIFICACIÓN DEL CAMBIO REGISTRADO EN EL ÍNDICE DE PELIGROSIDAD. A LARGO PLAZO.

8-A-4.- LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD A LARGO PLAZO.

8-A-5.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN GAMMA DEL CONJUNTO DE TRAMOS.

8-A-6.- CORRELACIÓN Y COVARIANZA.

8-B.- REFUERZOS.

8-B-1.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN A PRIORI.

8-B-2.- ESTIMACIÓN DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD A LARGO PLAZO.

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD.

8-B-3.- SIGNIFICACIÓN DEL CAMBIO REGISTRADO EN EL ÍNDICE DE PELIGROSIDAD A LARGO PLAZO.

8-B-4.- LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD A LARGO PLAZO.

8-B-5.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN GAMMA DEL CONJUNTO DE TRAMOS.

8-B-6.- CORRELACIÓN Y COVARIANZA.

8-C.- ACONDICIONAMIENTOS CON CORRECCIÓN DE LA TENDENCIA TEMPORAL.

8-C-1.- FACTORES DE PONDERACIÓN.

ÍNDICES DE PELIGROSIDAD A LARGO PLAZO PONDERADOS.

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD.

8-C-2.- LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD PONDERADOS.

8-C-3.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD GAMMA.

8-C-4.- CORRELACIÓN Y COVARIANZA.

8-D.- REFUERZOS CON CORRECCIÓN DE LA TENDENCIA TEMPORAL.

8-D-1.- FACTORES DE PONDERACIÓN.

ÍNDICES DE PELIGROSIDAD A LARGO PLAZO PONDERADOS.

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD.

LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD PONDERADOS.

8-D-2.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD GAMMA.

8-D-3.- CORRELACIÓN Y COVARIANZA.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.-	Nº de puntos y tramos negros en las carreteras de la <i>CAM</i>	21
Tabla 3.1.-	Valores de z_c según el nivel de confianza.....	52
Tabla 3.2.-	Factores de gravedad.....	59
Tabla 6.1.-	Clasificación previa de las carreteras de la <i>CAM</i>	188
Tabla 6.2.-	Medias de los índices de peligrosidad en la clasificación previa.....	188
Tabla 6.3.-	Análisis de la varianza de la clasificación previa.....	189
Tabla 6.4.-	Test de Scheffé.....	189
Tabla 6.5.-	Clasificación definitiva de las carreteras de la <i>CAM</i>	190
Tabla 6.6.-	Medias de los índices de peligrosidad en la clasificación definitiva.....	190
Tabla 6.7.-	Análisis de la varianza de la clasificación definitiva.....	191
Tabla 7.1.-	Método clásico. Evaluación de la efectividad en acondicionamientos a nivel individual.....	203
Tabla 7.2.-	Método clásico. Evaluación de la efectividad en acondicionamientos a nivel individual (continuación).....	204
Tabla 7.3.-	Método clásico. Evaluación de la efectividad en refuerzos a nivel individual....	205
Tabla 7.4.-	Método clásico. Evaluación de la efectividad en refuerzos a nivel individual (continuación).....	206
Tabla 7.5.-	Resumen de los contrastes de significación en acondicionamientos.....	207
Tabla 7.6.-	Resumen de los contrastes de significación en refuerzos.....	207
Tabla 7.7.-	Valores de los parámetros en acondicionamientos.....	210
Tabla 7.8.-	Resumen de los contrastes de bondad del ajuste en acondicionamientos.....	211
Tabla 7.9.-	Valores de los parámetros en refuerzos.....	215
Tabla 7.10.-	Resumen de los contrastes de bondad del ajuste en refuerzos.....	216
Tabla 7.11.-	Valores de los parámetros en ambos períodos en acondicionamientos con corrección de la tendencia temporal.....	222
Tabla 7.12.-	Resumen de los contrastes de bondad del ajuste en acondicionamientos con corrección de la tendencia temporal.....	223
Tabla 7.13.-	Valores de los parámetros en ambos períodos en refuerzos con corrección de la tendencia temporal.....	227

Tabla 7.14.- Resumen de los contrastes de bondad del ajuste en refuerzos con corrección de la tendencia temporal.....	228
Tabla 7.15.- Valores de la distribución a priori en acondicionamientos.....	232
Tabla 7.16.- Valores de la distribución a priori en refuerzos.....	232
Tabla 7.17.- Método empírico bayesiano. Efectividad de las actuaciones de acondicionamiento a nivel individual.....	238
Tabla 7.18.- Método empírico bayesiano. Efectividad de las actuaciones de acondicionamiento a nivel individual (continuación).....	239
Tabla 7.19.- Método empírico bayesiano. Efectividad de las actuaciones de refuerzo a nivel individual.....	240
Tabla 7.20.- Método empírico bayesiano. Efectividad de las actuaciones de refuerzo a nivel individual (continuación).....	241
Tabla 7.21.- Resumen de los niveles de significación en acondicionamientos.....	242
Tabla 7.22.- Resumen de los niveles de significación en refuerzos.....	242
Tabla 7.23.- Resultados de la función de densidad Gamma ajustada a los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior y posterior a las actuaciones de acondicionamiento.....	244
Tabla 7.24.- Resultados de la función de densidad Gamma ajustada a los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior y posterior a las actuaciones de refuerzo de firmes.....	246
Tabla 7.25.- Resultados de la función de densidad Gamma ajustada a los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior y posterior a las actuaciones de acondicionamiento (con corrección de la tendencia temporal).....	252
Tabla 7.26.- Resultados de la función de densidad Gamma ajustada a los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior y posterior a las actuaciones de refuerzo de firme (con corrección de la tendencia temporal).....	253
Tabla 7.27.- Comparación entre el método clásico y bayesiano en acondicionamientos.....	264
Tabla 7.28.- Comparación entre el método clásico y bayesiano en refuerzos.....	269
Tabla 7.29.- Efectividad promedio de las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo.....	275

LISTA DE FIGURAS

Figura 0.1	Esquema del proyecto de investigación.....	9
Figura 1.1	Distribución de la red de carreteras inventariada en la <i>CAM</i>	13
Figura 1.2	IMD en la <i>CAM</i> según tipo de red.....	14
Figura 1.3	Secciones medias de plataforma en la <i>CAM</i> según tipos de red.....	15
Figura 2.1	Proceso de toma de datos de accidentes de tráfico.....	30
Figura 2.2	Proceso evaluatorio de las actuaciones de mejora de la seguridad vial.....	37
Figura 3.1	Método del número total de accidentes.....	49
Figura 3.2	Identificación de puntos negros mediante el índice de accidentes.....	53
Figura 3.3	Matriz de identificación de puntos negros.....	54
Figura 3.4	Factores de los accidentes.....	64
Figura 3.5	Secuencia del análisis detallado de puntos negros.....	70
Figura 4.1	Evaluación de la efectividad mediante estudios antes y después convencionales.....	85
Figura 4.2	Evaluación de la efectividad mediante emplazamientos de control.....	98
Figura 4.3	Evaluación de la efectividad empleando el número esperado de accidentes.....	102
Figura 4.4	Regla de estimación del método no-paramétrico.....	106
Figura 4.5	Método no-paramétrico.....	108
Figura 4.6	Método empírico bayesiano paramétrico.....	119
Figura 4.7	Método de la regresión multivariante.....	128
Figura 4.8	Método de la función de regresión.....	131
Figura 4.9	Técnica de los conflictos de tráfico.....	136
Figura 7.1	Períodos para la toma de datos de accidentes.....	195
Figura 7.2	Períodos para la toma de datos de la exposición al riesgo.....	195
Figura 7.3	Evaluación de la efectividad mediante el método clásico.....	197
Figura 7.4	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad en el período anterior a las actuaciones de acondicionamiento.....	213
Figura 7.5	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad en el período posterior a las actuaciones de acondicionamiento.....	214

Figura 7.6	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad en el período anterior a las actuaciones de refuerzo.....	218
Figura 7.7	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad en el período posterior a las actuaciones de refuerzo.....	219
Figura 7.8	Evolución del número anual de accidentes en la Comunidad de Madrid.....	221
Figura 7.9	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad ponderados en el período anterior a las actuaciones de acondicionamiento.....	225
Figura 7.10	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad ponderados en el período posterior a las actuaciones de acondicionamiento.....	226
Figura 7.11	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad ponderados en el período anterior a las actuaciones de refuerzo.....	229
Figura 7.12	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad ponderados en el período posterior a las actuaciones de refuerzo.....	230
Figura 7.13	Método empírico bayesiano adaptado a la evaluación de la efectividad de las actuaciones de seguridad vial, empleando el índice de peligrosidad a largo plazo, antes y después de las actuaciones.....	236
Figura 7.14	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior a las actuaciones de acondicionamiento.....	247
Figura 7.15	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo en el período posterior a las actuaciones de acondicionamiento.....	248
Figura 7.16	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior a las actuaciones de refuerzo.....	249
Figura 7.17	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo en el período posterior a las actuaciones de refuerzo.....	250

Figura 7.18	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo ponderados en el período anterior a las actuaciones de acondicionamiento.....	254
Figura 7.19	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo ponderados en el período posterior a las actuaciones de acondicionamiento.....	255
Figura 7.20	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo ponderados en el período anterior a las actuaciones de refuerzo.....	256
Figura 7.21	Función de distribución Gamma ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo ponderados en el período posterior a las actuaciones de refuerzo.....	257
Figura 7.22	Comparación entre el índice de peligrosidad y el índice de peligrosidad a largo plazo en el período anterior en acondicionamientos.....	265
Figura 7.23	Comparación entre el índice de peligrosidad y el índice de peligrosidad a largo plazo en el período posterior en acondicionamientos.....	265
Figura 7.24	Comparación entre las efectividades obtenidas mediante el método clásico y el empírico bayesiano en actuaciones de acondicionamiento.....	266
Figura 7.25	Comparación entre el índice de peligrosidad y el índice de peligrosidad a largo plazo en el período anterior en refuerzos.....	270
Figura 7.26	Comparación entre el índice de peligrosidad y el índice de peligrosidad a largo plazo en el período posterior en refuerzos.....	270
Figura 7.27	Comparación entre las efectividades obtenidas mediante el método clásico y el empírico bayesiano en actuaciones de refuerzos.....	271

RESUMEN

Las administraciones de carretera ejecutan preferentemente, para mejorar la seguridad en la circulación, dos tipos de actuaciones sobre la infraestructura viaria: *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación* y *actuaciones preventivas*.

Con objeto de optimizar los recursos económicos disponibles para la ejecución de aquellas actuaciones que resulten más efectivas desde el punto de vista de la reducción de la accidentalidad, es necesario evaluar previamente estas actuaciones para seleccionar las más convenientes.

En esta tesis se han desarrollado dos procedimientos que permiten evaluar la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación tanto *puntuales* como *preventivas*. El primer procedimiento se basa en el *análisis estadístico clásico* y el segundo en el *análisis estadístico bayesiano*. Ambos métodos comparan las condiciones de seguridad en la circulación antes y después de la ejecución de las actuaciones. Mediante el *análisis clásico*, se utiliza el *índice de peligrosidad* para comparar las condiciones de seguridad; mientras que a través del *análisis bayesiano* se emplea el *índice de peligrosidad a largo plazo*. Además, los dos métodos de evaluación se desarrollan tanto a nivel individual como para el conjunto de las actuaciones.

Con el fin de aplicar los procedimientos mencionados anteriormente se tomaron las actuaciones de *acondicionamiento* y *refuerzo de firmes* ejecutadas en las carreteras de la red de la Comunidad de Madrid. Éstas no se pueden considerar como *actuaciones puntuales* pero sí como *actuaciones preventivas* de mejora de la seguridad.

La evaluación de los dos tipos de actuaciones mediante los dos métodos, arrojaron como resultado que, por término medio, las de *acondicionamiento* mejoran *significativamente* las condiciones de seguridad en la circulación y las de *refuerzo de firmes* las empeoran, aunque dicho empeoramiento no resulta *estadísticamente significativo*.

Por otra parte, al realizar el análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante los dos procedimientos de evaluación, se llega a la conclusión de que el procedimiento basado en el análisis *bayesiano* resulta más conveniente para la evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación.

ABSTRACT

In order to improve traffic safety, highway authorities implement two kind of measures in road infraestructure: punctual actions to improve traffic safety and preventive ones.

Trying to optimizing available economic resources allocated to the execution of more efficient from the point of view of road safety, involves previous evaluation of these measures to select those more suitable.

Through this Thesis two procedures have been developed to evaluate efficiency of both punctual and preventive measures to improve traffic safety. The first procedure is based upon classic statistical analysis; the second one in bayesian statistical analysis. Both methods compare security levels before and after the implementation of these measures. In the classic analysis, the accident rate is used to compare security conditions. On the other hand, the bayesian analysis uses the long run accident rate. Moreover, both methods are suitable to analyse individual or aggregate of measures.

To apply these procedures, highway conditioning and rehabilitation of existing pavement proyects in Madrid Regional Government owned highway network were considered. These actions con not be deemed as punctual actions but as preventive actions to improve road safety.

Evaluation using both methods showed that conditioning measures significantly traffic safety levels; on the opposite, rehabilitation of existing pavement measures result in worse safety levels, though not statistical significant.

When comparatively results obtained with both evaluation methods are analyzed, it can be concluded that the one based upon bayesian theory is more suitable for the evaluation of the effectivity of measures to improve traffic safety.

INTRODUCCIÓN.

Los accidentes de tráfico ocasionados en las carreteras de la Unión Europea dan lugar anualmente a un número aproximado de 50.000 muertos y más de 1 millón y medio de heridos. A pesar de que el perjuicio familiar y social derivado de las muertes y lesiones producidas en dichos accidentes es de muy difícil cuantificación, los expertos evalúan el coste económico de los mismos en unos de 70.000 millones de ecus. Por otra parte, España ocupa el segundo lugar, entre los países de la Unión Europea, en el número de muertos en accidentes de carretera con una cifra que, en 1989, alcanzó las 9.333 víctimas mortales computadas en el plazo de los 30 días posteriores al siniestro.

Ante éstas u otras alarmantes estadísticas similares, el Tratado de la Unión Europea incluyó, en su día, una modificación del artículo 75. En él se indica expresamente que la política común de transportes debería contemplar medidas que permitan mejorar la seguridad en los transportes. En este sentido, el Grupo de expertos de alto nivel formado por representantes de los gobiernos de los Estados miembros consideró, en Abril de 1992, la mejora de la capacidad y de la calidad de las redes de carreteras entre los campos prioritarios de los programas de acción comunitaria, por ser éste un factor que incrementa de forma duradera y efectiva las condiciones de circulación al minimizar el riesgo de accidentalidad vial.

Por su parte, dada la importancia del problema en nuestro país, el Senado en un reciente Dictamen sobre seguridad vial incluyó nueve propuestas sobre actuaciones en la vía, todas ellas destinadas a la mejora de la seguridad en la circulación.

A pesar de la existencia de un cierto consenso en la sociedad española sobre la necesidad de tomar las medidas adecuadas para disminuir los accidentes, las alarmantes cifras relativas a los mismos se repiten año tras año. En las últimas décadas, la siniestralidad de tráfico ha ido aumentando considerablemente a la vez que aumentaba el flujo circulatorio por las carreteras españolas; de tal manera que, aunque los *índices de peligrosidad* se han mantenido en unas tasas aceptables, el número de accidentes, en valor absoluto, se ha incrementado notablemente.

Existen multitud de medidas que pueden ser adoptadas por las autoridades concernidas por el problema para hacer disminuir las abultadas cifras de siniestros que reflejan las estadísticas oficiales. Estas medidas o actuaciones pueden variar desde aquéllas que se toman para aumentar la seguridad de los vehículos, hasta las que permiten mejorar la eficacia de la vigilancia policial, pasando por campañas de educación e información ciudadana. Entre estas intervenciones administrativas cabe citar también, como no, la mejora de la propia infraestructura viaria.

Cabe señalar también que en la planificación de las carreteras españolas - sean éstas de las Comunidades Autónomas, o sean de la Administración Central que gestiona la Red de Carreteras del Estado - se hace hincapié actualmente en un incremento de la seguridad vial a través de la mejora de la infraestructura. En consecuencia, se aprueban partidas presupuestarias con el objetivo de eliminar las deficiencias o los factores de riesgo de aquellas zonas o puntos donde se producen más accidentes.

Sin embargo, en nuestro país poco se ha investigado para esclarecer las causas reales de los accidentes que pueden ser atribuidas a la infraestructura dentro de una red de carreteras. Tampoco se tienen datos objetivos acerca de las características de las

actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación o de ingeniería de carreteras que producen una mayor o menor reducción del número de accidentes.

No obstante, hay que tener en cuenta que los accidentes de tráfico son fenómenos muy complejos en los que intervienen una multitud de factores que están interrelacionados, lo cual dificulta bastante la investigación sobre las causas reales de los mismos.

Todos los planes de seguridad vial suelen proponer una serie de actuaciones para disminuir los riesgos inherentes a la circulación; sin embargo estos planes no suelen tener en cuenta criterios de eficacia que permiten discriminar, entre todas las actuaciones posibles, aquéllas que minimizan las estadísticas de siniestralidad. En coherencia con este planteamiento, la Comisión Europea ha presentado un proyecto de creación de un banco de datos comunitario sobre los accidentes de carretera en Europa. Este banco de datos permitirá disponer de la información estadística necesaria para realizar estudios, investigaciones y análisis en los ámbitos relativos a la seguridad vial. Esta información contribuirá a paliar el vacío existente en la actualidad, facilitando la identificación y tipificación de las causas que motivan los accidentes de tráfico como paso previo a la definición de las actuaciones más eficaces en la lucha contra la accidentalidad.

En los estudios de accidentalidad que se realizan en España para identificar *emplazamientos peligrosos* o para evaluar la efectividad de una actuación llevada a cabo en uno o varios emplazamiento, se suele tomar como punto de partida el *número de accidentes registrados* durante un cierto período de tiempo. Sin embargo, diversas investigaciones han puesto de manifiesto, como se verá a lo largo de esta tesis, que éste es un planteamiento poco satisfactorio. El *número de accidentes registrados* producido en un emplazamiento durante un período de tiempo anterior a la ejecución de una determinada actuación, no es

un buen estimador del *número esperado de accidentes*. Esto se debe a que el número de accidentes acaecidos en un determinado emplazamiento se comporta como una variable aleatoria que fluctúa en torno al *número esperado de accidentes* y, como consecuencia de ello, está sujeta al fenómeno estadísticamente conocido como *regresión a la media*.

En España existe la necesidad de que los estudios de accidentes de tráfico se hagan mediante un planteamiento estocástico que sustituya a la concepción determinista que subyace a la mayoría de los trabajos sobre el tema realizados hasta el momento. Es por ello, que el principal objetivo de esta tesis se puede enunciar como *el diseño de dos procedimientos de evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación, uno basado en el análisis estadístico clásico y otro en el bayesiano*. Para su contrastación empírica, estos procedimientos se aplican, en concreto, al estudio de la incidencia de las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo de firmes de carretera sobre la accidentalidad. Con tal propósito, se comparan los resultados obtenidos a través del *análisis estadístico clásico* con los obtenidos mediante el *método empírico bayesiano*, a fin de determinar cuál de estos dos enfoques resulta más adecuado a los propósitos evaluatorios de esta tesis.

Aunque las actuaciones de *acondicionamiento y refuerzo de firme* de carretera de una calzada y dos carriles, ejecutadas en la Comunidad de Madrid, no se consideren hasta el momento como actuaciones específicas de mejora de la seguridad en la circulación, éstas pueden, sin embargo, ser calificadas como actuaciones preventivas y, por lo tanto, utilizarse como base para el desarrollo de un procedimiento de evaluación de la efectividad que, por extensión, siempre es susceptible de aplicación en las actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación propiamente dichas.

Las distintas fases en las que se organizó el proceso seguido en esta investigación están reflejadas en el diagrama de flujo contemplado en la figura 0.1. Con fines expositivos, el contenido de esta memoria de tesis se estructuró de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se describe, a modo de contexto, la política de seguridad vial de la Comunidad de Madrid. Esto se realiza así para analizar como se enfrenta la Comunidad de Madrid al problema de la accidentalidad en sus carreteras. La política de seguridad vial se estudia desde el punto de vista de las actuaciones realizadas en la infraestructura viaria. Este estudio puso de manifiesto que, para los fines de esta tesis, las actuaciones viarias pueden agruparse en dos categorías: *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación* y *actuaciones preventivas*.

En el capítulo 2 se describe la forma en que se recopila la información acerca de los accidentes de circulación a través de los partes de accidentes registrados por los agentes de tráfico. A continuación, se estudian los tipos de análisis que, a partir de los datos de accidentes y de la infraestructura, pueden ser realizados por los ingenieros de tráfico que tienen como cometido la mejora en la seguridad de la circulación. Los tipos de análisis que ahí se abordan son los siguientes: *identificación del problema*, *evaluación de corte transversal* y *evaluación longitudinal*. Por último, el capítulo se cierra con la descripción de cómo suelen ser utilizados los sistemas de información para el tratamiento de datos similares a los mencionados anteriormente.

En el capítulo 3 se ofrece una exposición del análisis concerniente a la identificación de los *emplazamientos peligrosos* o *puntos negros*, haciendo una descripción de los métodos más frecuentemente utilizados para este fin, así como de las ventajas e inconvenientes derivados de los mismos. Esta descripción se justifica por que, como ya se

verá más adelante, esta clase de análisis está estrechamente relacionada con la manera en que suele evaluarse la efectividad de las actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación.

En el capítulo 4 se especifica cuáles son los principales métodos utilizados para la evaluación de la efectividad de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación, explicando las principales dificultades que se presentan a la hora de acometer dicha evaluación. Los métodos más convencionales utilizados en la evaluación de las actuaciones suelen recurrir a la comparación del *número de accidentes registrados* antes y después de la ejecución de la actuación de mejora de la seguridad en la circulación en *un* emplazamiento. Aunque, tal y como se verá en dicho capítulo, a los efectos de esa evaluación también se puede comparar el *número de accidentes registrados* en el período posterior a la ejecución de la actuación con el *número esperado de accidentes* en el emplazamiento.

En el capítulo 5 se analizan los procedimientos que se van a aplicar en esta tesis para la evaluación de la efectividad de las actuaciones. El punto de partida lo constituyen los *estudios antes y después*. La exposición comienza por la descripción de las herramientas utilizables en el *análisis estadístico clásico* que, en esta ocasión, se aborda de forma diferente a la realizada en el capítulo anterior. Aquí se comparan los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación, tanto individualmente como para un conjunto de actuaciones similares. A continuación se expone la aplicación del método *empírico bayesiano* a la evaluación de la efectividad de las actuaciones, con este fin se comparan los *índices de peligrosidad a largo plazo* en el período anterior y posterior a las actuaciones. La aplicación del método basado en el análisis *bayesiano* a la evaluación de la efectividad se lleva a cabo tanto para una actuación individualizada, como para un conjunto de actuaciones de la misma categoría.

En el capítulo 6 se describe el proceso de la búsqueda de datos sobre los accidentes y las actuaciones que van a ser evaluadas mediante la aplicación de los procedimientos explicados en el capítulo anterior. Este capítulo da cuenta también de la base de datos utilizada en esta tesis para recopilar las informaciones de las actuaciones, de los accidentes, de las intensidades de tráfico y de la infraestructura viaria. Por último, se realizó un *análisis de la varianza* con el fin de elaborar una clasificación de la red de carreteras de la Comunidad de Madrid basada en criterios taxonómicos de accidentalidad.

En el capítulo 7 se lleva a cabo la aplicación de la metodología expuesta en el capítulo 5 a los datos descritos en el capítulo 6. La aplicación y resultados de la metodología se ofrecen separando el método *clásico* del método *empírico bayesiano*. Asimismo, se realiza una comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos y, por último, se hace una discusión final sobre los resultados de la evaluación efectividad promedio en el conjunto de las actuaciones.

En el capítulo 8 se enuncian las conclusiones de esta tesis doctoral y se hacen una serie de recomendaciones de carácter general. Por último, a modo de cierre, se exponen las futuras líneas de investigación que de este trabajo se derivan.

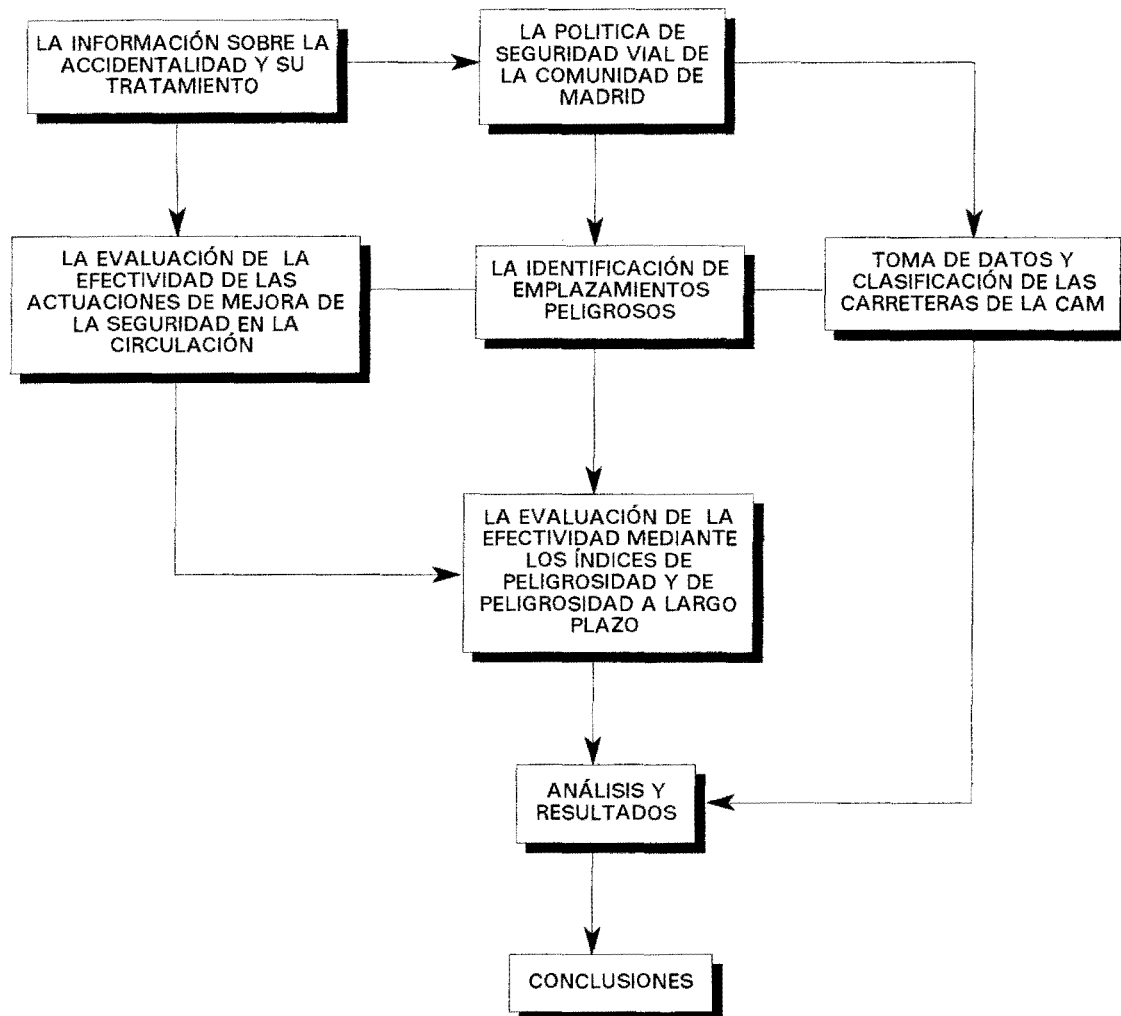


Figura 0.1. Esquema del proyecto de investigación.

CAPÍTULO 1

*LA POLÍTICA DE SEGURIDAD VIAL DE LA COMUNIDAD DE
MADRID.*

1.1.- INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se hace una exposición de cual ha sido la política de la Comunidad de Madrid en materia de seguridad vial tomando como referencia para ello los planes de carreteras elaborados por su Consejería de Transportes.

Para los propósitos de esta investigación y a modo de contexto, es oportuno comenzar describiendo cómo ha acometido la Comunidad de Madrid el fenómeno de la accidentalidad en sus carreteras. Ello permitirá ilustrar el marco de referencia en el que se inscribe la problemática metodológica que desarrolla esta tesis.

El análisis de este marco de referencia pondrá de manifiesto cuáles han sido los criterios imperantes a la hora de decidir la ejecución de las *actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación* en la Comunidad de Madrid, como un paso previo al desarrollo de los procedimientos de evaluación de la efectividad de las mismas.

1.2.- CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LA RED DE CARRETERAS DE LA COMUNIDAD.

La Comunidad de Madrid se constituyó el 25 de Febrero de 1983, tras la publicación de la Ley Orgánica del Estatuto de Autonomía, mediante la cual se asumieron por parte de la Comunidad la plena competencia en lo referente a las carreteras cuyo itinerario discurre íntegramente en su territorio. La red de carreteras de la Comunidad de Madrid está

constituida por las provenientes de la red de la antigua Diputación Provincial, así como por las transferidas por la Administración Central. Todas ellas suman, en conjunto, una longitud de 2.760 Km.

Desde el punto de vista de la *funcionalidad*, la Consejería de Transportes divide la red en tres categorías (Comunidad de Madrid, 1993b y 1994a):

- **Red principal.**- *Las Carreteras incluidas en esta categoría deben atender las siguientes funciones:*
 1. *Canalizar el tráfico de largo recorrido y el de tránsito a través de la Comunidad de Madrid y el Área Metropolitana.*
 2. *Asegurar la conexión entre los principales puntos básicos del territorio.*
 3. *Asegurar las conexiones de primer orden con los territorios limítrofes.*

- **Red secundaria.**- *Completa a la Red Principal asumiendo las funciones de:*
 1. *Canalizar el tráfico de corto recorrido por sí misma o hacia la Red Principal.*
 2. *Unir las cabeceras de Comarca o puntos de cierta entidad en el territorio no unido por la Red Principal.*
 3. *Facilitar las conexiones de segundo rango con los territorios limítrofes.*
 4. *Configurar caminos alternativos a la Red Principal cuando el tráfico lo justifique.*
 5. *Configurar una red que asegure una cobertura total y adecuada al espacio regional.*

- **Red local.**- *Está constituida por aquellas carreteras que, no formando parte de la Principal o secundaria, deben cumplir lo siguiente:*
 1. *Garantizar la circulación intermunicipal y la conexión entre núcleos no situados sobre alguna de las redes antes definidas y éstas.*
 2. *Dar acceso rodado a todos los núcleos de población.*

3. Servir de soporte a la explotación de recursos naturales, accesos a lugares de interés turístico y otros objetivos de carácter similar.

Del total de 2.760 kilómetros de carreteras de la Comunidad, en 1993 estaban inventariados 2.457 kilómetros; de ellos el 24,3% pertenece a la *red principal*, el 17,6% a la *secundaria*, y el 58,1% a la *local* (figura 1.1).

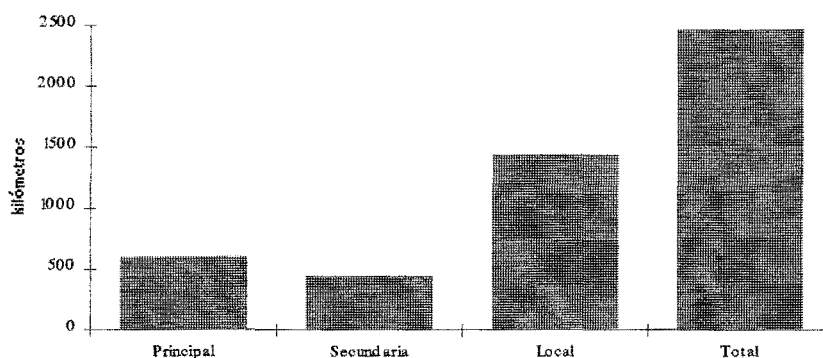


Figura 1.1. Distribución de la red de carreteras inventariada en la CAM.

El 47,2% de los kilómetros de la *red principal* registró unas intensidades medias de vehículos situadas en el intervalo de 5.000-15.000 vehículos/día. En el resto de esta red, un 24,2% de la misma tiene intensidades superiores a los 15.000 vehículos/día y un 28,6% inferiores a los 5.000 vehículos/día. Por otra parte, cerca de un 90% de la *red secundaria* se encuentra por debajo de los 5.000 vehículos/día. Finalmente, el 83 % de la *red local* está situada por debajo de los 2.000 vehículos/día, con más de 1000 Km. que no rebasan el umbral de los 1.000 vehículos/día (figura 1.2).

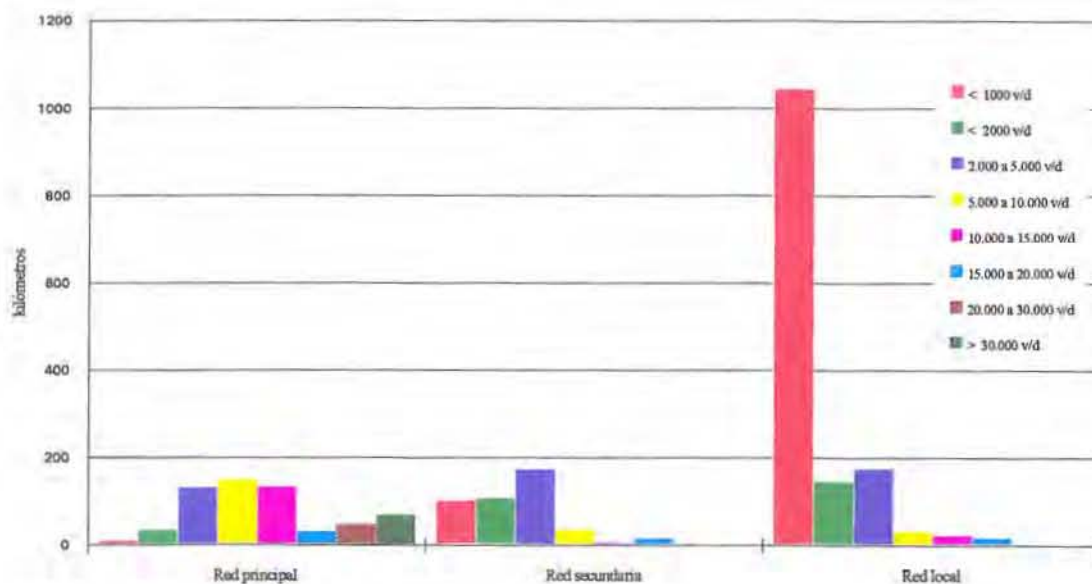


Figura 1.2. IMD en la CAM según tipo de red.

En cuanto a las secciones de plataforma, cabe decir que un 18% de la *red principal* y un 2,3% de la *red secundaria* son *carreteras desdobladas*; como es de esperar en razón de su funcionalidad, en la *red local* no existen este tipo de calzadas. Las *carreteras de una sola calzada* corresponde al grueso de la red de la Comunidad, con secciones de plataforma variable para los tres tipos de redes. En la figura 1.3 se ve claramente que las *carreteras desdobladas* en la Comunidad de Madrid están situadas en su mayoría en la *red principal*, y además corresponden a las carreteras con mayores intensidades de tráfico.

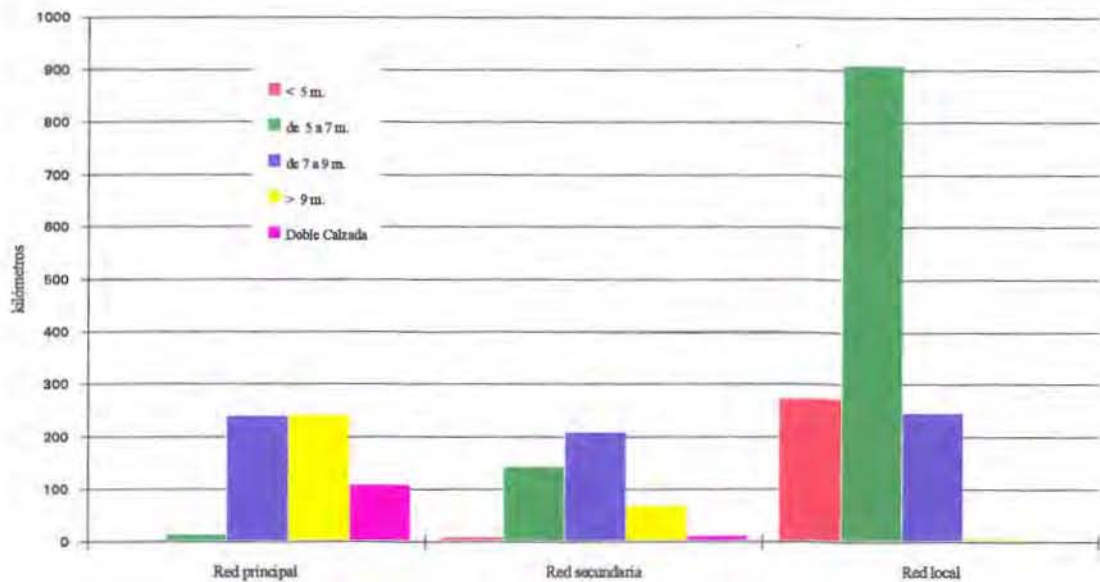


Figura 1.3. Secciones medias de plataforma en la CAM según tipos de red.

1.3.- PLANES DE CARRETERAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID.

Hasta el momento se han aprobado dos planes de carreteras: el primero corresponde a los años 1986-1993 y el segundo a los años 1994-2001. Una de las principales justificaciones del plan de carreteras 1986-1993 era realizar, desde el punto de vista económico, las inversiones necesarias para extraer la máxima rentabilidad social.

Por otra parte, entre los objetivos específicos del Plan de Carreteras 1986-1993, en el apartado 4.2.4. de dicho plan, dentro de aquellos objetivos relacionados con el tráfico, se encontraba el siguiente propósito (Comunidad de Madrid, 1985):

"...mejorar la seguridad de la red viaria, reduciendo el número de accidentes."

y así mismo en el epígrafe 4.2.5, esta vez entre los objetivos relacionados con el tipo de inversión estaba el de:

"...buscar el máximo aprovechamiento de las infraestructura existentes, dando prioridad a las actuaciones de mejora y conservación frente a las de construcción de nueva infraestructura."

Puede observarse que existía una preocupación en el Plan de Carreteras 1986-1993 por *incrementar las condiciones de seguridad de la red*. Esta preocupación estaba relacionada con el explícito interés de mejorar y conservar la red de carreteras existentes en la Comunidad de Madrid. Además, tal y como se ha mencionado anteriormente, las inversiones necesarias para lograr estos objetivos debían ser realizadas de forma racional, buscando siempre la máxima rentabilidad social de las actuaciones.

Por supuesto, en el Plan de Carreteras 1986-1993 existían otros objetivos como, por ejemplo, mejorar la accesibilidad o ser un instrumento eficaz de ordenación del territorio. Pero en lo que se refiere a la seguridad vial, interesan los objetivos ya mencionados en párrafos anteriores y estudiar también cuáles fueron las actuaciones propuestas y realizadas con el fin de alcanzar las pretensiones de seguridad vial contempladas en el Plan.

En el mismo orden de ideas, en la presentación de la Memoria Resumen del Plan de Carreteras 1993-2001, se menciona expresamente lo siguiente (Comunidad de Madrid, 1994a):

"...es objeto preferente de la actuación en la red de carreteras contenida en este II Plan la mejora de las condiciones de la seguridad vial. La eficacia de las actuaciones dirigidas a este fin estriba no tanto en elaborar un programa similar destinado a este objeto cuanto en incorporar a todos y cada uno de los proyectos y obras con incidencia en la red un contenido específico de seguridad vial."

En el capítulo 2º de la referida Memoria Resumen se enumeran los objetivos del Plan y los criterios de intervención. Dentro de los objetivos generales se reduda en el tema de la seguridad y se expresa lo siguiente:

"...incorporar a la totalidad de las actuaciones en la red de carreteras los contenidos precisos para conseguir unas mejores condiciones de seguridad vial."

y también:

"...conseguir la máxima eficacia de los recursos económicos dedicados a la construcción y gestión de la red viaria, desde el punto de vista de los objetivos perseguidos y necesidades planteadas."

Como puede verse, en el Plan de Carreteras 1993-2001 también existe una preocupación manifiesta por las cuestiones de seguridad vial, haciendo hincapié en la necesidad de incorporar, en cada uno de los proyectos que se van a ejecutar, un contenido de seguridad vial, en detrimento de un plan específico de seguridad vial. Por lo tanto, puede decirse que la política de Seguridad Vial de la Consejería de Transportes de la Comunidad de Madrid no está basada en la elaboración de un *plan de seguridad vial*, sino mas bien que éste es un factor complementario a tener en cuenta en la ejecución de las obras con incidencia en la red de carreteras. Por último, es de resaltar también la introducción en este segundo Plan de Carreteras de la preocupación por la *eficacia de las actuaciones*, lo cual marca una diferencia conceptual importante con respecto al Plan 1986-1993.

Después de haber examinado los objetivos principales relacionados con la seguridad vial de ambos Planes de Carreteras, en el siguiente apartado se expondrán los medios de los cuales se valen o se han valido las autoridades de la Consejería de Transportes de la Comunidad de Madrid para lograr dichos objetivos.

1.3.1.- Programas de actuación.

Dentro de los programas de actuación definidos en los planes de Carreteras 1986-1993 y 1993-2001 cabe distinguir entre las *actuaciones puntuales para la mejora de la seguridad en la circulación* y las *actuaciones que se ejecutan con otros objetivos aparte del de mejora de la seguridad*.

En el apartado anterior se había mencionado que en la Comunidad de Madrid no existía un plan específico de seguridad vial, sin embargo, sí se realizan actuaciones en carreteras entre cuyos objetivos se contempla el de mejorar la seguridad en la circulación de las mismas. Pero estas actuaciones no están enmarcadas dentro de un planeamiento *ad hoc* de seguridad vial que abarque la totalidad de la red de carreteras de la Comunidad.

1.3.1.1- Actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación.

Se consideran *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación* las que son ejecutadas únicamente con el objetivo de hacer disminuir el número y/o gravedad de los accidentes de tráfico. En general, son actuaciones que suelen ser llevadas a cabo en los emplazamientos donde se produce un mayor número de accidentes, aunque también pueden ser realizadas en otros emplazamientos que no presenten unas estadísticas necesariamente tan desfavorables desde el punto de la accidentalidad.

El Plan de carreteras 1986-1993, en su epígrafe 7.3.2. apartado B dice lo siguiente (Comunidad de Madrid, 1994a):

"...dentro del estudio de accidentes, los llamados puntos negros incorporan un elemento importante, pero no definitivo en la evaluación de los mismos, ya que la determinación del punto de accidente en muchos casos es inexacta, motivada en gran parte por la imprecisión o falta de balizamiento e incluso de definición de nuestras carreteras."

Como puede observarse, el mismo Plan de carreteras 1986-1993 reconoce que la identificación de *puntos negros* es uno de los problemas fundamentales que se presentan a la hora de poder actuar sobre los mismos; es decir, resulta difícil poder localizarlos con la debida exactitud debido a la falta de precisión en el kilometraje y los propios orígenes de las carreteras.

El Plan considera, por otra parte, que este análisis de *puntos negros* debe tener en cuenta no solamente el punto de manera aislada sino que señala también la siguiente consideración:

"...la profusión de accidentes en un tramo o en una carretera hacen pensar que aún no habiéndose localizado los accidentes en un punto concreto, el tramo o carretera considerado presenta en principio problemas de seguridad para la conducción."

Así se constata que en el Plan de Carreteras 1986-1993 se enfoca el problema de la falta de seguridad mediante la identificación y supresión de los *puntos negros*; pero también da a entender que se puede lograr una reducción de la accidentalidad en los tramos de carreteras con alta peligrosidad relativa. Es decir, realizando las *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación* que se consideren convenientes en aquellos tramos de carretera que presenten un *índice peligrosidad* elevado.

Por otro lado, la identificación de un emplazamiento como un *punto negro* se efectúa cuando en dicho emplazamiento se han producido al menos tres accidentes con víctimas en un período de tiempo de un año (Comunidad de Madrid, 1992, 1993a y 1994b), lo cual tal y como se verá en el capítulo 3 presenta numerosos inconvenientes a la hora de tratar de identificar de una manera adecuada los "*verdaderos puntos negros*". También se considera como *tramo negro* a un tramo de un kilómetro en el que se han producido tres o más accidentes en un año.

Según la memoria del Plan 1986-1993, de un total de 98 *puntos negros* en el período 1980-1984, solamente se repiten - al menos durante dos años - un total de 15 *puntos negros*, lo cual parece una cifra bastante pequeña a la hora de realizar actuaciones con el objetivo de mejorar la seguridad en la circulación en una red de carreteras como la de la Comunidad de Madrid.

En la misma línea seguida en los párrafos anteriores, la Memoria Resumen del Plan General de Carreteras 1993-2001 expresa lo siguiente:

"...por otro lado se continúa la tendencia de actuación de los últimos años actuando en la totalidad de los puntos negros y tramos peligrosos detectados en los informes anuales elaborados por la Dirección General de Carreteras sobre la accidentalidad de las Carreteras regionales a partir de los datos facilitados por los policías de tráfico."

Según los informes anuales elaborados por la Dirección de Carreteras de la Consejería de Transportes de la CAM (Comunidad de Madrid, 1992, 1993a y 1994b), los *puntos y tramos negros* en el período de tiempo comprendido entre los años 1989 y 1993 son los expuestos en la tabla 1.1. En ella se puede observar que el número de *puntos negros* sigue siendo reducido; sin embargo, el número de *tramos negros* es bastante considerable, lo cual

sugiere la conveniencia de actuar intensamente sobre estos últimos, con independencia de que se haga sobre los *puntos negros*.

	1989	1990	1991	1992	1993
<i>PUNTOS NEGROS</i>	31	39	20	16	23
<i>TRAMOS NEGROS</i>	182	117	124	97	110

Tabla 1.1. N° de puntos y tramos negros en las carreteras de la CAM (1989-1993)

Hay que tener en cuenta que en este período (1989-1993) solamente se repiten 13 *puntos negros* al menos durante dos años, lo cual da una idea de la aleatoriedad que se produce en la ocurrencia de los accidentes; esta cifra está además en concordancia con la anterior de 15 *puntos negros* presentada en el Plan 1986-1993.

Como se verá en el capítulo 3, debido a la definición errónea de *punto negro*, éstos están concentrados principalmente en las carreteras con mayor tráfico. Los *puntos negros* están distribuidos en todos los tipos de emplazamientos de la red de carreteras de Madrid: carreteras urbanas, rurales, con dos calzadas, con una calzada, en intersecciones, en curvas, etc. Por lo tanto, las actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación que se han ejecutado en los mismos son también muy variadas y dependen del tipo de emplazamiento donde se realicen. De las actuaciones que fueron propuestas por la Dirección General de Carreteras de la CAM cabe destacar las siguientes clases (Comunidad de Madrid, 1985):

- Actuaciones específicas de mejora de la señalización horizontal
- Actuaciones específicas de mejora de la señalización vertical
- Extensión de capas antideslizantes
- Conversión de intersecciones en rotondas
- Mejora del trazado de curvas

Como se ve estas actuaciones son muy dispares y dependen fundamentalmente, como se ha dicho con anterioridad, del tipo de emplazamiento que se pretende mejorar. Cabe comentar que después de ser identificados los *puntos negros*, las actuaciones son propuestas por el personal encargado de la seguridad vial al *servicio de conservación y mantenimiento*. La elección de dicha actuación no se realiza, debido a la falta de instrumentos adecuados para ello, con un criterio de maximización de la efectividad, con lo cual no existe la certeza de que las actuaciones que se ejecuten sean precisamente las más efectivas.

1.3.1.2.- Actuaciones preventivas.

En el apartado anterior se analizaron las actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación que realiza la Dirección General de Carreteras de la CAM en los *emplazamientos peligrosos* o *puntos negros*. Sin embargo, hay que tener en cuenta que existen otro tipo de actuaciones que, sin ser específicamente de mejora de la seguridad, pueden contribuir a disminuir la peligrosidad de la red. En este sentido, el apartado 7.3.2. C del Plan de Carreteras 1986-1993 denominado "*Diagnósticos y Conclusiones*" menciona lo siguiente (Comunidad de Madrid, 1985):

"...la red de carreteras de la Comunidad de Madrid, en un porcentaje considerable, está formada por vías que han ido sufriendo desde sus orígenes transformaciones que no han mejorado substancialmente la propia función o clasificación dentro del uso a que se

destinan. Normalmente, las modificaciones no han tocado aspectos esenciales como: aumento de su capacidad, adecuación de sus características geométricas, remodelación del diseño de las intersecciones y enlaces, siendo estas modificaciones necesarias, demandadas por la nueva funcionalidad de la vía. El alto crecimiento del parque de vehículos y el gran avance de la tecnología del automóvil exigen mejores características en las carreteras."

Asimismo y como conclusión al estudio de accidentes, el Plan 1986-1993 propone disminuir el *índice de peligrosidad* a través de la ejecución del siguiente tipo de actuaciones:

- *"Adecuar las características y capacidad no sólo de las carreteras, sino también de las intersecciones al papel asignado a cada vía dentro del conjunto de la red."*
- *"Adecuar la señalización existente, tratando de ofrecer una información objetiva, homogénea y coherente."*
- *"Tratamiento adecuado del entorno de la carretera, que en muchos casos incide directa o indirectamente en el accidente. La falta de visibilidad generada por barreras naturales o artificiales, así como elementos extraños al borde de la carretera pueden provocar distracciones en el conductor."*
- *"Evitar los accesos incontrolados, al menos en las carreteras de la red principal, ya que éstos producen incorporaciones peligrosas por la espontaneidad de las mismas, al margen de que no guardan los requisitos técnicos imprescindibles que garanticen los movimientos con un margen de seguridad suficiente."*

En la misma línea, el Plan 1993-2001 incide en que:

"...la actuación en carreteras puede favorecer una mejora de la seguridad vial, tanto por el efecto director que puede producir en el número y gravedad de los accidentes como por las modificaciones que puede generar en el comportamiento de los usuarios."

El Plan 1993-2001 sigue precisando además que:

"...estas líneas de actuación incorporan las sugerencias y propuestas del Dictamen del Senado sobre Seguridad Vial relacionadas con actuaciones en la vía, de las cuales cabe destacar las siguientes:

- Aumentar los recursos destinados a conservación y mantenimiento de la red en orden a la seguridad de la misma, de modo que se guarde la adecuada proporción con el ritmo de inversión en nuevas carreteras.
- Actuación prioritaria sobre puntos negros y tramos peligrosos, mejorando la señalización vertical y horizontal del conjunto de la red.
- Acondicionamiento y mejora de la red secundaria."

Como puede observarse, en ambos *Planes* existe una preocupación por la mejora e homogeneización de las características de las carreteras, algo que se considera como un elemento fundamental a la hora de incrementar positivamente la mejora de la seguridad en la circulación. En este sentido, el Plan 1993-2001, siguiendo las directrices dictadas por el Senado sobre seguridad vial, denomina como *acondicionamiento y mejora de la red secundaria* al tipo de actuaciones que pueden lograr este objetivo con independencia de las actuaciones que se ejecuten específicamente sobre los *puntos negros*. Este tipo de actuación de *acondicionamiento y mejora* suele tener también otros objetivos diferentes al de mejora de la seguridad. Pero el Plan le reconoce también que estas actuaciones poseen en si mismas un componente específico de *mejora de la seguridad*.

Por último, siguiendo las mismas directrices del Senado, se tiene en cuenta la importancia de llevar a cabo un buen mantenimiento y conservación de la red.

En realidad estas actuaciones se pueden considerar en cierta forma como *preventivas* (Antona, 1993), es decir, aquéllas que mejoran las condiciones de seguridad en la

circulación en los emplazamientos, sin esperar a que la acumulación de accidentes obligue a actuar sobre las características de los mismos.

Balaguer et al (1989) dicen que estas actuaciones preventivas intentan disminuir la probabilidad de que se produzcan accidentes y distinguen en ellas, entre otros, los siguientes tipos:

- *La adopción de normas de proyecto y ordenación de territorio que disminuyan los puntos potenciales de conflicto*
- *Actuaciones sobre el trazado, buscando la coherencia entre los elementos que lo integran*
- *Actuaciones sobre el pavimento*
- *Actuaciones sobre la señalización y el balizamiento*

En la CAM, desde un punto de vista operativo, dentro de este tipo de actuaciones de *acondicionamiento y mejora de la red secundaria* están contempladas las siguientes:

- Acondicionamiento de carreteras
- Ensanche de plataforma y calzada
- Refuerzos de firme

Los *acondicionamientos de carreteras* son aquellas actuaciones que, planteadas sobre una infraestructura existente, la mejoran notablemente, pues implican acciones que modifican ligeramente el trazado: acondicionamientos de curvas y rasantes, o ampliaciones de calzadas. Estas acciones se acompañan de una mejora sensible tanto del firme como de la señalización y el balizamiento.

Los *ensanches de plataforma y calzada* son aquellas actuaciones de menor entidad que cabría calificar como de conservación extraordinaria. Implican la ampliación de la calzada, con la consiguiente mejora del firme, señalización y balizamiento. En ellas, las posibles mejoras de trazado son mínimas, inexistentes o irrelevantes en el marco general de la actuación, ya que suponen exclusivamente el acondicionamiento puntual de alguna curva.

Los *refuerzos de firme* son aquellas actuaciones que implican exclusivamente la mejora del firme, las cuales van acompañadas también de una mejora en la señalización horizontal y el balizamiento de la calzada.

CAPÍTULO 2

LA INFORMACIÓN SOBRE LA ACCIDENTALIDAD Y SU TRATAMIENTO.

2.1.- INTRODUCCIÓN.

Los ingenieros de tráfico utilizan los datos de los partes de accidentes para un gran número de propósitos; como, por ejemplo, la identificación y el análisis de emplazamientos con una alta frecuencia de accidentes, el estudio de las causas reales que los motivan, la evaluación de la efectividad de las actuaciones en carreteras, etc.

En este capítulo se va a analizar cuál es la información recopilada en dichos partes y el proceso de la toma de datos relacionados con el accidente de tráfico.

También se verán aquí cuáles son las principales modalidades de análisis de mejora de la seguridad en la circulación que pueden ser realizados tomando como base, por un lado, la información recopilada mediante los partes de accidentes y, por el otro, los datos relativos a la infraestructura viaria y al tráfico.

Por último, se hará una breve descripción de como la utilización de herramientas informáticas puede ayudar a los ingenieros de tráfico a realizar estos análisis de mejora de la seguridad vial.

2.2.- PARTES DE ACCIDENTES.

En los países pertenecientes a la *CEMT* (Conferencia Europea de Ministros de Transportes), la responsabilidad de recolectar la información oficial sobre la accidentalidad

de tráfico corresponde a los agentes de la policía de circulación encargados de realizar este cometido en el mismo lugar donde se producen los hechos. En Europa, el ministerio que se ocupa de los planes de vigilancia y seguridad vial varía según el país, siendo mayoritaria la adscripción de tales cometidos a los ministerios de transportes. En España, la información es recogida, elaborada y centralizada por la Dirección General de Tráfico, que depende del Ministerio del Interior, la cual se encarga de la confección de los planes de seguridad vial a nivel estatal (fig. 2.1). Aunque las administraciones autonómicas y locales también poseen competencias en este ámbito dentro de sus respectivas demarcaciones jurisdiccionales.

En nuestro país, la estadística de accidentes de circulación está regulada por la Orden de la Presidencia del Gobierno de 18 de Febrero de 1993 (Boletín Oficial del Estado, 1993). La base del sistema de información son los *cuestionarios estadísticos o partes de accidentes de tráfico*, cumplimentados generalmente por la Agrupación de Tráfico de la Guardia Civil - o, en su caso, los cuerpos similares de las comunidades autónomas que tienen transferidas las competencias - cuando los accidentes se producen en carreteras de su demarcación, o en vías urbanas de los municipios que no tienen regulado el tráfico. Por otra parte, en aquellos municipios en que éste regulado el tráfico la cumplimentación del cuestionario estadístico se realiza por la policía municipal siempre y cuando exista policía especializada (DGT, 1993).

En el cuestionario estadístico solamente deben registrarse los accidentes de circulación que reúnen las circunstancias siguientes (Boletín Oficial del Estado, 1993):

1. *Producirse, o tener su origen, en una de las vías o terrenos objeto de la legislación de tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial.*
2. *Resultar a consecuencias de los mismos una o varias personas muertas o heridas, o que sólo se produzcan daños materiales.*

3. Estar implicado al menos un vehículo en movimiento.

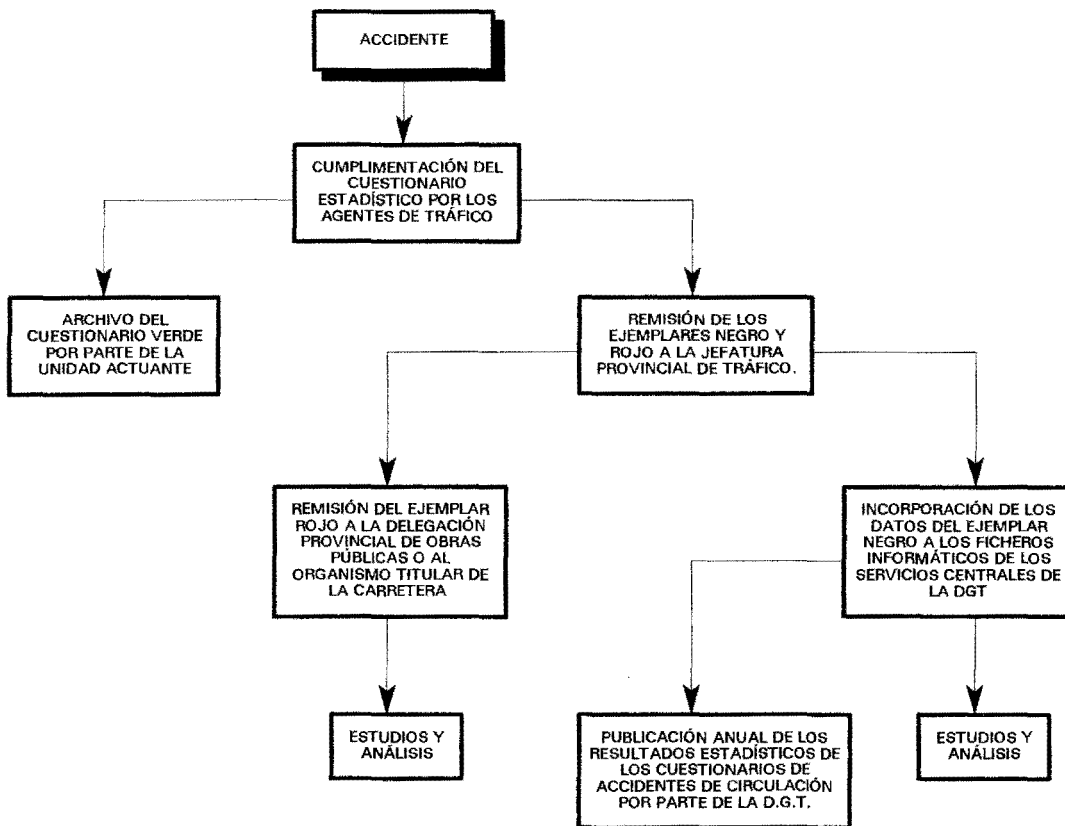


Figura 2.1. Proceso de toma de datos de accidentes de tráfico (DGT, 1993).

Los datos recogidos en los cuestionarios estadísticos de accidentes de circulación con víctimas, rellenados por la Guardia Civil, incluyen la siguiente información (DGT, 1993):

- Datos cronológicos
- Emplazamiento del accidente
- Características de la vía
- Datos climatológicos
- Iluminación y visibilidad

- Datos del tipo de accidente
- Datos del vehículo
- Posibles factores concurrentes
- Croquis y descripción del accidente
- Datos personales
- Datos sobre el número de víctimas
- Datos sobre la lesividad y otros datos de interés

Los informes elaborados después de haberse producido un accidente de tráfico suelen adolecer de una falta de uniformidad en los datos recabados, debido a la intervención de observadores que suelen emplear criterios subjetivos y, con frecuencia, muy dispares. La valoración inmediata del gran número de factores implicados en el accidente de tráfico, requiere bastante claridad de juicio y una cierta experiencia, cosa que no siempre ocurre en circunstancias tan tensas.

Por otra lado, diversas investigaciones realizadas en diferentes países ponen de manifiesto que una parte de los accidentes producidos en la red viaria no son oficialmente registrados. Esto conlleva una importante pérdida de información que sería muy útil para el análisis de los problemas de seguridad vial. Hauer y Hakkert (1988) indican que, en promedio, aproximadamente el 20 % de los accidentes que requieren hospitalización y un 50 % de los que no la requieren no son registrados por la policía. Además de esta fuente de sesgo, James (1991) en una investigación que trata precisamente sobre la falta de datos de accidentes en Gran Bretaña, observó que hay también una serie de factores interrelacionados que afectan a la probabilidad de registro de los mismos, entre ellos, la edad de la víctima, el tipo de vehículo accidentado, el número de vehículos implicados, la gravedad de las lesiones, etc. A su vez, Ibrahim y Silcock (1992), estudiando el problema de

la inexactitud de los datos de los accidentes registrados, encontraron que las más frecuentes eran las siguientes:

- Localización exacta del lugar del accidente
- Descripción escrita del accidente
- Datos del vehículo
- Datos de la víctima
- Clasificación de la carretera
- Causas concurrentes.

A pesar de las limitaciones observadas en la información que proporcionan los cuestionarios estadísticos, éstos siguen siendo la principal y más utilizada fuente de datos de accidentes de tráfico para realizar estudios y análisis de seguridad vial. Por lo tanto, constituyen el punto de partida obligado de la mayoría de los trabajos e investigaciones sobre el tema.

Una solución al problema del sesgo inducido por la falta de datos sería considerar la obligatoriedad del registro de todos los tipos de accidentes, independientemente de la gravedad de los mismos, de los daños materiales o de las lesiones producidas. Con respecto a la inexactitud de la información obtenida, el problema resulta mucho más difícil de solucionar. Habría que empezar por realizar una revisión del parte de accidentes de tráfico para intentar que refleje una mayor precisión y objetividad en los datos registrados. Mientras tanto, la utilización de herramientas informáticas con un alto grado de sofisticación pueden ayudar a disminuir o detectar las inexactitudes producidas en los registros oficiales.

2.3.- ANÁLISIS PARA LA MEJORA DE LA SEGURIDAD EN LA CIRCULACIÓN.

En el apartado precedente se realizó una breve descripción de los datos que son registrados por los agentes de tráfico a través de los partes de accidentes. También se dijo que estos datos, a pesar de sus limitaciones, pueden ser utilizados para estudiar dichos accidentes e intentar mejorar las condiciones de seguridad en la circulación a partir de estos análisis. Este propósito de mejora de la seguridad, se puede llevar a cabo de diferentes modos, dependiendo del tipo de análisis que se realice. En este sentido, básicamente los tipos de análisis de la seguridad en la circulación se puede clasificar siguiendo los criterios de Mak, Chira-Chavala y Hilger (1988) en tres grandes grupos:

- *Identificación del problema*
- *Evaluación de corte transversal*
- *Evaluación longitudinal*

El análisis de *identificación del problema* se refiere a la determinación de dónde y porqué se producen los accidentes. A su vez, la *evaluación de corte transversal* remite al estudio del efecto o relación entre los accidentes y diversos factores analizados durante un período de tiempo determinado. Por último, la *evaluación longitudinal* se ocupa de la investigación del efecto producido por una actuación sobre los accidentes durante períodos de tiempo diferentes.

Por otra parte, la unidad de análisis de la seguridad en la circulación es el *emplazamiento* y éste es definido del siguiente modo (Mak, Chira-Chavala y Hilger, 1988):

"...una sección, un punto o una característica física de la carretera."

Por otro lado, los datos utilizables en los tres tipos de análisis pueden ser los siguientes:

- El *número de accidentes registrados*
- El *índice de accidentes o de peligrosidad*
- La *gravedad*

El *número de accidentes registrados* se refiere a la cantidad de accidentes acaecidos durante un determinado período de tiempo. El *índice de accidentes o de peligrosidad* es definido de dos modos diferentes dependiendo del tipo de emplazamiento. Cuando éste es una sección o tramo de carretera se define de la forma siguiente (Balaguer et al, 1989):

"El número registrado de accidentes con víctimas dividido entre los vehículos-kilómetros recorridos."

En el caso de que el emplazamiento sea puntual como; por ejemplo, una intersección entonces la definición es la siguiente (Balaguer et al, 1989):

"El número registrado de accidentes con víctimas dividido entre los vehículos entrados en la intersección"

La *gravedad* se refiere a la magnitud del accidente con relación a las pérdidas en vidas humanas, lesiones y daños materiales causados por el mismo.

Retomando la clasificación general de los tipos de análisis, se puede decir que el análisis de *identificación del problema* se realiza de las dos formas siguientes: en primer

lugar mediante la *identificación de puntos negros o emplazamientos peligrosos*, y en segundo, a través de la *identificación de los factores contribuyentes* de los accidentes en dichos emplazamientos (Wattleworth et al, 1988).

Por otra parte, en la *evaluación de corte transversal* el propósito del análisis puede ser de dos tipos: por un lado la *evaluación comparativa* mediante la cual se contrastan la mejora de la seguridad o el efecto que producen sobre los accidentes dos o más situaciones diferentes; y, por otro, el empleo de *modelos multivariantes* para determinar o predecir el efecto de ciertos parámetros sobre el número, el índice o la gravedad de los accidentes.

Con respecto a esto último, se puede añadir que el objetivo de este trabajo de investigación, no es la elaboración de *modelos multivariantes*. La tesis doctoral de Serrano (1978) desarrolla diferentes *modelos multivariantes* para las carreteras de la Comunidad de Madrid, y es un buena muestra de la aplicación de este tipo de procedimientos.

Por otra parte, en lo relativo a la *evaluación longitudinal*, en los siguientes capítulos se estudiará y desarrollará dicho análisis cuando el objetivo específico es evaluar las *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación*, empleando las diversas modalidades de estudios *antes y después*. Así mismo, merece la pena resaltar que, como el título de esta tesis precisa, ésta es la clase de análisis que se empleará para la realización de la misma.

En el capítulo 4, al estudiar los diferentes procedimientos para realizar *evaluaciones longitudinales*, se verá como la forma habitual de *identificación de puntos negros y factores contribuyentes* está estrechamente vinculada a esta modalidad de análisis. Esta vinculación queda patente en el modelo evaluatorio de la figura 2.2. Con el objeto de

optimizar los recursos económicos disponibles hacia la ejecución de aquellas actuaciones que resulten más efectivas desde el punto de vista de la reducción de la accidentalidad, después de identificar los emplazamientos peligrosos, en dicho modelo se contempla la necesidad de evaluar las actuaciones propuestas para seleccionar las más convenientes.

En este modelo, la mejora de la seguridad en la circulación se puede alcanzar, por un lado, mediante actuaciones *preventivas* y, por otro, a través de *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación* (Pardillo, 1995a y 1995b). Como ya se sabe, estas últimas actuaciones son las que se llevan a cabo preferentemente en los *emplazamientos peligrosos* con el fin de solucionar los problemas de seguridad que se presentan en los mismos. Por lo que, antes del estudio de las actuaciones de mejora de la seguridad alternativas que solucionen el problema de accidentalidad en dichos *emplazamientos peligrosos*, es necesario proceder a la identificación y análisis de los factores que producen los accidentes.

Por otra parte, la ejecución de la otra modalidad de actuación presentada en la figura 2.2 y considerada como *preventiva*, no necesita una identificación previa de los emplazamientos considerados como peligrosos, sino que estas actuaciones son llevadas a cabo independientemente del historial de accidentes registrados.

No obstante, en el modelo del proceso evaluatorio de las actuaciones que se presenta en la figura 2.2, puede observarse que, tanto para las *actuaciones preventivas* como para las *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación*, el conocimiento de la efectividad de las actuaciones posibles constituye un paso previo a la selección, programación y ejecución de aquéllas que resultan más adecuadas desde el punto de vista de la disminución de los accidentes (Khisty, 1990; Pardillo, 1995a y 1995b).

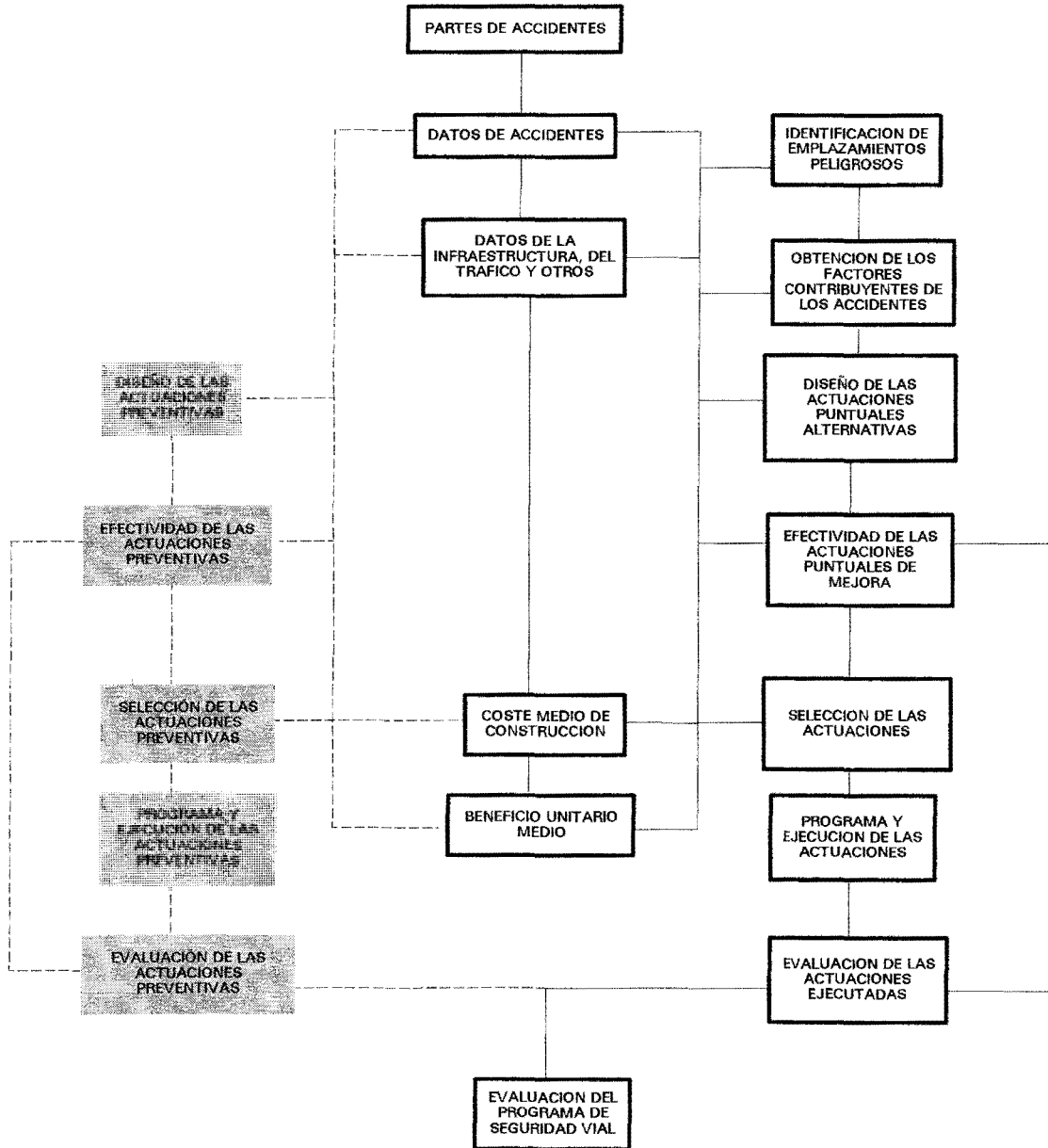


Figura 2.2. Proceso evaluatorio de las actuaciones de mejora de la seguridad vial.

2.4.- BASES DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD EN LA CIRCULACIÓN.

En el apartado 2.2 se explicó cómo las circunstancias derivadas de un accidente son registradas por los agentes de tráfico mediante los cuestionarios estadísticos de accidentes. También se vio que esta información era almacenada en los archivos informáticos de la central Dirección General de Tráfico para su posterior tratamiento y publicación.

Por otro lado, en el apartado 2.3 se especificaron los diferentes tipos de análisis que se pueden realizar a partir de los datos disponibles sobre los accidentes. Todo ello permite de manifiesto la necesidad de disponer de un soporte informático exhaustivo y riguroso para poder llevar a cabo éstos u otros análisis.

Para ejecutar este tipo de investigaciones, las bases de datos deben estar diseñadas de tal forma que integren o al menos sean compatibles con otras de instituciones públicas y privadas que contengan información del siguiente tipo (Harkey y Ruiz, 1989):

- Intensidad de tráfico
- Clasificación y localización de la carretera
- Tipo de regulación del tráfico
- Peculiaridades del área circundante al emplazamiento
- Características geométricas
- Características físicas
- Datos sobre las Actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación
- Otra información de interés

Este tipo de información es de suma importancia a la hora de intentar identificar la correlación existente entre las causas de los accidentes y el diseño de la carretera o su funcionamiento. La utilidad que ofrece la integración de estos recursos documentales es la gran comodidad con que se realiza la búsqueda de las informaciones necesarias para los análisis de seguridad vial que se han descrito en este capítulo. Ello elimina la laboriosa tarea de extraer la información pertinente que está disponible en archivos dispersos. Además, la integración y automatización de los diferentes bancos de datos contribuiría a la homogeneización de los criterios y definiciones relativas a datos comparables, mejorando la consistencia del conjunto (Turner y Colson, 1988).

El empleo de ordenadores y su integración en red permite a los ingenieros y analistas una mayor flexibilidad en el acceso y la manipulación de la información existente y, por consiguiente, un incremento en la calidad de los análisis. Las bases de datos del inventario físico de la infraestructura viaria y de los accidentes originados en ésta pueden agregarse permitiendo, entre otras, las tabulaciones y gráficas siguientes (Ross et al, 1991):

- Número periódico de accidentes registrados en un emplazamiento
- Puntos negros
- Datos para la preparación de diagramas de colisión
- Resúmenes especiales

Por otra parte, los bancos de datos deben tener codificados los emplazamientos mediante las segmentaciones del tipo: distritos, tramos, intersecciones, calles, etc (Harkey y Ruiz, 1989). En este sentido, recientemente se está aprovechando la tecnología de los *Sistemas de información geográfica* para hacer referibles los accidentes y gestionar las bases de datos (Goh, 1993), lo cual permite localizar los accidentes con una mayor exactitud y sobreponer información de mapas topográficos o de uso del suelo.

A partir de la información contenida en las bases de datos se puede obtener de forma automática *diagramas de colisión*, con una consiguiente ganancia de tiempo y exactitud en el análisis de los factores que ocasionan los accidentes (Litvin y Datta, 1979; Harkey y Ruiz, 1989). Del mismo modo, se han desarrollado programas que permiten identificar *emplazamientos peligrosos*, investigar la experiencia de accidentes y evaluar las actuaciones propuestas en cada caso (Mak et al, 1986).

Existen algoritmos que proporcionan el instrumento necesario para esclarecer los factores o combinación de factores que causan una sobreproducción de accidentes en comparación con el término medio (Chira-Chavala et al, 1986). En este sentido, Sayed et al (1995), han ido más lejos al desarrollar un procedimiento computadorizado que identifica *emplazamientos peligrosos* en base a los *factores que contribuyen* a la ocurrencia de los accidentes, distinguiendo los relacionados con la carretera y el medio ambiente de los demás. Por último, cabe mencionar todavía que también se han planteando análisis de *emplazamientos peligrosos* recurriendo el uso de tecnologías basadas en Sistemas Expertos (Spring et al, 1987; Theobald y Heydecker, 1988).

Como una consecuencia de lo descrito en los párrafos precedentes, se puede finalizar diciendo que la utilización de estas herramientas en España ayudaría a superar las limitaciones de los sistemas informáticos de información sobre accidentes que están siendo empleados en este país, cuyos informes no están lo suficientemente pormenorizados como para permitir un desarrollo eficiente de la investigación y el análisis de la accidentalidad.

CAPÍTULO 3

LA IDENTIFICACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS PELIGROSOS.

3.1.- INTRODUCCIÓN.

Al analizar los accidentes acaecidos en una red de carreteras se descubre que éstos no están uniformemente distribuidos, sino que tienden a agruparse en ciertas zonas conocidas comúnmente con el nombre de *puntos negros o emplazamientos peligrosos*. Los ingenieros de tráfico han constatado que una de las formas más fructíferas de mejorar la seguridad en la circulación es actuar sobre estos *emplazamientos peligrosos* con el fin de eliminar la ocurrencia de accidentes en los mismos.

En este capítulo se van a exponer las diferentes herramientas y métodos que permiten la mejora de la seguridad en la circulación mediante la identificación de los *emplazamientos peligrosos*.

Como se expuso en el capítulo 2, un primer paso consiste en la obtención de los datos de accidentes de circulación a partir de los cuestionarios estadísticos cumplimentados por la Agrupación de Tráfico de la Guardia Civil. Con estos datos de accidentes y los de la propia infraestructura se procede a identificar aquellos emplazamientos con una mayor incidencia y gravedad de accidentes. Una vez que se tienen identificados estos emplazamientos hay que proceder a realizar un diagnóstico de los mismos con el objetivo de establecer las causas que motivan los accidentes, para poder diseñar luego las diferentes actuaciones en materia de seguridad orientadas a solucionar el problema que, en cada caso, se presente (ver la figura 2.2).

La identificación de *emplazamientos peligrosos* descansa esencialmente en la obtención del *número de accidentes registrados* en los mismos; aunque, como se verá más adelante, en la localización de tales emplazamientos suelen intervenir también otras variables que permiten una mayor exactitud en el análisis.

3.2.- EL CONCEPTO DE PUNTO NEGRO.

El primer paso que se debe dar antes de explicar los procedimientos utilizados para la identificación de los *puntos negros*, es definir este concepto. En la actualidad se manejan diferentes definiciones, dependiendo del país y administración encargada de explotar sus carreteras. La definición usualmente adoptada es la de *aquel emplazamiento perteneciente a una red de carreteras en donde, durante un período determinado de tiempo, ha ocurrido más de un cierto número de accidentes.*

Este concepto usual se corresponde con la definición empleada en Noruega (Elvik, 1988):

"... cualquier sección de carretera de longitud no mayor de 100 m donde, durante un período de cuatro años, han sido registrados por la policía al menos cuatro accidentes con heridos."

En España, el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente define un *punto negro o tramo de concentración de accidentes* de la siguiente manera (Dirección General de Carreteras, 1994):

"... aquellos tramos o intersecciones de 1 Km en los que habiéndose producido 10 o más accidentes con víctimas en los últimos 5 años, el índice de peligrosidad medio en ése

período o la frecuencia de accidentes en los últimos dos años haya sido superior al doble de la media en todos los tramos de categoría e IMD equivalentes."

La Consejería de Transportes de la Comunidad de Madrid diferencia los *puntos negros* de los *tramos negros*. Considera como un *punto negro* (Comunidad de Madrid, 1992, 1993a, 1994b):

"... un punto kilométrico en que se han producido tres o más accidentes con víctimas en el año de estudio."

mientras que un *tramo negro* es definido como:

"... aquellos tramos de un kilómetro en los que se han producido tres o más accidentes con víctimas en el año de estudio."

La definición española del Ministerio de Obras Públicas supone un avance sobre la definición usual de *punto negro*, ya que incorpora en su enunciado la noción de *índice de peligrosidad*. Esto se debe a que la definición de *punto negro* o *tramo de concentración de accidentes* no depende solamente de un número mínimo de accidentes, sino que tiene también en cuenta la *exposición al riesgo* a través de la estimación del índice de peligrosidad. Esto es así, porque es habitual que emplazamientos con una gran volumen de tráfico tengan un número mayor de accidentes con víctimas que otros emplazamientos con un volumen de tráfico menor.

En las definición noruega citada más arriba se cubre cualquier concentración de accidentes dentro de un espacio o en un punto kilométrico determinado, sin tener en cuenta el tipo de emplazamiento en que se produce este agrupamiento. Sin embargo, la definición

española especifica el tipo de emplazamiento y además establece que la comparación debe realizarse con emplazamientos de las mismas características.

Otras definiciones basan el concepto de *punto negro* en un número de accidentes registrados anormalmente alto. En ellas no se tiene en cuenta que una de las causas que origina un registro de accidentes superior al esperado, es la variación aleatoria característica de la ocurrencia de accidentes. Así, Ahlquist (1973) propone la siguiente definición:

"... una sección de carretera donde la diferencia entre el número de accidentes registrados y esperados excede algún valor crítico."

Por otra parte, Hauer y Persaud (1984) dicen que la práctica común es:

"... que un emplazamiento sea considerado como un punto negro si su registro de accidentes se desvía k varianzas de lo normal. El valor de k está unido al nivel de significación estadístico y es fundamentalmente una cuestión de criterio propio."

Por otro lado, Hakkert y Mahalel (1978) propusieron que los *puntos negros* deberían definirse como:

"... aquellos emplazamientos en las cuales el número de accidentes observado N_i es significativamente mayor que el valor esperado m_i para algún nivel de significación prescrito."

Elvik (1988) define un *punto negro* de accidentes como:

"... un elemento de carretera donde debido a causas exclusivamente locales, el número esperado de accidentes es más alto que en otros elementos similares de carretera con los cuales es comparado."

En esta definición, la expresión *elemento de carretera* se entiende que engloba todas las clases de emplazamientos para las cuales el concepto de *punto negro* es comúnmente aplicable, como secciones de carretera, intersecciones, rampas, curvas, puentes, etc.

Por otro lado, el concepto *número esperado de accidentes* en un elemento de carretera se define como (Hauer y Hakkert, 1988):

"... el número real de accidentes a largo plazo siempre que fuera posible que todas las condiciones de exposición y factores de riesgo general permanecieran sin cambio indefinidamente."

La necesidad de estimar el *número esperado* se debe a que algunas de las causas que producen los accidentes son aleatorias y efímeras en su naturaleza (por ejemplo: una tormenta o una ráfaga de viento, que pueden producir accidentes durante unos pocos minutos).

El concepto de *punto negro* definido por Elvik está asociado con causas exclusivamente locales y permanentes en los elementos de carretera (por ejemplo: curvas peligrosas, pavimento resbaladizo, un puente estrecho, etc). Estos serían pues los factores causantes de los accidentes que más tarde podrían ser objeto de Actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación.

Este autor afirma, como ya se ha hecho alusión anteriormente, que las comparaciones deben realizarse entre elementos de carretera pertenecientes a la misma categoría. La razón de esto es lógica, ya que por ejemplo, si áreas rurales fueran comparadas con áreas urbanas, entonces la mayoría de las áreas urbanas resultarían ser *puntos negros*; puesto que la

densidad de accidentes es, en éstas, más elevada. Este resultado sería, por tanto, poco útil en la identificación de *puntos negros*. (Jorgensen, 1971).

En definitiva, a nuestro juicio, la definición más apropiada de *punto negro* es la propuesta por Elvik, porque ésta se basa en la comparación del número esperado de accidentes entre los emplazamientos de una misma categoría dentro de una determinada red de carreteras. Además, el *número esperado de accidentes* es un estimador más adecuado de las condiciones de seguridad que el *número de accidentes registrados* en un emplazamiento en particular. El gran problema radica en que esta definición es difícil de aplicar debido a que la estimación del *número esperado de accidentes* es, en la práctica, bastante complicada.

3.3.- IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS NEGROS.

Una vez aclarado el concepto de *punto negro*, en este apartado, se describirán los procedimientos habitualmente empleados para la identificación de *puntos negros*.

El proceso de identificación de los *puntos negros* pertenecientes a una red de carreteras se suele realizar en dos etapas. En la primera, se procede a hacer una revisión del historial de accidentes de los distintos emplazamientos de una red de carreteras, con el objeto de seleccionar aquéllos que resultan ser aparentemente peligrosos. Una vez que se han identificado estos emplazamientos hay que proceder a realizar un análisis detallado de las características de los mismos para poder confirmar su peligrosidad y, si procede, diseñar las oportunas medidas correctoras que minimicen la ocurrencia de accidentes (Hauer y Persaud, 1984).

Para esta primera etapa los principales métodos utilizados para la identificación de puntos negros son:

- *Método del número total de accidentes*
- *Método del índice de accidentes o de peligrosidad*
- *Método del número total-índice de accidentes*
- *Método del índice de control de calidad*
- *Método de la capacidad de reducción de accidentes*
- *Método del índice de gravedad de accidentes*

A continuación se describen estos métodos.

3.3.1.- Método del número total de accidentes.

En este método se asigna un *valor crítico*, correspondiente al número de accidentes acaecidos durante un cierto período de tiempo, a cada emplazamiento de una red de carreteras. Cuando el *número de accidentes registrados* en un emplazamiento puntual o el número de accidentes por unidad de longitud en una sección de carretera durante dicho período de tiempo supera o iguala el valor crítico asignado, se considera la ubicación como un *punto negro* o *emplazamiento peligroso* (fig. 3.1). Se considera el *valor crítico* como un número de accidentes *anormal*, no existiendo una regla general que indique cuál a de ser su cuantía. Este valor es, por lo tanto, un número arbitrariamente elegido.

A pesar de las limitaciones inherentes al uso del número total de accidentes en la identificación de *puntos negros*, este método es el más frecuentemente utilizado por la mayoría de las administraciones de carreteras como criterio básico de identificación. El

método del número total de accidentes también se suele denominar como *técnica de los puntos negros* (Tsohos y Kokkalis, 1988; Silcock y Smyth, 1984).

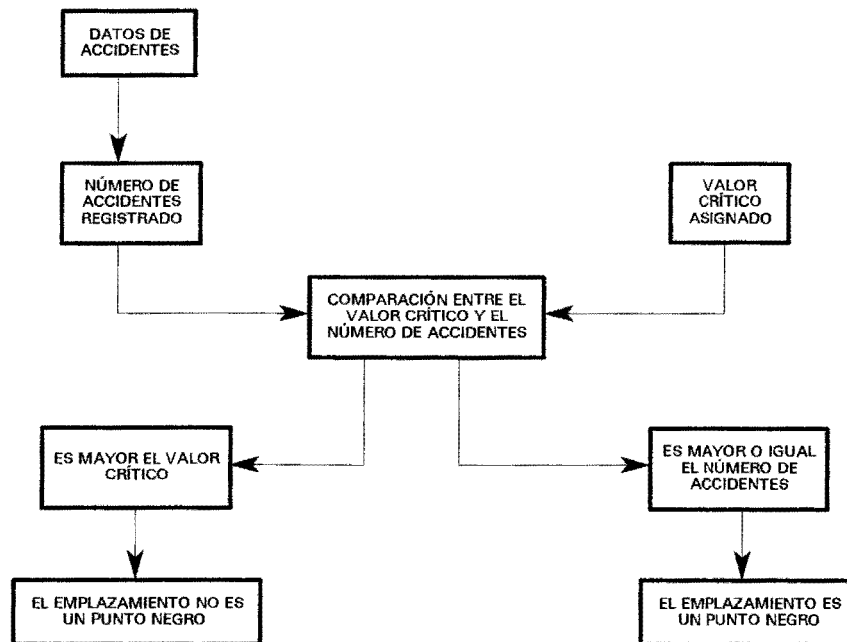


Figura 3.1. Método del número total de accidentes.

Hasta fechas recientes, el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente español consideraba, como *valor crítico*, un número de tres o más accidentes a lo largo de un año, en un punto kilométrico concreto o en un tramo de unos 300 metros de longitud. Por otra parte, la Comunidad de Madrid asigna un valor crítico similar en un punto kilométrico en concreto, manteniendo el mismo período de tiempo, pero cuando se aplica a tramos de carretera se toma como referencia la longitud de un kilómetro.

3.3.2.- Método del índice de accidentes o de peligrosidad.

Con este procedimiento de identificación de *puntos negros*, además del número total de accidentes, se considera también el concepto de *exposición al riesgo*, calculado en función de los millones de vehículos que pasan por un emplazamiento. La fórmula general para estimar el *índice de accidentes* - o de *peligrosidad* - es la siguiente:

$$I_i = \frac{N_i}{E_i} \quad (3.1)$$

donde:

- I_i = Índice de accidentes (o de peligrosidad) en el emplazamiento i . Si éste es puntual se expresa en accidentes/ 10^6 veh. y si es una sección en accidentes/ 10^6 veh-km.
- N_i = Número de accidentes registrados en el emplazamiento i durante el período de tiempo considerado.
- E_i = Millones de vehículos pasando por un emplazamiento puntual o millones de vehículos-kilómetro recorridos en una sección.

Al igual que en el método anterior aquí también hay que elegir un *valor crítico* que sirva para la identificación de los *emplazamientos peligrosos*. Cuando los *índices registrados* superan el *valor crítico*, se identifica el emplazamiento como un *punto negro*. Para establecer el *índice crítico* se comienza por la estimación del *índice promedio* de la totalidad de emplazamientos seleccionados pertenecientes a un mismo tipo y categoría (Peña, 1992a):

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{E_i} \quad (3.2)$$

donde:

\bar{I} = Índice de accidentes (o de peligrosidad) promedio de la totalidad de los emplazamientos seleccionados pertenecientes a una misma categoría.

n = Número de emplazamientos seleccionados pertenecientes a una misma categoría.

Se puede adoptar como criterio de elección del *valor crítico*, el *índice promedio* más un múltiplo de la desviación estándar de los *índices de peligrosidad* de los emplazamientos de las mismas características. La semejanza de los emplazamientos puede depender de diversas variables, como por ejemplo el número de calzadas, número de carriles, *IMD*, etc.

Para el cálculo del *índice crítico* se utilizará la siguiente ecuación (Hauer y Persaud, 1984; Hagle y Witkowski, 1988; Hagle y Hetch 1989; Datta et al, 1978):

$$IC = \bar{I} + z_c \cdot S \quad (3.3)$$

donde:

z_c = Constante asociada con el nivel de confianza δ (Tabla 3.1).

S = Desviación típica de los índices de los emplazamientos pertenecientes a la misma categoría.

La desviación típica se puede estimar a partir de la muestra de emplazamientos empleando la siguiente fórmula (Peña, 1992a):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_i}{E_i} - \bar{I} \right)^2} \quad (3.4)$$

El valor de z_c introducido en la ecuación 3.3, está basado en que los accidentes se distribuyen de acuerdo a una *distribución normal*. Ésta constante está relacionada con el *nivel de confianza* (δ), según el cual los *índices de accidentes* superiores al *índice crítico* son *significativos* desde un punto de vista estadístico y, por lo tanto, no son el resultado del azar. Dentro de las limitaciones impuestas por las características de los accidentes y los datos de tráfico, de aquellos emplazamientos en los cuales el *índice de peligrosidad* registrado supera al *índice crítico* estimado se dice que son *peligrosos* en un determinado porcentaje de *nivel de confianza*.

<i>Probabilidad</i>	δ	z_c
0,0050	0,9950	2,576
0,0075	0,9925	1,960
0,0500	0,9500	1,646
0,0750	0,9250	1,440
0,1000	0,9000	1,282

Tabla 3.1. Valores de z_c según el nivel de confianza (δ) (Peña, 1992a).

Las fases de este proceso de identificación están descritas en la figura 3.2.

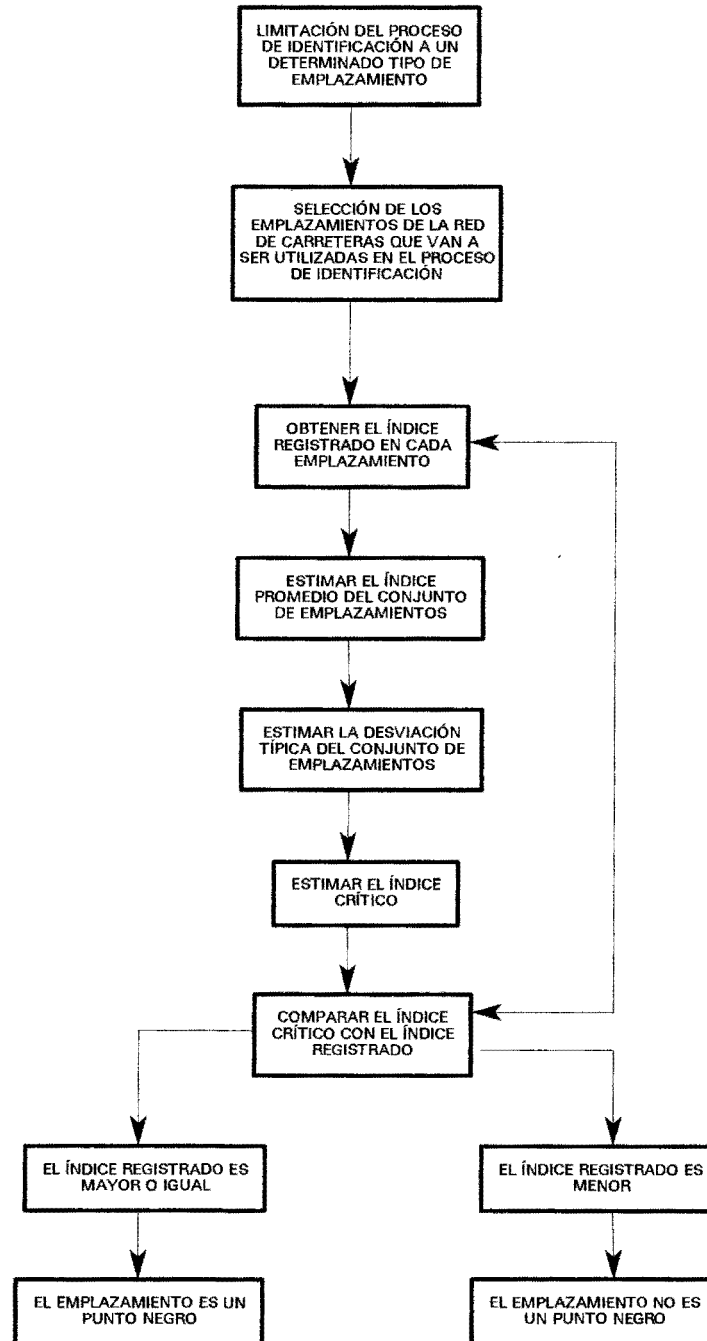


Figura 3.2. Identificación de *puntos negros* mediante el índice de accidentes.

3.3.3.- Método del número total-índice de accidentes.

Es una combinación de los métodos del *número total de accidentes* y del *índice de accidentes*. Aquí se consideran puntos negros los emplazamientos que arrojan un número y un índice de accidentes superior a determinados *valores críticos* preestablecidos. Los *valores críticos* de la red, tanto para emplazamientos puntuales como para secciones de carretera, se estiman como estipulan los dos métodos anteriores. Un procedimiento práctico consiste en utilizar una matriz de rango 10 x 10 en cuyo eje horizontal figura el *número de accidentes registrados* y, en el eje vertical, el *índice de accidentes*, distribuyéndose los emplazamientos en las correspondientes celdas de la matriz. En la esquina inferior derecha se ubican los emplazamientos más peligrosos (fig. 3.3), (Barbaresso et al, 1982).

<i>Índice de peligrosidad</i> (Acc/veh-millas x 10 ⁶)	<i>Número de accidentes registrados</i> (Accidentes por año)									
	0 - 3	4 - 7	8 - 11	12 - 15	16 - 19	20 - 23	24 - 27	28 - 31	32 - 35	36 - 150
0.00 - 0.59	149	64	6	5	0	0	0	0	0	0
0.60 - 1.59	43	68	59	28	9	5	6	1	1	3
1.20 - 1.79	10	32	36	30	20	15	6	6	5	6
1.80 - 2.39	9	12	22	18	20	16	11	4	7	13
2.40 - 2.99	1	10	15	8	9	8	11	2	8	20
3.00 - 3.59	0	7	1	6	6	2	7	3	3	17
3.60 - 4.19	1	3	4	6	2	3	0	2	4	10
4.20 - 4.79	0	2	1	1	2	2	0	2	1	5
4.80 - 5.39	0	1	1	2	4	0	1	1	0	1
5.40 - 24.00	5	9	4	3	2	2	1	2	3	7

Prioridad 2

Prioridad 1

Figura 3.3. Matriz de identificación de *puntos negros* (Barbaresso et al, 1982).

3.3.4.- Método del índice de control de calidad.

Este procedimiento consiste en la aplicación de un test estadístico basado en la hipótesis de que la ocurrencia de accidentes se ajusta a una *distribución de Poisson*. Se comparan los *índices de accidentes registrados* en los emplazamientos pertenecientes a una red de carreteras con el *índice de accidentes crítico* de los emplazamientos de la misma categoría dentro de la red de carreteras, definiendo como *puntos negros* aquéllos cuyo *índice registrado supera significativamente el valor estadísticamente esperado* (Tharkkar, 1986; Agent y Deen, 1975).

El valor *estadísticamente esperado* corresponde al *índice crítico de calidad* de un emplazamiento, expresándose como una función del *índice de accidentes promedio* de los emplazamientos de la misma categoría dentro de la red de carreteras y está basado en la siguiente ecuación (Hall et al, 1987; Renshaw y Carter, 1980):

$$IC = \bar{I} + k \sqrt{\frac{\bar{I}}{E_i} + \frac{1}{2 E_i}} \quad (3.5)$$

donde:

IC = Índice crítico de calidad. En un emplazamiento puntual se expresa en accidentes/ 10^6 veh. y en una sección en accidentes/ 10^6 veh-km.

\bar{I} = Índice de accidentes (o de peligrosidad) promedio de los emplazamientos de la misma categoría dentro de la red, estimado mediante la fórmula 3.2.

E_i = Millones de vehículos-km. en una sección y millones de vehículos en un emplazamiento puntual i .

k = Constante a determinar según el nivel de confianza δ (tabla 3.1).

3.3.5.- Método de la capacidad de reducción de accidentes.

El número de accidentes que se produce en un emplazamiento durante un período determinado de tiempo está influenciado por un gran número de variables. Algunos investigadores han ajustado *modelos multivariantes* al número de accidentes. Para ello utilizan como variables independientes las características geométricas o físicas de los emplazamientos y la *exposición al riesgo*. Las variables que pueden influir en el número de accidentes pueden ser desde el tipo de emplazamiento y las diversas medidas de exposición hasta la clase y calidad de la iluminación de una carretera, pasando por el estado de la superficie del firme (Maher y Mountain, 1988).

Por otra parte, si el objetivo es identificar *puntos negros* para la posterior aplicación de las actuaciones correctoras, es obvio que solamente se pueden modificar algunas de estas variables. Es decir, ciertas características del emplazamiento por su propia naturaleza, no son fácilmente alterables, mientras que otras son susceptibles de modificación. Por lo tanto, la diferenciación en el número de accidentes acaecidos en los emplazamientos de una red de carreteras se debe, por una parte, a la disimilitud de las características permanentes y, por otra, a la semejanza en las características modificables. Las actuaciones de mejora de la seguridad suelen hacerse sobre las características modificables (Maher y Mountain, 1988).

En este mismo orden de ideas, como se dijo anteriormente se puede estimar el número esperado de accidentes en un emplazamiento ajustando un *modelo multivariante* a partir de los valores de las características permanentes y modificables (Zeeger et al, 1987). Una vez estimado el *número esperado de accidentes* en un emplazamiento, se observará que existe la siguiente diferencia (Maher y Mountain, 1988):

$$N_i - m_i \quad (3.6)$$

donde:

N_i = Número de accidentes registrados.

m_i = Número esperado de accidentes estimado mediante el modelo de multivariante.

La diferencia expresada por la ecuación 3.6 no es igual en todos los emplazamientos, puesto que éstos tienen distintas características modificables, y además existe una variación aleatoria representativa de los accidentes. Por consiguiente, McGuigan (1981) ha propuesto que dicha diferencia sea empleada para clasificar los emplazamientos de forma que se consideren *puntos negros* aquéllos que arrojan una mayor diferencia entre el *número de accidentes registrados* y el *número esperado de accidentes*. A su vez, este autor ha denominado esta técnica como el *método de la capacidad de reducción de accidentes* y argumenta que es mejor que el recurso al procedimiento basado en el *número total de accidentes*. Esto se debe a que este último método tiende a identificar emplazamientos con una gran intensidad de tráfico, los cuales no tienen necesariamente *capacidad para la reducción de accidentes*.

3.3.6.- Método del índice de gravedad de accidentes.

En los métodos explicados anteriormente no se han tenido en cuenta los costes sociales y económicos producidos por los diferentes *tipos de accidentes* de tráfico. Si se quiere hacer una clasificación racional de los emplazamientos de una red de carreteras en relación con la cantidad de accidentes, sería deseable, si los datos lo permiten, tomar en consideración también la *gravedad* de los mismos. Esta valoración se puede realizar

mediante la introducción de ciertos *factores o coeficientes*, los cuales tendrían en cuenta tanto la *gravedad* de los accidentes como la cuantificación de los daños materiales.

Para estos efectos ha sido propuesta la fórmula siguiente (Thoshos y Kokkalis, 1988):

$$\text{índice de gravedad} = P_1 n_1 + P_2 n_2 \quad (3.7)$$

donde:

n_1 = Número de accidentes con heridos.

n_2 = Número de accidentes con víctimas mortales.

P_1 = Factor de gravedad correspondiente a los accidentes con heridos.

P_2 = Factor de gravedad correspondiente a los accidentes con víctimas mortales.

Se puede ampliar esta fórmula para que incluya un mayor tipo de accidentes de tráfico, siempre y cuando los datos relativos a éstos estén disponibles.

Los valores de los *factores de gravedad* se determinan de acuerdo con las pérdidas que los distintos tipos de accidentes de tráfico ocasionan a la economía de un país. Algunos valores típicos de estos factores se presentan, a título de ejemplo, en la tabla 3.2. Las diferencias observadas en los *factores de gravedad* expuestos en dicha tabla corresponden a las diversas formas de valorar el coste de los accidentes según los criterios aplicados en cada caso.

<i>Tipo de accidente</i>	<i>Reinhold</i>	<i>Bitzl</i>	<i>Fisher</i>	<i>USA</i>	<i>USSR</i>
<i>No registrado</i>	---	--	---	--	1
<i>Daños materiales</i>	1	1	1	1	3
<i>Herida leve</i>	5	30	2	5	0.5
<i>Herida grave</i>	70	30	8	5	8
<i>Muerte</i>	130	100	40	23	135

Tabla. 3.2. Factores de gravedad (Thosolos y Kokkalis, 1988).

Otra forma de valorar la *gravedad* de los accidentes es por medio del *Número equivalente de accidentes con sólo daños materiales*. En este método se le asigna un mayor peso a los accidentes con víctimas mortales que a los accidentes con heridos y éstos, a su vez, reciben un mayor peso que los accidentes con sólo daños materiales (Institute of Transportation Engineers, 1992).

El *número equivalente de accidentes con daños materiales* se expresa de la siguiente manera:

$$NEADM = NADM + NAH \cdot F_1 + NAM \cdot F_2 \quad (3.8)$$

donde:

NEADM = Número equivalente de accidentes con sólo daños materiales.

NADM = Número de accidentes con sólo daños materiales.

NAH = Número de accidentes con heridos.

F₁ = Coste accidentes con heridos / coste accidentes con sólo daños materiales.

NAM = Número de accidentes mortales.

F₂ = Coste accidentes mortales / coste accidentes con sólo daños materiales.

Una variante de la fórmula anterior es la siguiente (Khistin, 1990):

$$NEADM = 9,5 (F + H) + 3,5 (B + C) + NADM \quad (3.9)$$

donde:

- F* = Número de accidentes mortales.
- A* = Número de accidentes con heridos en los cuales las víctimas quedan incapacitadas.
- B* = Número de accidentes con heridos en los cuales las víctimas no quedan incapacitadas.
- C* = Número de accidentes en los cuales probablemente se han producido heridas.

Según este método, los emplazamientos se clasifican de acuerdo al cómputo del *NEADM*, considerando como los más peligrosos aquéllos que presentan valores mayores de este indicador.

3.3.7- Evaluación crítica de los métodos empleados en la identificación de puntos negros.

En este apartado se analiza las ventajas e inconvenientes de los diferentes métodos de identificación de *puntos negros*.

En la actualidad no existe un método infalible de identificación de *puntos negros*, y cualquiera de los descritos anteriormente daría como resultado las siguientes deficiencias (Hauer y Persaud, 1984):

- *"Identificarían una serie de emplazamientos denominados falsos positivos, los cuales corresponden a aquellos emplazamientos que han sido identificados como puntos negros, cuando realmente no lo son."*

- "No identificarían una serie de emplazamientos denominados falsos negativos, los cuales corresponden a aquellos emplazamientos que no han sido identificados como puntos negros, cuando realmente lo son."

El método del *número total de accidentes* es el que más se ve afectado por estas deficiencias, ya que no se basa en el criterio de desviación con respecto al promedio del *número de accidentes registrados* en los emplazamientos de una misma categoría. Tampoco en este método se tienen en cuenta las condiciones del tráfico, ni las variaciones aleatorias características de la ocurrencia de los accidentes.

El método del *índice de accidentes o de peligrosidad* tiene en cuenta el volumen del tráfico de los emplazamientos y compara los pertenecientes a una misma categoría. Pero al igual que en el método del *número total de accidentes*, en el método del índice de accidentes tampoco se consideran las variaciones aleatorias características de la ocurrencia esporádica de accidentes. Por otra parte, el criterio de desviación para estimar el *índice crítico* se aplica con respecto a la media de los *índices de peligrosidad* en base a la distribución *normal*. Esto constituye una fuente de error ya que la distribución *normal* no se adapta convenientemente a la naturaleza estocástica de la ocurrencia de los accidentes.

El método del *índice de control de calidad* es una versión mejorada del método del *índice de accidentes*, ya que se basa en la distribución de *Poisson* y, por lo tanto, nos proporciona una base estadística más segura. Sin embargo, este procedimiento adolece de los mismos fallos de partida al no tener en cuenta las fluctuaciones aleatorias.

Todos los métodos mencionados, además de presentar los inconvenientes descritos anteriormente, tampoco consideran la *gravedad* de los accidentes. Es decir, cuando dos

emplazamientos tienen los mismos volúmenes de tráfico y el mismo *número de accidentes registrados*, pero difieren notablemente en la *gravedad* de las heridas de las víctimas o en la *gravedad* de las pérdidas materiales, no es aceptable que sean considerados como igualmente peligrosos. Aunque el método del *índice de gravedad* tiene en cuenta esto último, su principal problema radica en la dificultad de valorar dichos factores, circunstancia que se refleja en las discrepancias existentes en la valoración de los *factores de gravedad* propuestos en los diferentes países.

El método ideal sería un método que combinara varios de los métodos de identificación de *puntos negros* enunciados anteriormente; es decir, un método de integración que tuviera en cuenta el *número de accidentes registrados*, la *exposición al riesgo*, las *variaciones aleatorias* y la *gravedad* de los accidentes.

3.4.- FACTORES DE LOS ACCIDENTES.

3.4.1.- Introducción.

Tras haber identificado los posibles *puntos negros* por cualquiera de los procedimientos descritos en el apartado anterior, a continuación, hay que proceder a realizar un análisis más pormenorizado de las circunstancias que motivan los accidentes de tráfico acaecidos en cada emplazamiento seleccionado, con el objeto de identificar los factores que contribuyen a la ocurrencia de estos accidentes y corroborar que el emplazamiento en cuestión es realmente un *punto negro*. Sólo con posterioridad a este análisis en profundidad de la casuística registrada en cada emplazamiento procedería el diseño de las medidas correctoras pertinentes (Wattleworth et al, 1988; Balaguer et al, 1989).

El análisis de la casuística de accidentes en cada emplazamiento permitiría discriminar entre aquellos accidentes atribuibles a factores directamente relacionados con la carretera y los que se deben a otras causas, puesto que, a efectos de incremento de la seguridad en la circulación, no se deben equiparar los accidentes que pueden ser evitados por actuaciones de mejora de la infraestructura, con los que no pueden ser evitados por actuaciones de ingeniería viaria (Sayed et al, 1995).

Como es sabido, en los accidentes de tráfico pueden intervenir numerosos factores (Sabey, 1980). Éstos son fenómenos complejos cuyos *factores motivantes* pueden variar desde los físicos (carretera y condición del tiempo) a los mecánicos (características del vehículo) pasando por aquellos que están relacionados con el comportamiento y condiciones o estado del elemento humano (rasgo de la personalidad, ambiente social y cultural) (fig. 3.4). Cuando se produce un accidente, éste suele ser debido a la concurrencia de uno o varios de estos *factores* (Valdés, 1988); siendo uno de los objetivos del análisis de accidentes identificar la naturaleza de cada uno, evaluar su importancia y lograr el conocimiento de la probabilidad de interacción entre éstos que provoca el accidente (Dart y Mackenzie, 1982).

De igual forma que, en la localización de *puntos negros*, la identificación de los factores que producen los accidentes depende en gran medida de la disponibilidad de unos datos adecuados y suficientes. En los países donde el desarrollo de la ingeniería de tráfico y el control de la accidentalidad está más avanzado, existen bases de datos en las que se almacena la información obtenida a través de los cuestionarios estadísticos de accidentes. Ello hace posible que se pueda acceder fácilmente a los datos necesarios para el análisis pormenorizado y sistemático de los factores de los accidentes en los *puntos negros*.

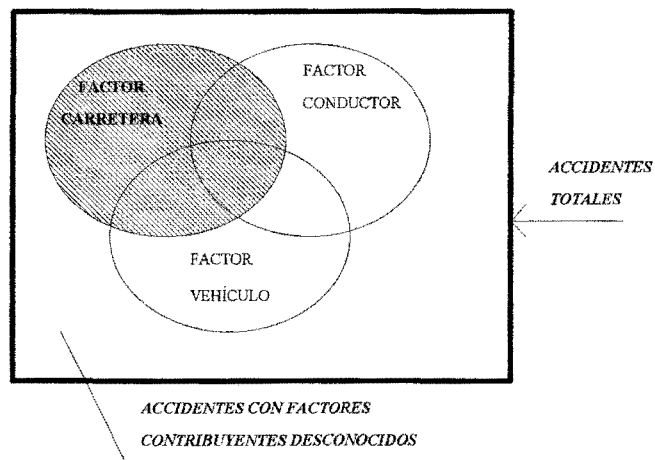


Figura 3.4. Factores de los accidentes (Sayed et al, 1995).

Se disponga o no de estos servicios de documentación avanzada, el análisis de los factores que producen los accidentes en un *emplazamiento peligroso* se debe realizar en dos etapas:

1. Identificación de las características comunes y los tipos preponderantes de accidentes.
2. Identificación de los factores que contribuyen a que se produzcan los tipos preponderantes de accidentes.

3.4.2.- Identificación de las características comunes.

Este proceso de identificación de las características comunes comienza con la obtención de los registros de accidentes en un emplazamiento dado durante un período de tiempo determinado (uno a cuatro años). A partir de la información registrada en éstos se preparan, a continuación, tablas en las que se desagregan los datos de accidentes de acuerdo a las siguientes variables:

- Datos cronológicos
- Datos climatológicos
- Estado de la carretera
- Tipo de accidente
- Tipo de colisión
- Tipos de vehículos involucrados
- Implicación de peatones
- Gravedad del accidente

A continuación, con esta información el analista debe identificar las pautas que inciden en la ocurrencia de accidentes en el emplazamiento que es objeto de estudio. Una herramienta muy útil para este fin es el *diagrama de colisión*, el cual condensa, a través de una representación sinóptica, las principales variables de todos y cada uno de los accidentes acaecidos en un emplazamiento dado a lo largo de un período de tiempo. Cada colisión se representa, en este diagrama, por medio de un conjunto de flechas, una por cada vehículo o peatón involucrado. El diagrama permite visualizar tanto las características de los diferentes accidentes, como la dirección de todos y cada uno de los vehículos o peatones implicados (Gullón, 1994). Las flechas se etiquetan con códigos que expresan los distintos tipos de vehículos, datos sobre la hora, ubicación aproximada y otras condiciones del accidente, así como el estado atmosférico del día en que se produjo. Esta descripción esquemática del emplazamiento prescinde de detalles físicos. Al ser un esquema, los accidentes se sitúan tan cerca del punto real de colisión como sea posible y, por lo tanto, no tienen porque estar situados en la ubicación exacta, pero indica siempre las circunstancias de todos y cada uno mediante una serie disgregada de símbolos. El *diagrama de colisión* contiene las características de los accidentes que habrán de ser luego correlacionadas con las características físicas y de regulación de la circulación para poder determinar los *factores motivantes* de la accidentalidad en el emplazamiento estudiado (MacShane y Roess, 1990).

Esta etapa del análisis puede revelar ya claramente algunas tendencias predominantes en la ocurrencia de accidentes, lo cual sugerirá qué características físicas del *emplazamiento peligroso* pueden ser objeto de una actuación correctora. Sin embargo, para el diseño de la actuación de mejora, hay que tener en cuenta que, en determinados casos el origen de la secuencia de sucesos que conducen al accidente puede ser un indicador más importante que el punto exacto donde se produce la colisión, o la posición final de los vehículos implicados en el accidente (O' Flaherty, 1986).

3.4.3.- Identificación de los factores contribuyentes.

Una vez que se han desagregado los datos de los accidentes acaecidos en un *emplazamiento peligroso* de acuerdo con las variables descritas anteriormente, y después de haber procedido a representarlas mediante un *diagrama de colisión*, si las tendencias predominantes en la ocurrencia de accidentes no se manifiestan claramente, hay que correlacionar las características físicas, ambientales y operacionales de dicho emplazamiento con las variables que explican el comportamiento de la accidentalidad. El objetivo de esta correlación es averiguar las causas que originan cada uno de los tipos de accidentes en el *punto negro* que se está estudiando. Quizás ésta sea una de las tareas más difíciles de realizar en el ámbito de los análisis de seguridad vial. Este trabajo ha de ser realizado por personal especializado y con amplia experiencia. Su ejecución requiere que los ingenieros de tráfico hagan uso de un plano a escala del punto negro que se está analizando. Este plano se denomina *diagrama de condición*.

Un *diagrama de condición* es una representación que muestra las principales peculiaridades físicas y medio ambientales del emplazamiento objeto del análisis. Esta es una herramienta complementaria a la anteriormente descrita que resulta muy útil para interpretar

las características infraestructurales de los accidentes (McShane y Roess, 1990). En este diagrama se muestran las características geométricas del emplazamiento, la ubicación y descripción de todos los dispositivos de ordenación y regulación del tráfico y las particularidades de las zonas adyacentes. Esta zona circundante puede abarcar, por ejemplo, desde unos 100 metros en intersecciones a 1 km. en secciones de carretera. Las principales características físicas que suele incluir el diagrama de condición son las siguientes:

Características geométricas, ubicación y descripción de los dispositivos de control.

- Dispositivos de regulación del tráfico
- Tipo y estado del pavimento
- Anchura de la carretera o calle
- Obstrucciones visuales
- Posición y tipo de iluminación
- Tipo, ubicación y visibilidad de las señales de tráfico
- Marcas viales
- Postes de señalización
- Tipo de estacionamiento

Particularidades de las zonas adyacentes.

- Ubicación de objetos y mobiliario urbano significativo
- Caminos particulares de acceso a las propiedades colindantes
- Usos de los terrenos colindantes
- Construcciones

Después de haber representado el emplazamiento con las características que se han enumerado, también es útil disponer de información de los siguientes datos sobre el tráfico:

- Velocidad
- Intensidad
- Composición de vehículos

Para cada tipo de accidente se deben de tener en cuenta además las siguientes consideraciones (McShane y Roess, 1990):

- *¿Qué acciones de los conductores motivan la ocurrencia de ese tipo de accidente?*
- *¿Qué características físicas y operacionales existentes en el emplazamiento contribuyen a que los conductores realicen ese tipo de acciones?*
- *¿Qué modificaciones se pueden realizar en el emplazamiento de tal manera que se reduzca la elección de ese tipo de acciones en el futuro?*

Para poder contestar estas tres preguntas es de gran ayuda realizar una visita al emplazamiento para observar y familiarizarse con las características específicas del punto negro, comportamiento del tráfico y cualquier otro tipo de información que no esté disponible en los cuestionarios o en las bases de datos de accidentes. También es útil revisar la descripción del accidente incluida en los cuestionarios estadísticos cumplimentados por los Agentes de Tráfico. Se trata siempre de recopilar la mayor cantidad de información procedente de diferentes fuentes para reconstruir, con la mayor fidelidad que sea posible, los sucesos y factores que contribuyen a la accidentalidad con el fin de identificar las actuaciones de mejora de la seguridad o tratamientos de ingeniería que eliminen dichos *factores*.

Por otro lado, en este tipo de análisis se suele comparar habitualmente el diseño geométrico del emplazamiento con los criterios de diseño regularmente utilizados en el momento en que se realiza el estudio. También se suelen comprobar las peculiaridades de

las condiciones del emplazamiento, como por ejemplo, el estado del pavimento (la superficie de la carretera puede llegar a ser resbaladiza, requiriendo una mayor distancia de frenado y, por lo tanto, puede ser difícil para un conductor controlar el vehículo a grandes velocidades cuando el pavimento tiene roderas u hoyos). Por otra parte, también se deben tener en cuenta otros factores como, por ejemplo, la visibilidad de las señales de tráfico. En algunos casos, el volumen de tráfico aumenta al mismo tiempo que una sección de carretera va envejeciendo; en consecuencia, esa alteración de las pautas del tráfico puede acarrear un incremento de los riesgos, justificando, la mayoría de las veces, una mejora de la regulación o la modificación del diseño geométrico. Por último, también se pueden comprobar las distancias de visibilidad para las velocidades de maniobra en uso, verificar los campos de visibilidad y eliminar eventuales obstrucciones a la misma.

En la figura 3.5 se ofrece un esquema en el que se resume la secuencia de los diferentes pasos que se deben realizar en el análisis que se ha descrito.

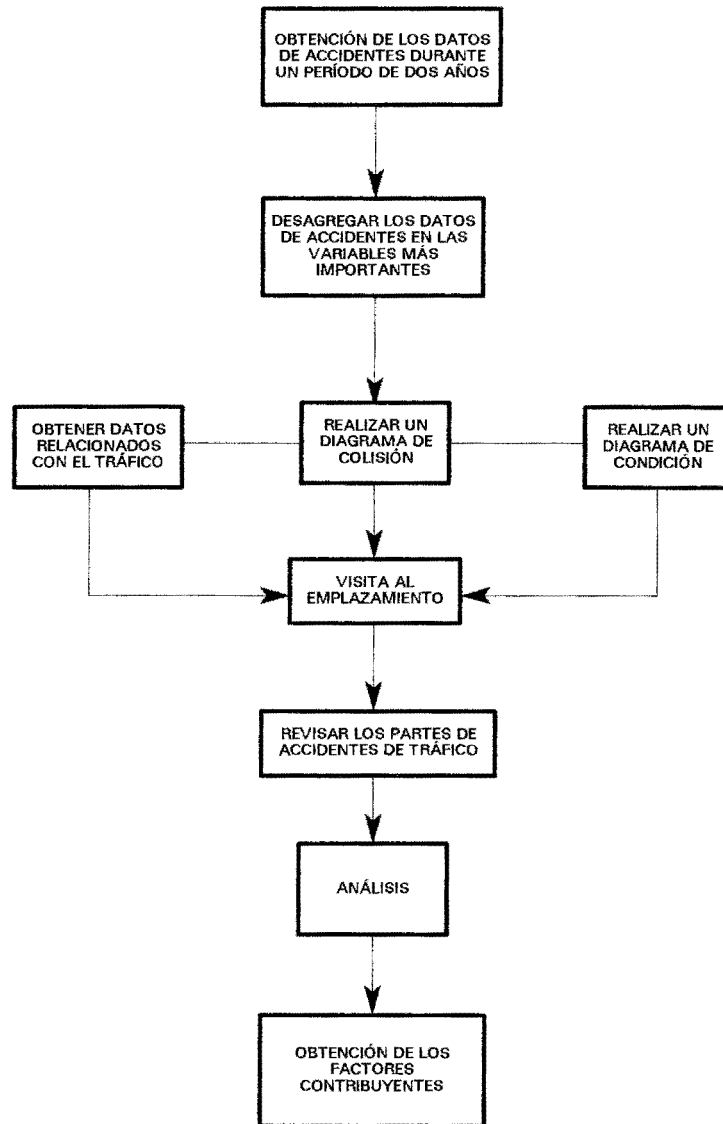


Figura 3.5. Secuencia del análisis detallado de puntos negros.

CAPÍTULO 4

LA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS ACTUACIONES DE MEJORA DE LA SEGURIDAD EN LA CIRCULACIÓN.

4.1.- INTRODUCCIÓN.

Las actuaciones en carreteras están dirigidas a eliminar las deficiencias que presentan éstas en relación con la congestión, el tráfico, la seguridad en la circulación, etc. (Izquierdo, 1994). Aunque las administraciones de carreteras realizan un gran esfuerzo en desarrollar actuaciones específicas que eliminen estos problemas, en el caso de la seguridad en la circulación, no suelen ser habituales los estudios que evalúen el impacto de tales actuaciones. La evaluación de los proyectos de mejora de la seguridad que han sido ejecutados hasta el momento es muy importante para poder determinar qué actuaciones han resultado ser las más eficaces a la hora de minimizar los riesgos inherentes a una red de carreteras (fig. 2.2), (Pardillo, 1995a y 1995b).

Por otra parte, la decisión de continuar, eliminar o mejorar los diversos programas de mejora de la seguridad en la circulación depende de la habilidad de medir la efectividad de cada uno de ellos. Mientras que sí existen evaluaciones de programas de ámbito estatal o regional, en los proyectos puntuales o actuaciones específicas ejecutadas a nivel local esta clase de evaluaciones de la efectividad son poco frecuentes. Es más, la evaluación de un programa de ámbito estatal o regional, cuando se hace, suele estar basada en criterios subjetivos o en presunciones no verificadas.

Los grandes programas de actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación implican un conjunto de actuaciones puntuales cuyo diseño y posterior ejecución tienen mayores o menores consecuencias sobre la accidentalidad. Ello justificaría la evaluación de

la efectividad de todas y cada una de las actuaciones contempladas en el programa, a fin de estimar su comportamiento respecto a la seguridad en la circulación, con el objeto de adoptar, si procede, las medidas correctoras más eficaces.

Retomando lo expuesto en el epígrafe 2.3, se puede decir que para evaluar la efectividad de una determinada actuación de mejora de la seguridad en la circulación hay dos procedimientos generales. El primero, denominado *evaluación longitudinal*, es un análisis que aborda directamente la evaluación de la eficacia recurriendo a la utilización de estudios *antes y después*. Este tipo de procedimientos basa la valoración de la efectividad de una actuación en el cómputo de accidentes. El segundo procedimiento, conocido como *evaluación de corte transversal*, aborda indirectamente la evaluación a partir del uso de modelos que predigan el número de accidentes. Estos modelos correlacionan las características geométricas y físicas de la infraestructura con las de los accidentes a través de la técnica estadística conocida con el nombre de *análisis de regresión* (Peña, 1992b). Este método de análisis asume básicamente el hecho de que entre los accidentes y las características de la infraestructura existe una relación causa-efecto (Zegeer et al, 1987; Serrano, 1978). Esta aproximación indirecta no necesita registrar datos de accidentes antes y después de la actuación, puesto que la efectividad se puede determinar estimando la diferencia entre los accidentes predichos en las condiciones "*antes*" y "*después*" para, a continuación, dividir este valor por los accidentes predichos en la condición "*antes*". La dificultad inherente al procedimiento indirecto estriba en que el modelo estimado puede ofrecer inexactitudes en la predicción del número de accidentes que limiten su utilidad.

Tal como se advirtió en el capítulo 2, en esta investigación de tesis doctoral, por razones de delimitación de su objeto, sólo se van a analizar métodos de evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación que se basan en el

procedimiento directo; es decir, aquéllos que conciernen a las modalidades de estudios *antes y después*.

Por otra parte, el procedimiento directo puede realizarse mediante un *análisis estadístico clásico* o mediante otros *métodos alternativos*.

En este capítulo, al abordar los *métodos estadísticos clásicos* se describen en primer lugar los estudios *antes y después* convencionales; es decir, aquéllos que aplican solamente los diferentes *contrastes de significación* a la evaluación de la efectividad de una actuación. Aparte de estos análisis *antes y después convencionales*, también se podría recurrir al *diseño experimental mediante emplazamientos de control*. Si bien se trata, en este último caso, de un método de probada eficacia en otros ámbitos de investigación, su aplicación a la evaluación de la efectividad de las actuaciones exigiría la realización de experimentos viarios que, por razones obvias, no pueden llevarse a cabo. Esta revisión de los *métodos estadísticos clásicos*, se completa con una explicación de las causas de sesgo en la estimación de la efectividad de las actuaciones inherentes a los estudios *antes y después convencionales*.

La exposición continúa con la descripción de los *métodos alternativos* a los anteriores que son utilizados para estimar *el número esperado de accidentes*; abordando, en primer lugar, el método *no-paramétrico* y, a continuación, el *bayesiano*. Estos son los métodos que permiten evaluar con una mayor exactitud la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación.

Por último, dada su importancia, se explicará también la *técnica de los conflictos de tráfico*, un procedimiento que utiliza el *número de conflictos de tráfico* acaecidos en un

emplazamiento durante un período de tiempo para predecir el *número esperado de accidentes a largo plazo*.

4.2.- ESTUDIOS ANTES Y DESPUÉS CONVENCIONALES.

Los estudios *antes y después convencionales* son la forma más frecuente y sencilla de evaluar las actuaciones. Estos estudios consisten en registrar y comparar el número de accidentes durante dos intervalos de tiempo de la misma duración, uno anterior y otro posterior a la ejecución de la actuación objeto de estudio. Si el número de accidentes en el período posterior a la ejecución de la actuación disminuye, se dice que la actuación ha sido efectiva como medida correctora que mejora la seguridad. Por lo tanto, según estos estudios la efectividad de una actuación ejecutada en un emplazamiento o en grupo, se puede expresar en porcentaje de la manera siguiente (Larsen, 1986):

$$E (\%) = \frac{N_D - N_A}{N_A} \cdot 100 \quad (4.1)$$

donde:

- E = Efectividad de la actuación.
- N_D = Número de accidentes registrados en el período posterior a la ejecución de la actuación en un emplazamiento o en un grupo de emplazamientos.
- N_A = Número de accidentes registrados en el período anterior a la ejecución de la actuación en un emplazamiento o en un grupo de emplazamientos.

No obstante, es necesario todavía profundizar en el análisis para esclarecer si la efectividad, calculada en base a los registros de la ocurrencia de accidentes y expresada en términos porcentuales, es o no *significativa*. Hay que tener en cuenta que una variación

pequeña en el número de accidentes anterior y posterior a la ejecución de la actuación puede ser debida al azar (Larsen, 1986). Existen diversas formas de contrastar la *significación* de un cambio en el *número de accidentes registrados*, siendo algunas de las más utilizadas, los contrastes de *Poisson*, *chi-cuadrado*, *binomial* y de la función de *Bessel*.

Para una mayor claridad de lo explicado, en la figura 4.1 se puede observar un esquema de la evaluación de la efectividad mediante los estudios *antes y después convencionales*.

En el siguiente apartado se procederá a la explicación de los diferentes tipos de *contrastos de significación*.

4.2.1.- Contrastes de significación.

Para adoptar una decisión, es útil hacer hipótesis sobre la población implicada. Tales hipótesis, que pueden ser ciertas o no, se llaman *hipótesis estadísticas*. En muchos casos, se formula una *hipótesis estadística* con el único propósito de rechazarla. Por ejemplo, si se desea decidir si una actuación de seguridad ha sido efectiva, se formula la hipótesis de que no hay ninguna diferencia en el *número de accidentes registrados* antes y después de la actuación. Tal hipótesis se denomina *hipótesis nula* y se denota por H_0 . Toda hipótesis que difiere de una dada se llama *hipótesis alternativa*. Cuando esta hipótesis es alternativa a la *hipótesis nula* se denota por H_1 . La *hipótesis alternativa* en este caso sería la existencia de una diferencia entre el *número de accidentes registrados* antes y después de la actuación. Si se supone que la *hipótesis nula* es cierta, pero se observa que el resultado obtenido difiere notablemente del esperado bajo tal hipótesis, entonces se dice que la diferencia observada es *significativa* y, por lo tanto, se rechaza la *hipótesis nula*. De esta forma se llegaría a la

conclusión de que la actuación ha sido efectiva. Los procedimientos que ayudan a decidir si se rechaza o acepta la *hipótesis nula*, se llaman *contrastes de significación* (Snedecor y Cochran, 1989).

Si se rechaza una hipótesis cuando debiera ser aceptada, se dice que se ha cometido un *error de tipo I*. Por otra parte, si se acepta una hipótesis que debiera ser rechazada, se dice que se ha cometido un *error de tipo II*. Al contrastar una hipótesis, la máxima probabilidad con la que se está dispuesto a correr el riesgo de cometer un *error de tipo I* se llama *nivel de significación del contraste* y se denota por la letra α . Esto quiere decir que si, por ejemplo, se escoge el *nivel de significación* 0,10 al diseñar una regla de decisión, habrá 10 oportunidades entre 100 de rechazar la hipótesis cuando debiera haber sido aceptada; dicho de otro modo, se tiene un 90% de *confianza* en que se ha adoptado la decisión correcta. En tal caso se dice que la hipótesis ha sido rechazada al *nivel de significación* 0,10 y, por lo tanto, la hipótesis tiene una probabilidad de un 10% de ser falsa.

Estas técnicas proporcionan un método idóneo para contrastar la *significación* de una actuación cuando la magnitud del número de accidentes anterior a la actuación es suficientemente elevada como para asegurar la *significación*. Si este número fuese pequeño puede que no sea suficiente para considerar el porcentaje de reducción de accidentes que resulta de una actuación en particular como *estadísticamente significativo*. En consecuencia, esta técnica de contraste no es adecuada para el análisis individualizado de la efectividad de aquellas actuaciones ejecutadas en emplazamientos donde el número de accidentes es muy escaso. Esta dificultad podría soslayarse en estudios más amplios, que permitan la agrupación de la casuística de accidentalidad correspondiente a un cierto número de emplazamientos de las mismas características donde se han ejecutado actuaciones similares; sin embargo, en la práctica, no suele ser frecuente operar con un

número suficiente de actuaciones como para asegurar en este caso la *significación* de la evaluación de la efectividad. Por último, tampoco conviene olvidar que el efecto de las actuaciones de seguridad en la circulación suele ser, en la práctica, bastante limitado y esto hace que, en la mayoría de los casos, que el resultado del contraste no permita asegurar estadísticamente que las actuaciones sean efectivas.

Desde un punto de vista estrictamente estadístico, para valorar el alcance y posibilidades de uso de esta técnica de estimación de la efectividad, también hay que tener en cuenta que dado un resultado de una evaluación de seguridad en la circulación, el rechazo o no rechazo de la *hipótesis nula*, depende enteramente del *nivel de significación* elegido; por lo tanto, si bien la hipótesis puede ser rechazada para algunos *niveles de significación*, para otros niveles puede ser aceptada. Hauer (1983b) argumenta al respecto que este tipo de contraste resulta, en la práctica, arbitrario dado que el valor del *nivel de significación* adoptado es siempre una cuestión de convenio. En este sentido, los textos de estadística dejan a voluntad del investigador la elección de los *niveles de confianza* apropiados para cada análisis concreto, recomendándose el uso de *niveles de significación* con umbrales de 0,01 y 0,05. Estos *niveles de significación* resultan adecuados para trabajar en la investigación de otras disciplinas. En los estudios de la efectividad de las actuaciones de seguridad vial, los datos disponibles hacen que operar con un nivel del 5% sea raramente factible.

Hauer (1983b) también argumenta en contra del uso de estas *pruebas de significación* el hecho de que el resultado del contraste depende de la elección de la *hipótesis nula*. El resultado está relacionado con la decisión sobre cuál de las hipótesis enfrentadas jugará el papel de la *hipótesis nula*. Por lo tanto, en función de la elección que se haga se obtendrán resultados diferentes. Por ejemplo, al realizar el contraste de la efectividad de una actuación,

se asumen dos valores de dicha efectividad: El primer valor es cero o, lo que es lo mismo, la actuación no ha sido efectiva. Por otro lado, el segundo valor puede ser, por ejemplo, un valor de la efectividad del 20%. A continuación se toma como *hipótesis nula* el valor de cero, al realizar el contraste se deriva, como primera conclusión, que no se puede rechazar dicha hipótesis. Si, por el contrario, se elige la efectividad del 20% como *hipótesis nula* y como *alternativa* el primer valor igual a cero, al realizar de nuevo un contraste da como resultado que no se puede rechazar la nueva *hipótesis nula* para el mismo *nivel de significación*. Esto pone de manifiesto que existe un contrasentido, puesto que en ambos casos se pueden rechazar las *hipótesis nulas* y, por lo tanto, los resultados de los contrastes arrojan conclusiones diferentes dependiendo a cuál de los dos valores de la efectividad enfrentados se le asigne el papel de *hipótesis nula*. En realidad existe un intervalo de valores de la efectividad en los que se puede rechazar la *hipótesis nula*, siempre que ésta esté dentro de dicho intervalo de valores y, por lo tanto, las conclusiones obtenidas del contraste estarán en función de una decisión subjetiva como es la elección de la *hipótesis nula*.

Después de haber explicado someramente el fundamento estadístico del *contraste de significación* y sus posibilidades de aplicación a la evaluación de la efectividad, el paso siguiente debe ser la exposición de algunos de los tipos de contraste más utilizados en las evaluaciones de mejora de la seguridad en la circulación.

- **Contraste de la distribución de Poisson.**

En esta prueba el *número de accidentes registrados* en el período anterior se considera como un valor fijo y constante, correspondiendo dicho valor a la media de una *distribución de Poisson*. Dado un cierto registro de accidentes en el período anterior λ , los términos de la sumatoria de la distribución indicada en la ecuación 4.2 se suman para

determinar la probabilidad que permite considerar como *significativa* para un determinado *nivel de confianza* la diferencia entre los registros de accidentes anterior y posterior a la actuación (Weed, 1986):

$$\alpha = \sum_{N_D = N_{D1}}^{N_{D2}} \frac{\lambda^{N_D} e^{-\lambda}}{N_D!} \quad (4.2)$$

donde:

- α = Probabilidad de que $N_{D1} \leq N_D \leq N_{D2}$.
- λ = Media de la distribución de Poisson asumida como el número de accidentes N_A registrados en el emplazamiento durante el período anterior.
- e = Base de los logaritmos naturales.
- N_{D2}, N_{D1} = Límites superior e inferior de la sumatoria.
- N_D = Número de accidentes registrados en el emplazamiento durante el período posterior.

Para admitir como *estadísticamente significativa* una reducción del *número de accidentes registrados* después de la actuación, los límites de la sumatoria corresponderían, en la ecuación 4.2, a los valores: $N_{D1} = 0$ y $N_{D2} = N_D$. El valor de la probabilidad obtenida mediante dicha ecuación habrá de ser comparado con el valor correspondiente al *nivel de significación* elegido para un determinado *nivel de confianza*. Si el valor de la probabilidad fuese menor que el valor del *nivel de significación* adoptado, entonces se acepta que existe una *diferencia significativa* entre el registro de accidentes anterior y posterior a la actuación y, por lo tanto, dicha actuación puede considerarse *efectiva* como medida de reducción del número de accidentes (Datta et al, 1978).

- **Contraste *chi-cuadrado*.**

Este método está basado en la distribución *chi-cuadrado*. Esta distribución es aquella en la que una variable se puede expresar mediante la ecuación 4.3, para el caso $\nu - 1$ *grados de libertad* (Peña, 1992a):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\nu} \frac{(O_i - ES_i)^2}{ES_i} \quad (4.3)$$

donde:

- χ^2 = Estadístico *chi-cuadrado*.
- O_i = Número de accidentes registrados.
- ES_i = Registro teórico esperado
- ν = Número de variables

A diferencia del contraste anteriormente descrito, el procedimiento basado en la prueba del *chi-cuadrado*, no considera el *número de accidentes registrados* en el período anterior como una constante, sino como una variable aleatoria (Weed, 1986; Datta et al, 1978).

Para verificar si la diferencia de la accidentalidad anterior y posterior a la actuación es *significativa*, se considera como *hipótesis nula* el caso en que N_D y N_A son valores registrados de la misma *distribución de Poisson*. Aquí, la mejor estimación de la media de esta distribución es el promedio de N_D y N_A . Por consiguiente, dado que en este caso el número de variables es igual a dos, se tendrá que (Weed, 1986):

$$ES_A = ES_D = \frac{(N_A + N_D)}{2} \quad (4.4)$$

donde:

N_A = Número de accidentes registrados en el emplazamiento durante el período anterior a la actuación.

N_D = Número de accidentes registrados en el emplazamiento durante el período posterior a la actuación.

Sustituyendo ahora en la ecuación 4.3 los valores teóricos de ES_A y ES_D por los estimados a través de la expresión anterior se obtiene que (Weed, 1986):

$$\chi^2 = \frac{(N_D - N_A)^2}{(N_D + N_A)} \quad (4.5)$$

Por último, consultando la tabla de *chi-cuadrado* se puede obtener el *valor crítico* χ_c^2 que corresponde a 1 *grado de libertad* para un determinado *nivel de confianza*. Si se cumple que $\chi^2 > \chi_c^2$ entonces se considera rechazable la *hipótesis nula* de que N_D y N_A son registros de la misma media de una distribución de *Poisson* y, por lo tanto, se puede concluir que la actuación ha sido efectiva en la reducción de la accidentalidad.

- **Contraste binomial.**

Este contraste, como su nombre indica, está basado en la *distribución binomial*. La *hipótesis nula* es aquí la suposición de que no se ha producido un *variación significativa* en el registro de los accidentes antes y después de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación.

Este procedimiento asume que el *número de accidentes registrados* antes y después de la ejecución de la actuación está distribuido como una *variable binomial* con el parámetro $p = 0,5$. El *nivel de significación* de este contraste se obtiene aplicando la siguiente ecuación (Weed, 1986):

$$\alpha = 0,5^N \sum_{N_D = N_1}^{N_2} \frac{N!}{[N_D! (N - N_D)!]} \quad (4.6)$$

donde:

α = Probabilidad de que $N_{D1} \leq N_D \leq N_{D2}$.

$N = N_D + N_A$

Cuando se cumple que $N_D < N_A$, habrá que verificar todavía si la reducción de la accidentalidad después de la actuación es *estadísticamente significativa*. En este caso, los límites de la sumatoria de la ecuación 4.6 serán $N_1 = 0$ y $N_2 = N_D$.

El *nivel de significación* estimado mediante la ecuación anterior, se compara con el elegido para un *nivel de confianza* determinado. Cuando el valor estimado es inferior al valor elegido, entonces se rechaza la *hipótesis nula* y se dice que la actuación ha sido efectiva (Weed, 1986).

- **Contraste de la función de Bessel.**

En este procedimiento se considera que los accidentes en los períodos anterior y posterior a una actuación, son los valores registrados de dos variables independientes

correspondientes a dos *distribuciones de Poisson*. Por consiguiente, si los accidentes antes y después de una actuación se ajustan a una distribución de *Poisson*, entonces las medias de éstos, antes y después de la actuación, también se ajustarán (Nicholson, 1987).

Bajo la *hipótesis nula* de que las medias λ y μ de las dos distribuciones de *Poisson* correspondientes a los períodos anterior y posterior a la actuación son iguales para períodos de registro de accidentes similares, la diferencia de los registros de accidentes antes y después de la actuación viene dada por la siguiente ecuación (Nicholson, 1987):

$$P(N_A - N_D) = e^{-2c} \sum_{\beta=0}^{\infty} \frac{1}{\beta! (\beta + |N_A - N_D|)!} c^{2\beta + |N_A - N_D|} \quad (4.7)$$

donde:

$$N_A = \sum_{i=1}^n N_{Ai}$$

$$N_D = \sum_{i=1}^n N_{Di}$$

N_{Ai} = Número de accidentes en el año i anterior a la ejecución de la actuación.

N_{Di} = Número de accidentes en el año i posterior a la ejecución de la actuación.

n = Número de años en que se registran los accidentes.

$c = n\lambda = n\mu$

Según Nicholson (1987) usando la relación anterior se puede calcular la función de densidad de la diferencia entre N_A y N_D . Dada la *hipótesis nula* de que λ y μ son iguales, a partir de esta función de densidad se pueden estimar *intervalos de confianza* de $(N_A - N_D)$.

Cuando el valor registrado de $(N_A - N_D)$ se encuentra fuera de los *limites de confianza* se rechaza la *hipótesis nula*, y por lo tanto, se puede decir que la actuación ha sido efectiva.

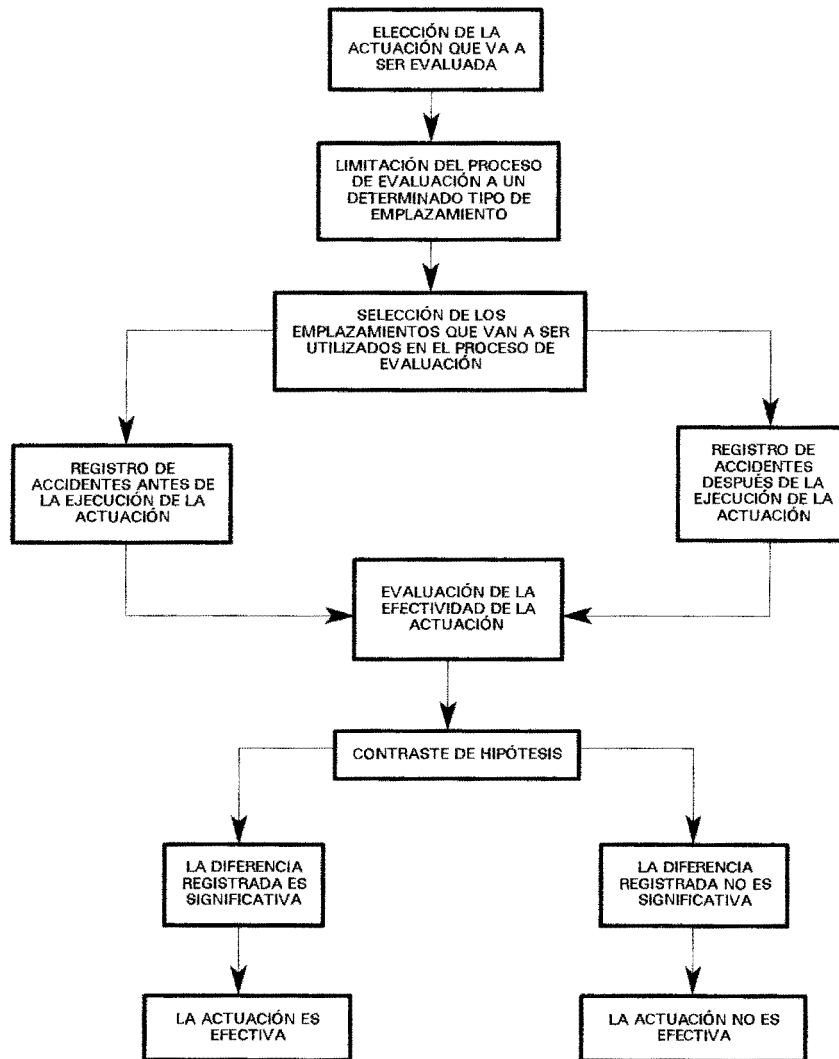


Figura 4.1. Evaluación de la efectividad mediante estudios antes y después convencionales.

4.2.2.- Factores de sesgo inherentes a los estudios *antes y después convencionales*.

Después de haber descrito los distintos *contrastes de significación* utilizados para evaluar la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación mediante los estudios *antes y después convencionales*, conviene hacer todavía algunas consideraciones sobre las principales dificultades con las que suelen encontrarse los investigadores y analistas a la hora de realizar esta tarea.

Si se explicó en primer término la evaluación de la efectividad mediante estos estudios, se debió a que implican procedimientos basados en herramientas estadísticas relativamente sencillas y de fácil aplicación. Sin embargo estos diseños presentan algunos inconvenientes que afectan al rigor del proceso evaluatorio y, en consecuencia, limitan la validez de los resultados obtenidos.

Una vez que se ha realizado un *contraste de significación* por cualquiera de los métodos tratados, éstos no permiten evaluar qué porcentaje del cambio producido en la accidentalidad antes y después de la actuación es debido a la misma, ni tampoco qué porcentaje del cambio se debe a otros factores.

Los principales factores de sesgo o dificultades inherentes al empleo de estos procedimientos son los siguientes:

- La *regresión a la media*
- La existencia de *actuaciones simultáneas*
- La presencia de una *tendencia general en la accidentalidad*
- La *migración de accidentes*

Entre todas estas dificultades, el fenómeno de *regresión hacia la media* quizás sea el que mayores inconvenientes presenta. Como se verá a continuación, dicho fenómeno se ve agravado por el efecto derivado de la combinación entre la forma habitual de identificar los emplazamientos como *puntos negros* y la manera de realizar la evaluación de la efectividad de las actuaciones ejecutadas en los mismos a través de los estudios *antes y después convencionales*.

- **Regresión a la media.**

Como se ha descrito en el capítulo 3, la ejecución de las actuaciones específicas de mejora de la seguridad exige la previa identificación de los *emplazamientos peligrosos*. Esta identificación suele realizarse en función del *número de accidentes registrados* en cada uno de los emplazamientos de una red; es decir, se identifican como susceptibles de mejora aquéllos que registran un nivel de accidentalidad mayor o igual a un número determinado de accidentes. Como ya se señaló en el epígrafe 3.3.1, esta forma de identificar los emplazamientos es habitualmente conocida como la *técnica de los puntos negros* (McGuigan, 1981).

Este procedimiento de identificación de *puntos negros* produce resultados sesgados cuando se realiza la evaluación de la efectividad de las actuaciones mediante los estudios *antes y después convencionales*, haciendo que las actuaciones de mejora parezcan más efectivas de lo que son en realidad. Por lo que lógicamente, es crucial que se tenga en cuenta la existencia y magnitud de este sesgo a fin de introducir las correcciones necesarias cuando se realicen estudios *antes y después* (Hauer, 1980b). La causa del sesgo estriba en la aceptación de una hipótesis errónea que Hauer (1986) enuncia de la siguiente manera:

"...el número de accidentes registrados en un emplazamiento, en el período anterior a la ejecución de una actuación, es una estimación insesgada del número esperado de accidentes en un período posterior a la aplicación de la actuación, suponiendo el caso de que la actuación no hubiera sido llevada a cabo"

En relación con lo hasta aquí expuesto, Brüde y Larsson (1988) definieron la *regresión hacia la media* de la siguiente manera:

"...el fenómeno por el cual un número aleatorio de accidentes elevado en un emplazamiento durante un período de tiempo anterior, es seguido por un número aleatorio de accidentes reducido durante un período de tiempo posterior similar, aún cuando no se hayan ejecutado actuaciones de seguridad vial en dicho emplazamiento."

A lo que cabría añadir todavía la siguiente observación que en el mismo sentido hacen Hauer y Persaud (1982):

"...como los emplazamientos son seleccionados para tratamiento debido a que en ellos se produce un elevado número o índice de accidentes, a causa del fenómeno de regresión a la media, se debería esperar que éstos tengan un número menor de accidentes en un período posterior, aún cuando no se hubiera llevado a cabo ninguna actuación."

En general, en los emplazamientos con un *número de accidentes registrados superior al promedio*, se debería esperar que en el período posterior a la ejecución se produzca una *disminución del número de accidentes registrados*; aún cuando no se haya producido la ejecución de la actuación; y viceversa, cuando el *número de accidentes registrados es bajo* se espera que ocurra lo contrario. Por consiguiente, en un análisis antes y después acompañado de un *contraste de significación*, esta disminución del *número de accidentes registrados* es interpretada como una indicación de que la actuación ha sido efectiva.

Lo dicho anteriormente indica que para poder estimar de manera más rigurosa la efectividad de una actuación, no solamente se debe realizar un *contraste de significación* mediante algunos de los métodos estadísticos descritos anteriormente, sino que también debe hacerse una estimación del número promedio de accidentes a largo plazo en el emplazamiento. Hauer (1986) denomina a este número promedio de accidentes a largo plazo como el *número esperado de accidentes* (m) que, como su nombre indica; es el número de accidentes que se espera que se produzcan a largo plazo en un emplazamiento, siempre y cuando no se modifiquen las características físicas del mismo como consecuencia de cualquier tipo de actuación.

En este mismo orden de ideas, Nicholson (1987, 1988, 1989 y 1990) dice que los accidentes de tráfico son fenómenos relativamente raros y que a causa de las fluctuaciones con que se producen, es generalmente difícil identificar lo que puede ser llamado el *índice de accidentes verdadero implícito* (*Underlying True Accident Rate, UTAR*). Según Nicholson el *UTAR* de un emplazamiento no se conoce con exactitud. Éste no debe ser confundido con el *número de accidentes registrados* en un período de tiempo. Para este autor el *UTAR* es el índice por excelencia de la seguridad vial y, por lo tanto, es el que debería ser utilizado para identificar emplazamientos peligrosos y para evaluar la efectividad de las actuaciones (Nicholson 1987, 1988, 1989 y 1990).

Como se ha explicado, *el número de accidentes registrados* en un período de tiempo anterior a la actuación (N_A) no es un buen estimador del *número esperado de accidentes*, debido a que los emplazamientos que pueden ser objeto de una actuación no se identifican al azar, sino en virtud de que en éstos se ha registrado un número de accidentes mayor que un cierto valor crítico. Cuando se emplea a N_A como un estimador de m , el efecto de la

actuación se evalúa mediante la fórmula expresada a continuación (Mountain y Fawaz, 1991):

$$e^* = \frac{N_D}{N_A} \quad (4.8)$$

El estimador del efecto de la actuación e^* , produce un error inducido por el *efecto de regresión a la media*. Este efecto se puede expresar como sigue (Mountain y Fawaz, 1991):

$$r = \frac{m}{N_A} \quad (4.9)$$

donde r es el *efecto de regresión a la media*.

Por otra parte, el porcentaje de cambio (R) producido en el número de accidentes debido al *efecto de regresión hacia la media* será igual a:

$$R(\%) = \frac{m - N_A}{N_A} \cdot 100 \quad (4.10)$$

Para concluir, se dirá que este porcentaje del cambio debido al *efecto de regresión hacia la media* es lo que hace que en los estudios *antes y después* se sobrestime, en la mayoría de los casos la efectividad de las actuaciones; aunque también es posible que, si el *número de accidentes registrados* es muy pequeño, se subestime la efectividad de las actuaciones realizadas.

- **Actuaciones simultáneas.**

Es posible que la diferencia resultante entre el *número de accidentes registrados* antes y después de la actuación sea debida, no solamente a una actuación en particular, sino a la circunstancia de que en el mismo período de tiempo pudieron haberse ejecutado otro tipo de actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación o de ingeniería en el mismo emplazamiento. En este caso (Serret y Mosquera, 1995), las *actuaciones simultáneas* podrían haber influido en la diferencia del *número de accidentes registrados*. El ingeniero siempre debería tomar en consideración que el efecto resultante deriva de la acción concomitante de todas las *actuaciones simultáneas* que se han ejecutado en el emplazamiento y no sólo de la que se esté evaluando.

- **Tendencias temporales de la accidentalidad.**

Al hacer la evaluación de la efectividad de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación a lo largo de un período de tiempo más o menos dilatado, es posible que, en un determinado emplazamiento, el número de accidentes haya sufrido un cambio debido a la ejecución de dicha actuación; sin embargo, el cambio producido en el número de accidentes puede ser debido también a una evolución latente, positiva o negativa, manifestada en períodos prolongados de tiempo en una red de carreteras. Esta tendencia puede revelar una disminución o aumento del número de accidentes debido a la combinación de muchos factores. Como se sabe, existen otras actuaciones que no son propiamente de mejora de la seguridad en la circulación (legislación, vigilancia policial, campañas de educación, mejoras en el diseño de los vehículos, cambios sociales, etc.), que pueden alterar el número de accidentes en los emplazamientos concretos, aún cuando no se hayan realizado actuaciones de seguridad en la circulación sobre ellos. De la misma manera que en el caso de las

actuaciones simultáneas, el ingeniero debe tener en cuenta en sus evaluaciones también esta *tendencia en el tiempo* y, en el caso de que hayan afectado a la diferencia en el número de accidentes, debería ponderarse el efecto derivado de este fenómeno global con el efecto inherente a la actuación de mejora de la seguridad en la circulación que se ha realizado en un determinado emplazamiento (Council et al, 1980).

- **Migración de accidentes.**

Entre los ingenieros de tráfico existe una cierta sospecha de que cuando se actúa sobre un punto negro, la reducción del número de accidentes va, en apariencia, acompañada de incremento del número de accidentes en los emplazamientos adyacentes al que ha sido objeto de actuación. Este fenómeno ha sido denominado por diferentes investigadores como *migración de accidentes* (Boyle y Wright, 1984; Persaud, 1986a; Wright y Boyle, 1987) y, de ser realidad el mismo, constituye indudablemente una dificultad a la hora evaluar las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación, ya que una parte del beneficio producido por la actuación de mejora se diluiría a causa del incremento en el número de accidentes en los emplazamientos periféricos.

Por otra parte, en la actualidad hay un gran debate sobre la causa del incremento en el *número de accidentes registrados* en los emplazamientos adyacentes; es decir, si el incremento se debe a la actuación de mejora de la seguridad en la circulación o, por el contrario, este incremento se hubiera producido también con independencia de la actuación llevado a cabo (Boyle y Wright, 1984; McGuigan, 1985). Resumiendo esta problemática, Mountain y Fawaz (1992) dan seis posibles interpretaciones de la *migración de accidentes* que pueden, a su vez, clasificarse en dos grandes grupos. El primero aglutina aquellas interpretaciones que hacen a la actuación responsable del incremento registrado en el

número de accidentes en los emplazamientos adyacentes, mientras que ubican en el segundo las interpretaciones que sostienen la hipótesis de que el incremento registrado no está relacionado con la ejecución de la actuación de mejora.

Las interpretaciones incluidas en el primer grupo son las siguientes (Mountain y Fawaz, 1992):

Compensación del riesgo. La actuación de mejora de la seguridad en la circulación ejecutada en un emplazamiento, modifica el comportamiento del conductor de acuerdo con el nivel de riesgo que percibe (Wright y Boyle, 1987). En este sentido, Boyle y Wright (1984) sugieren que la mejoría del emplazamiento podría reducir la conciencia que deben tener los conductores de la necesidad de precaución, dando lugar a una modificación en el comportamiento de éste y, en consecuencia, se incrementa el riesgo de accidentes en los emplazamientos adyacentes.

Puede existir un *efecto final* unido a la ejecución de algunos tipos de proyectos de ingeniería, en los que los conductores no se adaptan con la suficiente rapidez a la modificación brusca de las características de la carretera al finalizar el tramo donde se ejecutó la actuación. En este sentido, ejemplos de estos proyectos serían la instalación de sistemas de iluminación, la adición de un carril a una calzada, el desdoblamiento de una carretera.

Un incremento de la exposición a los accidentes en los emplazamientos adyacentes. Algunas actuaciones pueden originar un cambio en el volumen y la composición del tráfico en los emplazamientos donde han sido ejecutadas y en las circundantes. Por lo que, esta

alteración del tráfico hace que se incrementen los accidentes en los emplazamientos adyacentes.

Por otra parte, dentro del grupo en que la explicación del incremento de los accidentes en los emplazamientos próximos no se considera relacionada con la ejecución de las actuaciones se encuentran las interpretaciones siguientes (Mountain y Fawaz, 1992):

La hipótesis de que *el incremento registrado en los accidentes en los emplazamientos circundantes es una ilusión causada por el efecto de regresión a la media*. Es decir, mientras que los emplazamientos donde se ejecutan las actuaciones son aquéllos que han tenido un número de accidentes relativamente grande en el período anterior a la actuación, los emplazamientos adyacentes son los que han tenido en el mismo período un número de accidentes relativamente pequeño. De esta manera, el efecto de *regresión hacia la media* produciría una disminución aleatoria de los accidentes en los emplazamientos identificados para la actuación, y un incremento aleatorio en los que no lo han sido, dando como resultado una *migración* de accidentes que hubiera ocurrido de todas formas aunque no se hubiera llevado a cabo la actuación (McGuigan, 1985; Maher, 1987).

La causa podría ser un *deterioro físico de los emplazamientos adyacentes* a aquél que ha recibido una actuación, lo cual provoca un mayor número de accidentes en esos emplazamientos.

El incremento registrado en el número de accidentes puede ser debido en parte al efecto de una *tendencia temporal de aumento de la accidentalidad* que hubiera ocurrido aunque no se hubiera ejecutado ninguna actuación.

A raíz de lo expuesto hasta ahora, cabe concluir que en la actualidad existe una necesidad de investigar con mayor precisión estos fenómenos que inciden sobre la accidentalidad y, por lo tanto, sobre la evaluación de la efectividad de las actuaciones. Faltan todavía resultados concluyentes sobre cuestiones que siguen siendo objeto de polémica, especialmente sobre la *migración de accidentes* (Mountain y Fawaz, 1989; 1991; 1992). El problema principal a la hora de llevar a cabo este tipo de investigación sigue siendo la inexistencia de bancos de datos con información adecuada acerca de los accidentes, las características viarias de las redes y los diferentes tipos de actuaciones ejecutadas tanto en los *emplazamientos peligrosos* como en las áreas circundantes.

4.3.- DISEÑO EXPERIMENTAL MEDIANTE EMPLAZAMIENTOS DE CONTROL.

Este diseño es similar al de los estudios *antes y después convencionales* en que se registran los accidentes anteriores y posteriores a la ejecución de la actuación. Sin embargo, se diferencia de ellos en que la investigación debe ser planificada antes de que la actuación sea llevada a cabo. Los emplazamientos que se consideran más peligrosos y, por lo tanto, aquéllos a los que se les deben aplicar las actuaciones, son aleatoriamente seleccionados, bien para que formen parte de un *grupo de control*, o bien para que en ellos se ejecuten las actuaciones (fig. 4.2). Esta elección aleatoria se realiza antes de la ejecución de dichas actuaciones con el fin de dar a todos los emplazamientos la misma oportunidad de recibir la actuación de tal forma que se prevenga la existencia de sesgos (Peña, 1986b). De esta forma se pretende que el grupo de emplazamientos que sirve de control y el grupo elegido para ejecutar las actuaciones, sean similares en todos los factores excepto en la ejecución de la actuación (Council et al, 1980).

Una vez hecha la asignación aleatoria, se registra el número de accidentes en ambos grupos durante el período de tiempo anterior a la aplicación de la actuación. A continuación se ejecuta la actuación en sólo uno de los grupos y finalmente se registra el número de accidentes en ambos después de la ejecución. Para que los resultados sean válidos, es importante también que los períodos de tiempo utilizados para registrar los accidentes en ambos grupos sean idénticos.

La estimación del número de accidentes después de la ejecución de la actuación se basa en los datos de los emplazamientos que corresponde al *grupo de control*. Esta estimación se ampara en la hipótesis de que si no se hubiera producido la ejecución de la actuación, el grupo donde se ha realizado el tratamiento se comportaría exactamente igual que el grupo que sirve de control. Por ello, es muy importante que las características -físicas geométricas, etc.- de los *emplazamientos de control* sean muy similares a las de los emplazamientos elegidos como objeto de la actuación.

A partir de la estimación del número de accidentes después de la actuación en el grupo donde se realizó la ejecución, se evalúa que porcentaje de la efectividad se debe a la actuación es si misma y que porcentaje se debe a otros factores desconocidos.

Al igual que en los estudios *antes y después convencionales*, una vez registrados los accidentes antes y después de la actuación se puede utilizar un *contraste de significación* apropiado para ver si las diferencias registradas son *significativas*.

La principal objeción a este método radica en que, por razones de diseño, se impide actuar sobre los emplazamientos de control aún cuando se sepa que éstos son peligrosos. Además de los problemas éticos o deontológicos que de estos diseños pueden derivarse, el

hecho de planificar el diseño antes de la ejecución de la actuación no siempre es posible debido a la carencia de los datos necesarios. La actuación debe ser realizada en un gran número de emplazamientos, lo cual es otro inconveniente debido al coste que ello representa. Además resulta prácticamente imposible simultanear la ejecución de las actuaciones exactamente al mismo tiempo. También, resulta muy difícil encontrar *emplazamientos de control* adecuados que sean similares y que estén espacialmente próximos.

La principal ventaja del método, por el contrario, es que aunque sea de muy difícil aplicación, eliminaría las causas de sesgo expuestas en el apartado anterior.

Podría emplearse una variante de este método en la cual los emplazamientos sobre los que se va a actuar no son elegidos de forma aleatoria, sino que se parte de un conjunto de emplazamientos donde se sabe previamente que se han ejecutado actuaciones a lo largo de un período más o menos extenso de tiempo (Robertson y Opiela, 1985). Estos emplazamientos donde se han ejecutado actuaciones se comparan con otros de las mismas características que no hayan recibido actuaciones de seguridad en el mismo período de tiempo (Tanner, 1958). A partir de esta comparación se estima qué porcentaje de la efectividad se debe a la actuación es sí misma y qué porcentaje se debe a otros factores (Lyles et al, 1986).

Este diseño no es tan riguroso como el anterior, ya que en este caso no se puede asegurar que el grupo donde se realizó el tratamiento se comportó de igual forma que el grupo donde no se realizó (Mountain et al, 1995).

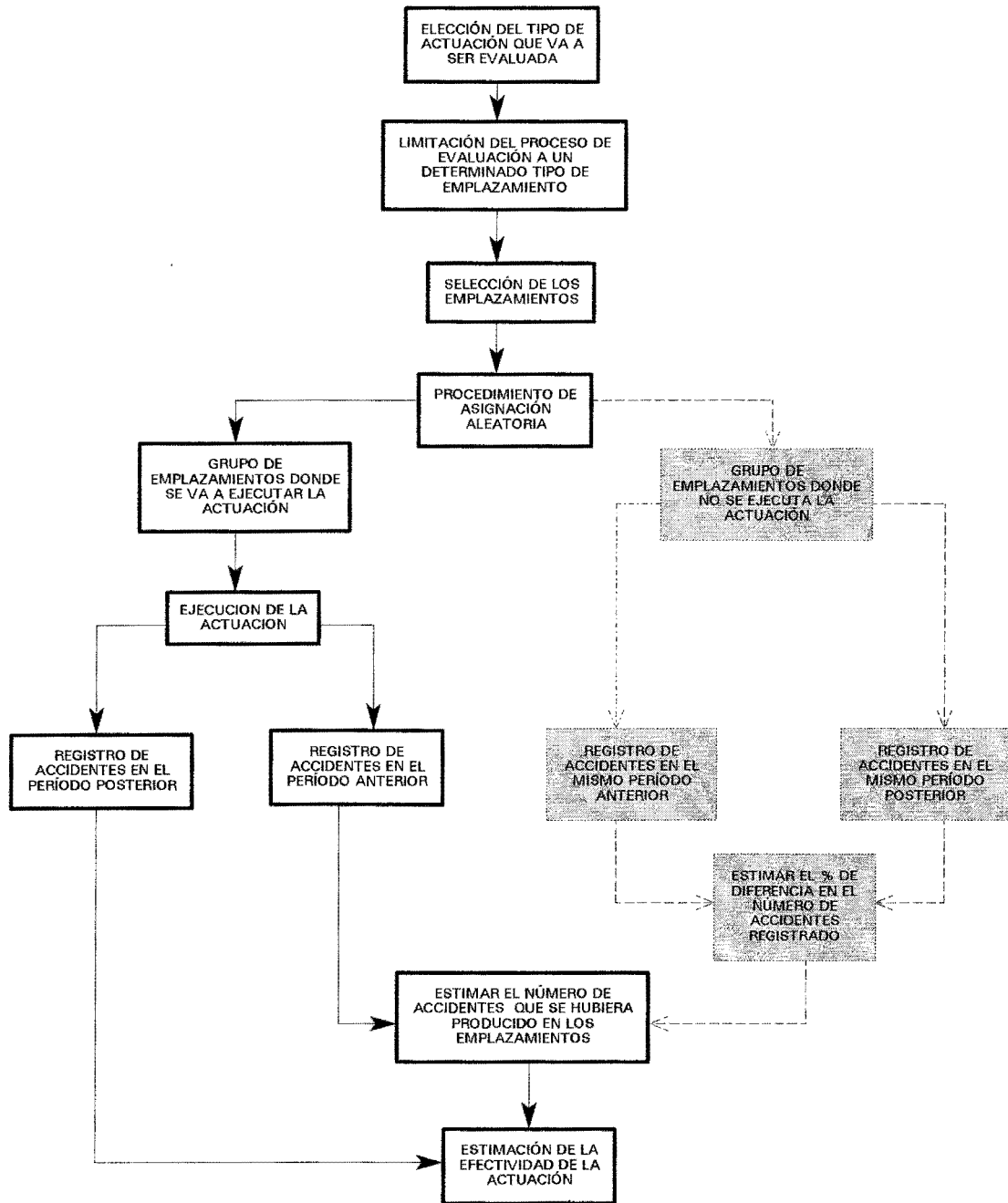


Figura 4.2. Evaluación de la efectividad mediante emplazamientos de control.

4.4.- EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS ACTUACIONES POR MEDIO DE LA ESTIMACIÓN DEL NÚMERO ESPERADO DE ACCIDENTES.

4.4.1.- Introducción.

Para evaluar la efectividad de las actuaciones se ha visto con anterioridad que se pueden utilizar tanto los estudios *antes y después convencionales* como el *diseño experimental mediante emplazamientos de control*. Los estudios *antes y después convencionales* dan como resultado estimaciones sesgadas debido fundamentalmente a los fenómenos de *regresión hacia la media* y la *tendencia en el tiempo*. Por otra parte, el *diseño experimental* elimina, teóricamente, estos problemas mediante el uso de *emplazamientos de control*, pero ya se ha visto que, debido a la dificultad que presenta su realización práctica, es muy difícil de llevar a cabo. Es por ello que han surgido diversos *métodos alternativos* basados en la estimación del *número esperado de accidentes a largo plazo* producido en el emplazamiento objeto de estudio.

Para estimar el *número esperado de accidentes* se dispone de dos planteamientos alternativos (Wright et al, 1987):

- a) *No se hacen hipótesis sobre la distribución del número esperado de accidentes entre los emplazamientos de un mismo tipo y categoría.*
- b) *Se asume una forma particular de distribución del número esperado de accidentes entre los emplazamientos pertenecientes a una población con las mismas características.*

Ambos planteamientos están orientados a ofrecer una estimación del *número esperado de accidentes* que hubieran ocurrido en un emplazamiento identificado para llevar

a cabo en él un determinado tipo de actuación, en el caso de que dicha actuación no se hubiera efectuado. En otras palabras, se trata de una estimación acerca de lo que hubiera acontecido en el emplazamiento en cuestión si la actuación no se hubiera ejecutado. Esta estimación se compara con el *número de accidentes registrados* en dicho emplazamiento después de la actuación, para así obtener una estimación insesgada de la efectividad de la misma (Nicholson, 1988).

Mountain, Fawaz y Sineng (1991 y 1992) cuantificaron el *efecto* que produce una actuación, comparando el *número esperado de accidentes a largo plazo* con el *número de accidentes registrados* en el período posterior a la misma, mediante la siguiente expresión:

$$e = \frac{N_D}{m} \quad (4.11)$$

donde:

- e = Efecto de las actuación.
- N_D = Número de accidentes registrados en el período posterior a la ejecución de la actuación.
- m = Número esperado de accidentes en el emplazamiento.

Tal y como puede observarse en la ecuación anterior, cuando la actuación no hubiera tenido efecto sobre los accidentes resulta que $e = 1$; si, por el contrario, la actuación ha reducido los accidentes, entonces $e < 1$; y, por último, si la actuación ha incrementado los accidentes: $e > 1$ (Danielsson, 1986). Por lo tanto, la *efectividad* de una actuación se puede expresar mediante el porcentaje siguiente:

$$E(\%) = \frac{N_D - m}{m} \cdot 100 \quad (4.12)$$

Esta expresión debe ser utilizada en estudios *antes y después* en lugar de la fórmula 4.1 vista anteriormente; en ella se ha sustituido el *número de accidentes registrados* en el período anterior (N_A) por el *número esperado de accidentes a largo plazo* (m). La gran dificultad de poder utilizar esta expresión radica en que m no puede ser observado directamente, sino que tiene que ser estimado.

Este nuevo planteamiento de la evaluación de la efectividad puede ir acompañado de un *contraste de significación* para comprobar que la diferencia entre el *número esperado de accidentes a largo plazo* y el *número de accidentes registrados* después de la actuación es *significativa*.

En la figura 4.3 se muestra un esquema del proceso general de evaluación de la efectividad empleando el *número esperado de accidentes a largo plazo*. Esta evaluación se puede llevar a cabo a través de los procedimientos que a continuación se describen.

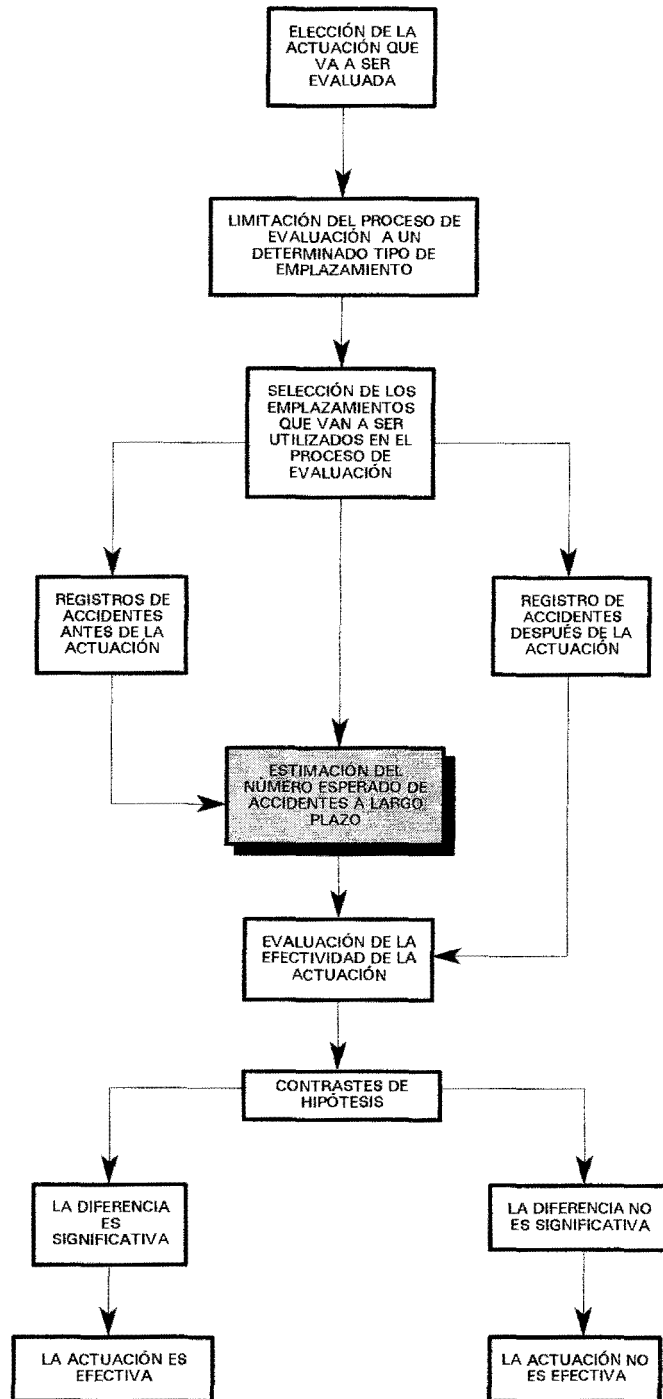


Figura 4.3. Evaluación de la efectividad empleando el número esperado de accidentes.

4.4.2.- Método no-paramétrico.

Corresponde al planteamiento que no necesita hacer ninguna hipótesis sobre la distribución del número esperado de accidentes entre los emplazamientos de la misma categoría.

Está basado en el supuesto de que la distribución del número de accidentes registrados en un emplazamiento obedece la *ley de probabilidad de Poisson*.

Fue utilizado por Hauer y Persaud et al (1982) con la finalidad de eliminar el sesgo inherente en los estudios *antes y después*. Como se verá más adelante, ellos emplearon un análisis *no paramétrico* para estimar el *número esperado de accidentes* que, en el futuro, se producirá en un conjunto de emplazamientos de las mismas características a lo largo de un año. El método fue desarrollado de la siguiente manera.

Al registrar el número de accidentes en n emplazamientos durante dos períodos de tiempo consecutivos de igual duración, son seleccionados para tratamiento aquéllos que tuvieron z o *más accidentes* en el primer período de tiempo. Denominando $N_A(z)$ y $N_D(z)$ al número total de accidentes esperados en el período anterior y posterior a la actuación en el conjunto de emplazamientos seleccionados. Si m_i es el *número esperado de accidentes* en el emplazamiento, siendo $i = 1, 2, 3, \dots, n$, durante los períodos de tiempo anterior y posterior y p_{ij} es la probabilidad de que el emplazamiento i tenga j accidentes, entonces (Hauer, 1980a; Hauer, 1980b; Hauer y Persaud, 1982):

$$N_A(z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=z}^{\infty} j \cdot p_{ij} \quad (4.13)$$

mientras que:

$$N_D(z) = \sum_{i=1}^n m_i \sum_{j=z}^{\infty} p_{ij} \quad (4.14)$$

Como se mencionó anteriormente, se asume que en un emplazamiento i , la ocurrencia de accidentes obedece la ley de distribución de *Poisson* y por lo tanto se cumple la siguiente expresión:

$$j \cdot p_{ij} = m_i \cdot p_{ij-1} \quad (4.15)$$

Sustituyendo la ecuación 4.15 en la 4.13 se obtiene la siguiente expresión:

$$N_A(z) = \sum_{i=1}^n m_i \sum_{j=z-1}^{\infty} p_{ij} \quad (4.16)$$

Comparando, a continuación, las ecuaciones 4.16 y 4.14 se obtiene la siguiente regla de estimación para el *número esperado de accidentes* en aquellos emplazamientos que tuvieron z o más accidentes durante el período anterior a la actuación:

$$N_D(z) = N_A(z + 1) \quad (4.17)$$

Esta ecuación puede también ser expresada en términos de diferencia como sigue:

$$N_D(z) - N_D(z + 1) = N_A(z + 1) - N_A(z + 2) \quad (4.18)$$

La parte izquierda de la igualdad anterior corresponde a la diferencia entre los *valores esperados* en el período posterior en aquéllos emplazamientos que tuvieron z o *más accidentes* y los que tuvieron $(z + 1)$ *accidentes* durante el período anterior a la actuación; es decir, el *número esperado de accidentes* en el período posterior en los emplazamientos que, en el período anterior, registraron z accidentes. La parte derecha es el *número de accidentes registrados* durante el período anterior en los emplazamientos con $(z + 1)$ accidentes. De manera que se puede obtener la siguiente regla de estimación:

$$N_d(z) = N_a(z + 1) \quad (4.19)$$

donde:

$$\begin{aligned} N_d(z) &= N_D(z) - N_D(z + 1) \\ N_a(z + 1) &= N_A(z + 1) - N_A(z + 2) \end{aligned}$$

lo cual conduce a enunciar la siguiente regla de estimación que se refleja en la figura 4.4, (Hauer et al, 1982):

"...la estimación del número esperado de accidentes que se produce en el período posterior en los emplazamientos que durante el período anterior registraron z accidentes es igual al número de accidentes que se producen en los emplazamientos que registraron $(z + 1)$ accidentes en el período anterior."

Por otra parte, si $n(z + 1)$ es el número de emplazamientos que tuvieron $(z + 1)$ accidentes en el primer período de tiempo, entonces $N_a(z + 1)$ se puede estimar como $(z + 1) \cdot n(z + 1)$ y la ecuación 4.19 que expresa el *número esperado total* después de la actuación se convierte en:

$$N_d(z) = (z + 1) \cdot n(z + 1) \quad (4.20)$$

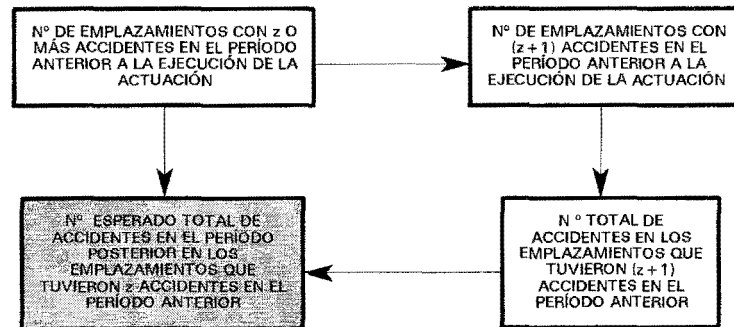


Figura 4.4. Regla de estimación del método no-paramétrico.

Dividiendo la expresión anterior entre el número de emplazamientos con z accidentes en el conjunto de emplazamientos similares, se obtiene una estimación del *número esperado de accidentes* (\hat{m}) en cada uno de los mismos:

$$\hat{m} = \frac{(z + 1) \cdot n(z + 1)}{n(z)} \quad (4.21)$$

La expresión anterior se puede enunciar de la siguiente manera (Hauer et al, 1982), (fig. 4.5):

"...la estimación del número esperado de accidentes que se producen en el período posterior en un emplazamiento que durante el período anterior registró z accidentes es igual al número de accidentes que ocurrieron durante el período anterior en los emplazamientos que tuvieron $(z + 1)$, dividido entre el número de emplazamientos en los cuáles ocurrieron z accidentes durante el período anterior."

Hauer y Persaud (1982) comprobaron estas reglas en 20.762 secciones de carretera de Ontario (Canadá) y evaluaron el fenómeno de *regresión hacia la media*. Lo cual da una idea del gran número de emplazamientos de una misma categoría que se necesitan para lograr estimaciones fiables del *número esperado de accidentes* mediante el método *no-paramétrico*; circunstancia que, en la práctica, dificulta la aplicación de este procedimiento. Hauer (1986) también obtuvo la ecuación 4.21 a partir del *estimador T*, propuesto por Robbins (1956), demostrando que cuando $n(z)$ es lo suficientemente grande, \hat{m} es una mejor estimación del *número esperado de accidentes* que N_A . En el mismo artículo este autor recomienda completar el análisis aproximando las estimaciones a través de un procedimiento de ajuste de curvas para suavizar las eventuales desviaciones del estimador de Robbins (Hauer y Lovell, 1986; Hauer, Lovell y Persaud, 1986).

Una vez que se ha estimado el *número esperado de accidentes* en un emplazamiento donde se halla llevado a cabo una actuación de mejora de la seguridad en la circulación, para evaluar la efectividad de dicha actuación hay que comparar el valor de éste con el del número de accidentes registrados después de la actuación.

El esquema metodológico del método *no-paramétrico* se muestra en la siguiente figura.

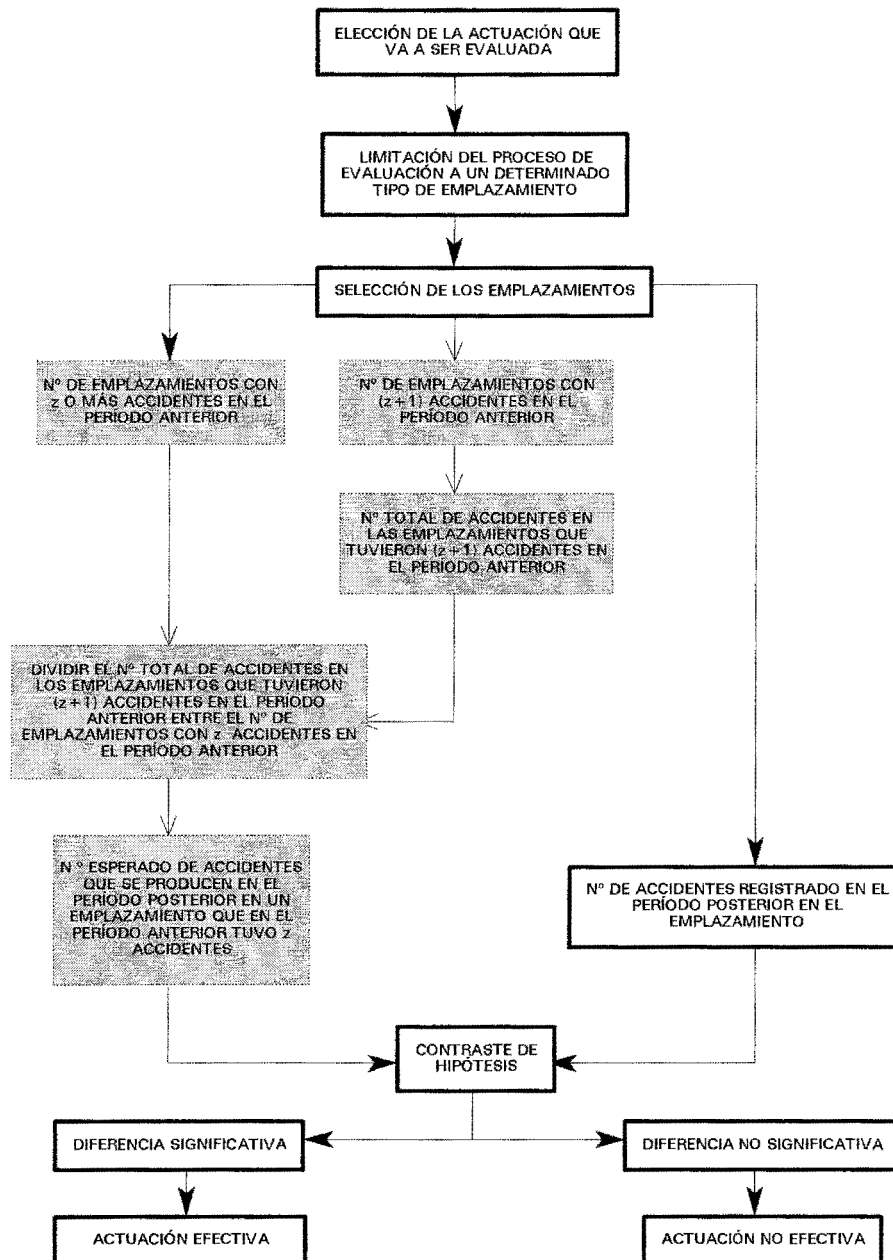


Figura 4.5. Método no-paramétrico.

4.4.3.- Método Bayesiano.

Este método se diferencia del *no-paramétrico* en que considera el *número esperado de accidentes a largo plazo* como una variable aleatoria con una distribución de probabilidad *a priori* en una población de emplazamientos de las mismas características. Al igual que en el procedimiento anterior, aquí se asume que se conoce la distribución de probabilidad del *número de accidentes registrados* en un emplazamiento en particular para cualquier valor del *número esperado de accidentes*. Una vez que se ha registrado el número de accidentes en un emplazamiento, la aplicación del *teorema de Bayes* permite transformar la distribución *a priori* del *número esperado de accidentes* en una distribución *a posteriori*. Si se vuelven a realizar nuevos registros de accidentes, aplicando de nuevo el teorema, esta distribución *a posteriori* se puede modificar nuevamente. La última de las distribuciones *a posteriori* se toma como base para la predicción del *número esperado de accidentes* en un emplazamiento (Abbess, Jarrett y Wright, 1981; Hauer, 1983a).

Por consiguiente, para poder aplicar el *método bayesiano* al campo de la evaluación de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación, es necesario realizar dos hipótesis. Una sobre qué tipo de distribución *a priori* sigue el *número esperado de accidentes* en un conjunto de emplazamientos de la misma categoría, y otra acerca de cuál va a ser la ley de distribución del *número de accidentes registrados* en un emplazamiento. Abbess, Jarrett y Wright (1981) en su conocido artículo fueron los primeros en plantear estas hipótesis con la intención de utilizarlas en el análisis de las contramedidas de accidentes ejecutadas en los *puntos negros* de Hertfordshire (Inglaterra). En concreto estos autores plantearon el problema de la siguiente manera:

- "...El número esperado medio m , es distinto para cada emplazamiento, y su valor para uno en particular es desconocido; este valor se considera como una variable aleatoria. La distribución *a priori* de m está descrita por una función de densidad $g(m)$. Es matemáticamente conveniente que esta función de densidad sea del tipo Gamma, con parámetros c y k que responde a la siguiente ecuación":

$$g(m) = \frac{c^k m^{k-1} e^{-cm}}{\Gamma(k)} \quad m, c, k > 0 \quad (4.22)$$

donde:

c, k = Parámetros de la función de densidad Gamma.
 $\Gamma(k)$ = Función Gamma.

- "...En un emplazamiento en particular, en ausencia de cualquier actuación, el registro de accidentes se produce obedeciendo a la ley de distribución de Poisson, con un número esperado de accidentes m , constante. Es decir, si N es el número de accidentes que se registra en un emplazamiento en un año en particular, N tiene una distribución de Poisson $f(N \setminus m)$, con un número medio de accidentes esperados m , tal que":

$$f(N \setminus m) = \frac{e^{-m} m^N}{N!} \quad N = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4.23)$$

La distribución *a priori* $g(m)$ representa el *grado de creencia* que tiene el investigador sobre los valores de m antes de que éste disponga de datos de accidentes. Por otra parte, tal y como se dijo con anterioridad, mediante la aplicación del *teorema de Bayes*, se puede utilizar el *número de accidentes registrados* en un emplazamiento para transformar la función *a priori* en una *a posteriori*. En este sentido, como es sabido, en la práctica el *teorema de Bayes* se puede expresar de la manera siguiente (Peña, 1992a):

$$f(m \setminus N) = l(m \setminus N) \cdot g(m) \quad (4.24)$$

donde $l(m \setminus N)$ es la *función de verosimilitud* que, en el caso de una variable aleatoria de *Poisson*, se puede expresar de la manera siguiente (Peña, 1992a):

$$l(m \setminus N) = \prod_{s=1}^t \frac{e^{-m} m^{N_s}}{N_s!} \quad (4.25)$$

Por lo tanto, si $g(m)$ representa a la distribución *a priori* de m y si N_1, N_2, \dots, N_t , son los accidentes registrados en un emplazamiento durante s años, entonces la distribución *a posteriori* de m en el mismo emplazamiento se puede estimar empleando la ecuación 4.24, de tal manera que se cumpla lo siguiente (Raiffa y Schlaifer, 1961):

$$f(m \setminus N) = Q \cdot m^{\sum N_i + (k-1)} e^{-m(s+c)} \quad (4.26)$$

Esta distribución *a posteriori* expresa la credibilidad relativa de los diferentes valores de m después que se ha efectuado el registro de accidentes en el emplazamiento. Como puede observarse, la distribución *a posteriori* de m es también de tipo *Gamma* y sus parámetros son los siguientes (Berger, 1985):

$$\begin{aligned} k' &= \sum N_i + k \\ c' &= s + c \end{aligned} \quad (4.27)$$

donde:

- $\sum N_i$ = Número de accidentes registrados durante los s años en el emplazamiento objeto de estudio.
- s = Número de años en que se registra el número de accidentes en un emplazamiento.

Como es sabido, el *número medio de accidentes esperados* en un emplazamiento \hat{m} , se puede estimar a partir de los parámetros de la distribución *a posteriori* utilizando la expresión siguiente (Berger, 1985):

$$\hat{m} = \frac{k'}{c'} = \frac{\sum N_i + k}{s + c} \quad (4.28)$$

Por otra parte, si solamente se dispone de un año de registro de accidentes, siendo estos registros iguales a N , se pueden sustituir las ecuaciones 4.22 y 4.23 en la 4.24, para así obtener una distribución *a posteriori* que es también de tipo *Gamma*, pero con parámetros k'' y c'' (Raiffa y Schlaifer, 1961):

$$f(m \setminus N) = \frac{c'' m^{N+k-1} e^{-m(c+1)}}{N! \Gamma(k)} \quad (4.29)$$

donde los parámetros de la función *a posteriori* son iguales a:

$$\begin{aligned} k'' &= k + N \\ c'' &= c + 1 \end{aligned} \quad (4.30)$$

En este caso, asumiendo que el *número esperado de accidentes* permanece constante, se puede hacer una estimación puntual del mismo mediante la media de la distribución *a posteriori*, lo cual se puede expresar de la manera siguiente (Abbess, Jarrett y Wright, 1981 y 1983; Abbess, 1984; Hauer, Jerry y Lovell, 1988):

$$\hat{m} = \frac{k''}{c''} = \frac{k + N}{c + 1} \quad (4.31)$$

La distribución *a posteriori* es también del tipo *Gamma* debido a que la distribución *a priori* es *conjugada natural* de la *función de verosimilitud*, teniendo como ventaja práctica el hecho de que los parámetros de las distribuciones *a priori* y *a posteriori*, están relacionados y se trabaja dentro de una misma familia (Raiffa y Schlaifer, 1961; Berger, 1985).

Por otra lado, en el caso de que el objeto sea estimar el *número total de accidentes esperados* (m_T) para un grupo de emplazamientos de las mismas características, se procederá a sumar las *variables aleatorias independientes* m_1, m_2, \dots, m_n de la siguiente manera:

$$m_T = \sum_{i=1}^n m_i \quad (4.32)$$

donde:

- m_i = Número esperado de accidentes en el emplazamiento i .
- n = Número de emplazamientos pertenecientes a la misma categoría.

Como es sabido, la sumatoria de n funciones de densidad *Gamma*, cada una de las cuales tiene como parámetros *a posteriori* k_i'' y c'' , es también una función de densidad *Gamma* (Raiffa y Schlaifer, 1961; Berger, 1985). Por lo tanto, m_T tiene una función de densidad *Gamma* $f(m_T)$ con parámetros $\Sigma k_i''$ y c'' , de tal modo que (Raiffa y Schlaifer, 1961):

$$f(m_T) = c^{\sum k_i''} m_T^{\sum k_i'' - 1} e^{-c'' m_T} \quad (4.33)$$

donde (Raiffa y Schlaifer, 1961):

$$\begin{aligned} \sum k_i'' &= n \cdot k + \sum N \\ c'' &= c + 1 \end{aligned} \quad (4.34)$$

Por lo tanto, el *número total de accidentes esperados* para un grupo de emplazamientos pertenecientes a una misma categoría es igual a:

$$m_T = \frac{\sum_{i=1}^n k_i''}{c''} = \frac{n \cdot k + \sum_{i=1}^n N_i}{c + 1} \quad (4.35)$$

Tal y como se había visto con anterioridad, en el método *bayesiano* exige asumir un determinado tipo de distribución *a priori* del *número esperado de accidentes*. Por otra parte, también se dijo que resultaba matemáticamente conveniente describir dicha distribución *a priori* en términos de una función de densidad *Gamma* $g(m)$. Sin embargo, no basta con asumir un determinado tipo de distribución que se adapte al *número esperado de accidentes*, sino que también hay que elegir de alguna manera los parámetros más adecuados de esta distribución *a priori*.

La elección de los parámetros se puede llevar a cabo de una forma totalmente *subjetiva*, pero también puede basarse en los datos de los accidentes registrados con anterioridad. Cuando esta elección se realiza de forma *subjetiva*, el ingeniero de tráfico tratará de reflejar en ellos toda su experiencia anterior. Este conocimiento profesional le

permitiría seleccionar, entre los muchos posibles, aquéllos parámetros c y k de la distribución *a priori* que él considera más adecuados (Berger, 1985). Para minimizar los sesgos de una decisión personal, cabe recurrir a otra forma también *subjetiva* de elección de los parámetros de la distribución *a priori* que podría estar basada en la consulta a un grupo de expertos en el campo de la seguridad vial (Hauer, 1983a).

En los siguientes apartados se van a estudiar diferentes procedimientos en los que los parámetros de la distribución *a priori* son estimados a partir de los datos de accidentes registrados. Así como, distintos métodos en los que no es necesario estimar el valor de dichos parámetros.

4.4.3.1.- Método empírico bayesiano.

En el *método empírico bayesiano* existe una versión *paramétrica* y otra *no-paramétrica*. La versión *paramétrica* utiliza los datos empíricos para estimar los parámetros de la distribución *a priori*. La versión *no-paramétrica* no hace restricciones acerca de la forma de la distribución *a priori* y utiliza los datos para estimar la *distribución marginal* y, a través de ella, el *número esperado de accidentes* (Berger, 1985; Maritz y Lwin, 1989).

En este apartado se va a exponer en primer lugar el *método empírico bayesiano paramétrico*, para luego explicar la versión *no-paramétrica*.

- **Método empírico bayesiano paramétrico.**

El ingeniero de tráfico que decide hacer la elección de los parámetros c y k basándose en los datos de accidentes puede tener en cuenta que si, en un determinado emplazamiento,

el número de accidentes registrados (N) sigue una distribución de *Poisson* en torno a m , en el conjunto de todos los emplazamientos similares, el número de accidentes registrados seguirá una *distribución predictiva* del tipo siguiente (Abbes et al, 1981; Raiffa y Schlaifer, 1961; Morris, 1983):

$$q(N) = \int_0^{\infty} f(N \setminus m) g(m) dm \quad (4.36)$$

Al sustituir las ecuaciones 4.22 y 4.23 en la ecuación anterior, al resolver la integral se obtiene el siguiente resultado (Raiffa y Schlaifer, 1961; Maher, 1987 y 1991):

$$q(N) = \frac{\Gamma(k + N)}{N! \Gamma(N)} \left(\frac{1}{1 + c} \right)^N \left(\frac{c}{1 + c} \right)^k \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (4.37)$$

Es decir, la probabilidad de que un emplazamiento seleccionado al azar tenga N accidentes está dada por una *distribución binomial negativa* con media y varianza igual a $E\{N\}$ y $Var\{N\}$ respectivamente (Schmittleind y Morrison, 1983):

$$\begin{aligned} E\{N\} &= \frac{k}{c} \\ Var\{N\} &= \frac{k(c + 1)}{c^2} \end{aligned} \quad (4.38)$$

Por lo tanto, a partir de la estimación de los parámetros de la *distribución binomial negativa*, al ajustar el número accidentes registrados en el conjunto de los emplazamientos de características similares, se pueden obtener los parámetros de la distribución *a priori*.

Abbes et al (1981) examinaron la distribución del *número de accidentes registrados* en los *puntos negros* de Hertfordshire (Inglaterra) y concluyeron que la *distribución binomial negativa* daba un ajuste razonable. Ellos también constataron que hay una tendencia hacia la existencia de un gran número de emplazamientos donde no se producían accidentes, lo cual los llevó a ajustar una *distribución binomial negativa truncada*, es decir, una distribución donde quedaban excluidos este tipo de emplazamientos. Sin embargo, Andreassen y Hoque (1986) afirmaron que una gran proporción de las intersecciones en Melbourne (Australia) no tenían accidentes durante el período de un año, y por lo tanto concluyeron que la *distribución binomial negativa truncada* no era la adecuada, ya que el procedimiento de estimación de los parámetros daba como resultado que uno de ellos era negativo.

Por otra parte, la forma más sencilla de estimar los parámetros de la distribución *a priori* es utilizando el *método de los momentos*. En éste, se toma como *estimador* de la varianza de la población, la varianza de la muestra y, como *estimador* de la media de la población, la media muestral. Por lo tanto, a partir del sistema de ecuaciones 4.38 se obtienen las siguientes estimaciones de los parámetros:

$$\hat{k} = \frac{\bar{N}^2}{S^2 - \bar{N}} \quad (4.39)$$

$$\hat{c} = \frac{\bar{N}}{S^2 - \bar{N}}$$

donde:

\bar{N} = Número medio de accidentes registrados en la muestra de emplazamientos de la misma categoría.

S^2 = Varianza de los accidentes registrados en la muestra de emplazamientos de la misma categoría.

Por otra parte, sustituyendo en la ecuación 4.31 las estimaciones de k y c obtenidas mediante las expresiones 4.39, se estima el *número esperado de accidentes* en un emplazamiento a partir de los accidentes registrados en el mismo y de la muestra de los accidentes registrados en los emplazamientos similares al que es objeto de estudio (Hauer, 1986; Hauer y Lovell, 1986; Hauer, Lovell y Persaud, 1986; Persaud, 1986b y 1988):

$$\hat{m} = N + \left[\frac{\bar{N}}{S^2} \right] (\bar{N} - N) \quad (4.40)$$

donde N es el *número de accidentes registrados* en el emplazamiento en el período anterior a la ejecución de la actuación.

La ecuación anterior indica que el *número esperado de accidentes* en un emplazamiento es una función del registro de accidentes en el mismo y de los accidentes registrados en los emplazamientos de la mismas características (Hauer, 1986).

Una vez que se ha estimado el *número esperado de accidentes* en un emplazamiento donde se halla llevado a cabo una actuación de mejora de la seguridad en la circulación, se puede evaluar la efectividad de dicha actuación empleando la ecuación 4.12 vista con anterioridad.

El esquema operativo del *método empírico bayesiano* se muestra en la figura 4.6.

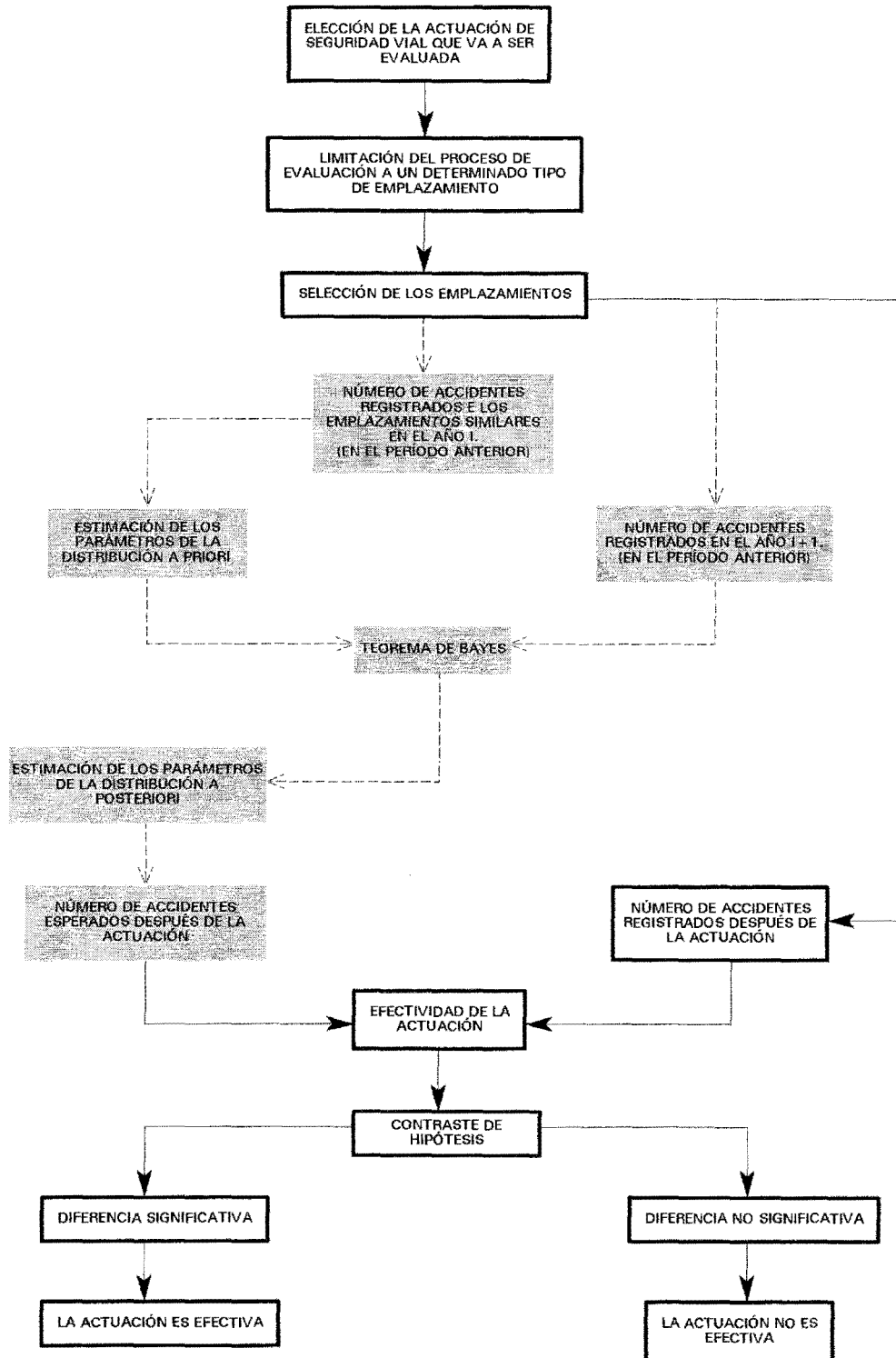


Figura 4.6. Método empírico bayesiano paramétrico.

Por otra parte, ya que N es el valor registrado de una distribución de *Poisson* de media igual a m , Hauer y Persaud (1987) generaron grupos de emplazamientos de características similares y sustituyeron, en la ecuación anterior, las expresiones siguientes basadas en Robbins (1980):

$$E\{m\} = \bar{N} \quad (4.41)$$

$$Var\{m\} = S^2 - \bar{N}$$

y obtuvieron la ecuación siguiente:

$$\hat{m} = N + \left[\frac{E\{m\}}{Var\{m\} + E\{m\}} \right] [E\{m\} - N] \quad (4.42)$$

Esta ecuación también fue expresada por Hauer (1986) de la siguiente manera:

$$\hat{m} = \alpha \cdot E\{m\} + (1 - \alpha) N \quad (4.43)$$

para $0 \leq \alpha \leq 1$, donde:

$$\alpha = \left[1 + \frac{Var\{m\}}{E\{m\}} \right]^{-1} \quad (4.44)$$

Como puede observarse en la ecuación precedente, cuando en la población de emplazamientos con las mismas características los diferentes valores de m son iguales, se cumple que $Var\{m\} = 0$, y por consiguiente $\alpha = 1$; esto significa que el número de

accidentes registrados en el período anterior a la actuación no influiría en la estimación. Sin embargo, si los valores de m son muy diferentes de tal forma que $Var\{m\} \gg E\{m\}$, entonces α será muy pequeño; es decir, el conocimiento de la población de referencia ejercería muy poca influencia sobre la estimación del *número esperado de accidentes* en un emplazamiento (Hauer, 1992). En conclusión, la fiabilidad de la estimación del *número esperado de accidentes* en un emplazamiento depende de la variabilidad de la población de referencia.

Cuando la duración del período de tiempo durante el cual el número de accidentes N ha sido registrado no sea de la misma duración que el utilizado para estimar $E\{m\}$ y $Var\{m\}$, se tiene que (Hauer y Persaud, 1987):

$$\hat{m}_j = \alpha_j \left(\frac{j}{i} \right) E\{m_i\} + (1 - \alpha_j) N_j \quad (4.45)$$

donde:

- i = Período de años utilizados para estimar $E\{m_i\}$ a partir de los datos de accidentes de los emplazamientos pertenecientes a la misma población.
- j = Período de años en el cual se obtuvo el registro de los accidentes N , en el emplazamiento bajo estudio.

Al sustituir $E\{m_i\}$ por \bar{N}_i y $Var\{m_i\}$ por $S_i^2 - \bar{N}_i$, la ecuación anterior se convierte en la siguiente (Hauer y Persaud, 1987):

$$\hat{m}_j = \hat{\alpha}_j \left(\frac{j}{i} \right) \bar{N}_i + (1 - \hat{\alpha}_j) N_j \quad (4.46)$$

donde (Hauer y Persaud, 1987):

$$\hat{\alpha}_j = \left[\mathbf{1} + \frac{\left(\frac{j}{i}\right) (S_i^2 - \bar{N}_i)}{\bar{N}_i} \right]^{-1} \quad (4.47)$$

En la práctica resulta bastante difícil definir una población de emplazamientos cuyas características permitan la utilización de estos procedimientos de una forma conveniente. La población ideal de emplazamientos debería estar formada solamente por aquéllos que son exactamente del mismo tipo que el emplazamiento en el cual se quiere estimar el *número esperado de accidentes*. Además, como puede suponerse, resulta difícil encontrar poblaciones de referencia adecuadas cuando las emplazamientos se describen mediante características físicas diferentes. Cuando la población de emplazamientos es pequeña, \bar{N}_i y S_i^2 darán estimaciones sesgadas que condicionan el uso de este procedimiento (Brüde y Larsson, 1988; Hauer, 1992; Mountain y Fawaz, 1991).

- **Método empírico bayesiano no-paramétrico**

Cabe, por último, exponer la variante *no-paramétrica* del *método empírico bayesiano*. En ésta se parte de que, dado que los accidentes se registran de acuerdo a una distribución de *Poisson* de media anual igual a m , entonces se puede demostrar (Berger, 1985) que la media de la distribución *a posteriori* de m en un emplazamiento en el que se han registrado N accidentes en el año anterior es igual a (Abbes, Jarrett y Wright, 1981):

$$E\{m \mid N\} = \frac{(N + 1) \cdot q(N + 1)}{q(N)} \quad (4.48)$$

donde:

- $E\{m \mid N\}$ = Media de la distribución *a posteriori*.
- $(N + 1)$ = Número de accidentes más uno ocurridos en el emplazamiento durante el año anterior.
- $q(N + 1)$ = Proporción de emplazamientos con $(N + 1)$ accidentes en el año anterior.
- $q(N)$ = Proporción de emplazamientos con N accidentes en el año anterior.

La expresión anterior se cumple para cualquier forma de la distribución *a priori* $g(m)$. Como se había dicho anteriormente $q(N)$ viene dada por la ecuación 4.36 correspondiendo a la *ecuación predictiva* en el conjunto de emplazamientos. Cuando $g(m)$ es del tipo *Gamma*, entonces ésta era una *distribución binomial negativa*.

Como puede observarse esta ecuación es similar a la 4.21 desarrollada por Hauer en el método *no-paramétrico*. Según Abbes et al (1981) el problema principal que presentan, tanto la fórmula anterior como la deducida por Hauer y Persaud (1982), es que los valores verdaderos de $q(N + 1)$ y $q(N)$ no son conocidos con la suficiente exactitud, dado que éstos están fuertemente influenciados por las variaciones aleatorias de los accidentes.

Por último, para concluir, cabe mencionar que Persaud y Hauer (1984) consideran que, en general, el *método empírico bayesiano paramétrico* produce mejores estimaciones del *número esperado de accidentes* que el *no-paramétrico*.

4.4.3.2- Método de la regresión multivariante.

Se basa en las hipótesis expresadas mediante las ecuaciones 4.22 y 4.23; es decir, cuando no se produce una actuación, la ocurrencia de accidentes (N) en un emplazamiento durante un cierto período de tiempo, obedece la ley de probabilidad de *Poisson*. Al mismo tiempo, se cumple también que la distribución de los m - número esperado de accidentes a largo plazo en la población con las mismas características - puede ser descrita en términos de una función de densidad *Gamma*.

En el apartado anterior se utilizaba \bar{N} como un estimador de $E\{m\}$ y la diferencia $(S^2 - \bar{N})$ como un estimador de $Var\{m\}$. Una alternativa a este planteamiento del *método empírico bayesiano* consiste en la utilización de *modelos multivariantes*, mediante los cuales se puede estimar $E\{m\}$ en los diferentes tipos de emplazamientos de características similares pertenecientes a una determinada red de carreteras. Al utilizar estos modelos la ecuación 4.43 se transformaría entonces en la siguiente:

$$\hat{m} = \alpha \cdot Y + (1 - \alpha) N \quad (4.49)$$

donde:

$$\alpha = \left[1 + \frac{Y}{k} \right]^{-1}$$

Y = Número de accidentes predichos por el modelo multivariante.

k = Parámetro de la distribución binomial negativa.

Si se ajusta un *modelo multivariante* a los registros de accidentes, se puede estimar Y como una función de diversas variables independientes o, lo que es lo mismo, el valor de Y dependerá de estas variables a través de una relación que se puede expresar mediante una

ecuación. Esta ecuación es un modelo en el que las variables independientes son las características físicas o geométricas de los emplazamientos (Hauer, 1992). Por consiguiente, para la población de referencia al que pertenece el emplazamiento cuyo registro de accidentes se utiliza como dato, el valor de Y se puede predecir utilizando el *modelo multivariante*.

Por lo tanto, si la estimación del *número esperado de accidentes* en un emplazamiento viene dada por la ecuación 4.49, se debe estimar, en primer lugar, el valor de Y a través del modelo multivariante (siempre que se disponga de éste o, en su caso, ajustarlo directamente a partir de los datos disponibles) y, en segundo lugar, estimar α .

Para estimar α , además de Y , es necesario conocer también el valor de k . Cuando se disponga de un gran número de emplazamientos con las mismas características, k se puede estimar sabiendo que la varianza del *número de accidentes registrados* en un conjunto de emplazamientos se obtiene a través de los *residuos* del *modelo multivariante* mediante la ecuación siguiente (Mountain y Fawaz, 1991; Mountain, Fawaz y Sineng, 1991 y 1992; Brüde y Larsson, 1988; Hauer y Persaud, 1987; Hauer, Jerry y Lovell, 1988; Hauer, 1992):

$$\text{Var}\{N\} = \frac{Y^2}{k} + Y \quad (4.50)$$

Donde cada *residuo* al cuadrado se puede considerar como una estimación de $\text{Var}\{N\}$, siendo cada uno de ellos igual a la diferencia entre el valor registrado (N) que se utiliza para ajustar el modelo y el valor (Y) predicho por el modelo.

Según Hauer (1992) k es una función de las *variables independientes* que se utilizan en los *modelos multivariantes* y de la exactitud con que se conocen las mismas. Por lo tanto, aquellas poblaciones de referencia que difieran notablemente en las características físicas que se utilizan como variables independientes de los *modelos multivariantes*, tendrán diferentes valores de k .

Por otro lado, Brüde y Larsson (1988) expresaron la ecuación 4.49 de la siguiente manera:

$$\hat{m} = N + \alpha (Y - N) \quad (4.51)$$

donde:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1}{c}} = \frac{1}{1 + \frac{Y}{k}} = \frac{1}{1 + a \cdot Y}$$

En esta ecuación c y k corresponden a los parámetros de una *distribución binomial negativa* ajustada a los datos de accidentes. Estos autores asumieron arbitrariamente un rango de valores de a comprendido entre 1 y 0,04 que equivalen a un rango de k comprendido entre 1 y 25. A partir de estos valores de a estimaron el *número esperado de accidentes*.

La debilidad fundamental de este procedimiento consiste en que para calibrar un *modelo multivariante* puede que sea necesario disponer de una gran cantidad de datos que permitan realizar este cometido. Por otra parte, la aleatoriedad de los accidentes y los innumerables factores que los afectan no se pueden cuantificar con precisión en el modelo.

Después de haber realizado la estimación del *número esperado de accidentes* en un emplazamiento a través del *método de la regresión multivariante*, para evaluar la efectividad de la actuación, hay que obtener todavía el *número de accidentes registrados* en el período posterior a la actuación y utilizar, a continuación, la fórmula 4.12.

En la figura siguiente se refleja el esquema operativo del *método de la regresión multivariante*.

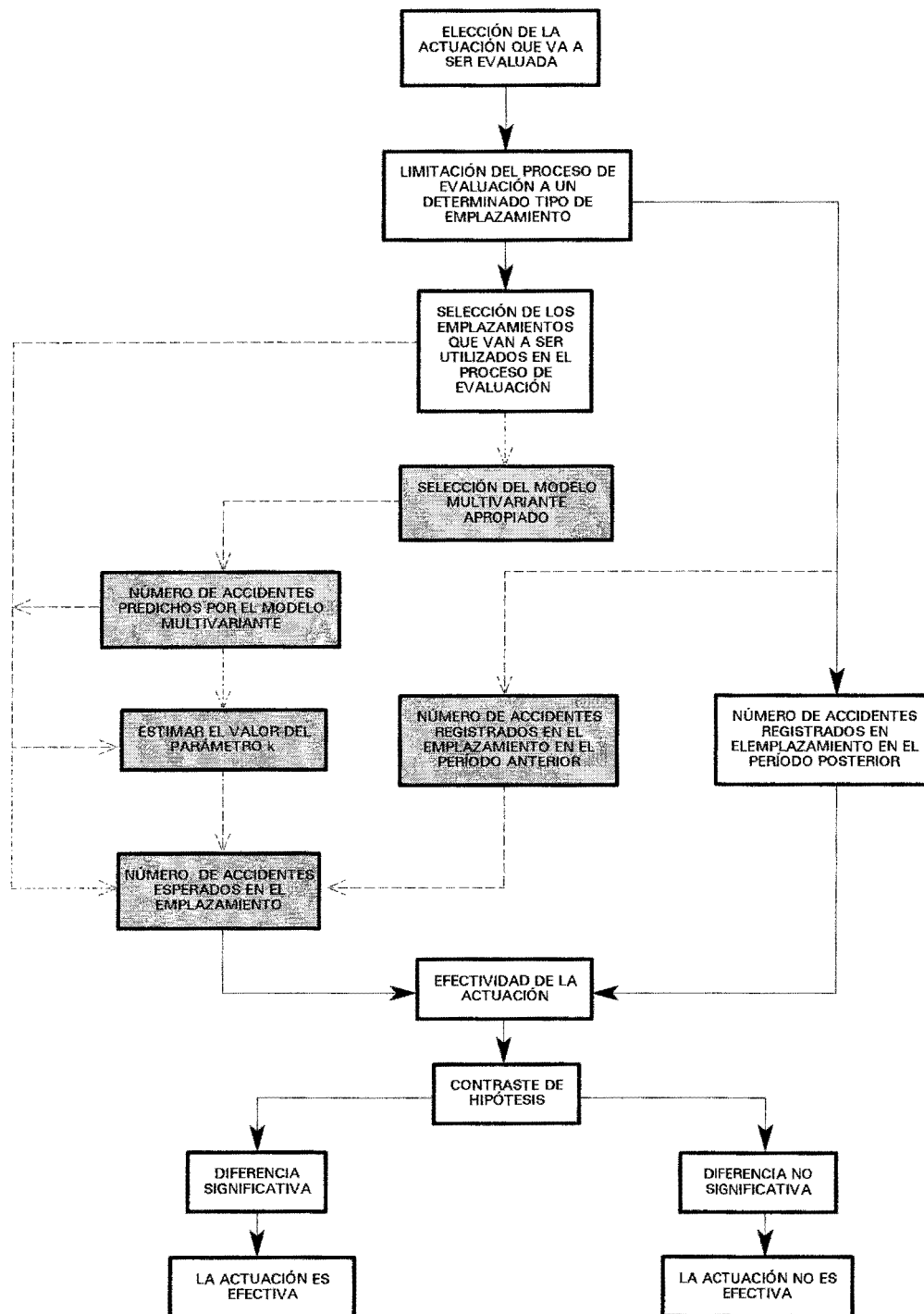


Figura 4.7. Método de la regresión multivariante.

4.4.3.3.- Método de la función de regresión.

Tal y como se ha visto en el apartado 4.4.3, el *número esperado de accidentes* en un emplazamiento (\hat{m}) se puede estimar calculando la media de la distribución *Gamma a posteriori* en dicho emplazamiento (Abbess, Jarrett y Wright, 1981):

$$\hat{m} = \frac{k''}{c''} = \frac{k + N}{c + 1}$$

La ecuación anterior se considera como una *función de regresión*, en la cual el valor estimado del *número esperado de accidentes* (\hat{m}) depende de N . Esta función predice el número de accidentes que ocurrirán en un emplazamiento, en un período futuro de tiempo, asumiendo que el valor \hat{m} permanece invariable. En este sentido, al ser ésta una función lineal, el *número esperado de accidentes* se puede estimar utilizando un modelo de la forma siguiente (Jarrett, Abbess y Wright, 1982 y 1988; Abbess, Jarrett y Wright, 1983):

$$\hat{m} = \frac{k}{c+1} + \frac{1}{c+1} \cdot N = A + B \cdot N \quad (4.52)$$

Jarrett et al (1982) dicen que en la práctica los valores de los *coeficientes A y B* se pueden estimar ajustando una ecuación de regresión al *número de accidentes registrados* en los emplazamientos donde no se han producido actuaciones en dos períodos de tiempo consecutivos. Por consiguiente, los coeficientes se pueden estimar a partir del siguiente modelo (Jarrett, Abbess y Wright, 1988):

$$\begin{aligned} E\{N_D \setminus N_A\} &= A + B \cdot N_A \\ \text{Var}\{N_D \setminus N_A\} &= C \cdot E\{N_D \setminus N_A\} \end{aligned} \quad (4.53)$$

donde:

N_D = Número de accidentes registrados en el segundo período de tiempo.

N_A = Número de accidentes registrados en el primer período de tiempo.

C = Constante conocida como factor de escala.

Los valores de A y B obtenidos de esta forma pueden ser sustituidos en la ecuación 4.52 para estimar el *número esperado de accidentes* (\hat{m}) en un emplazamiento donde se haya producido una actuación y en el que se hayan registrado N accidentes en el período de tiempo anterior a la ejecución de la misma (Mountain y Fawaz, 1991 y 1992; Mountain, Fawaz y Sineng, 1991 y 1992; Jarrett et al, 1988).

Este método se resume en la figura 4.8 de la página siguiente.

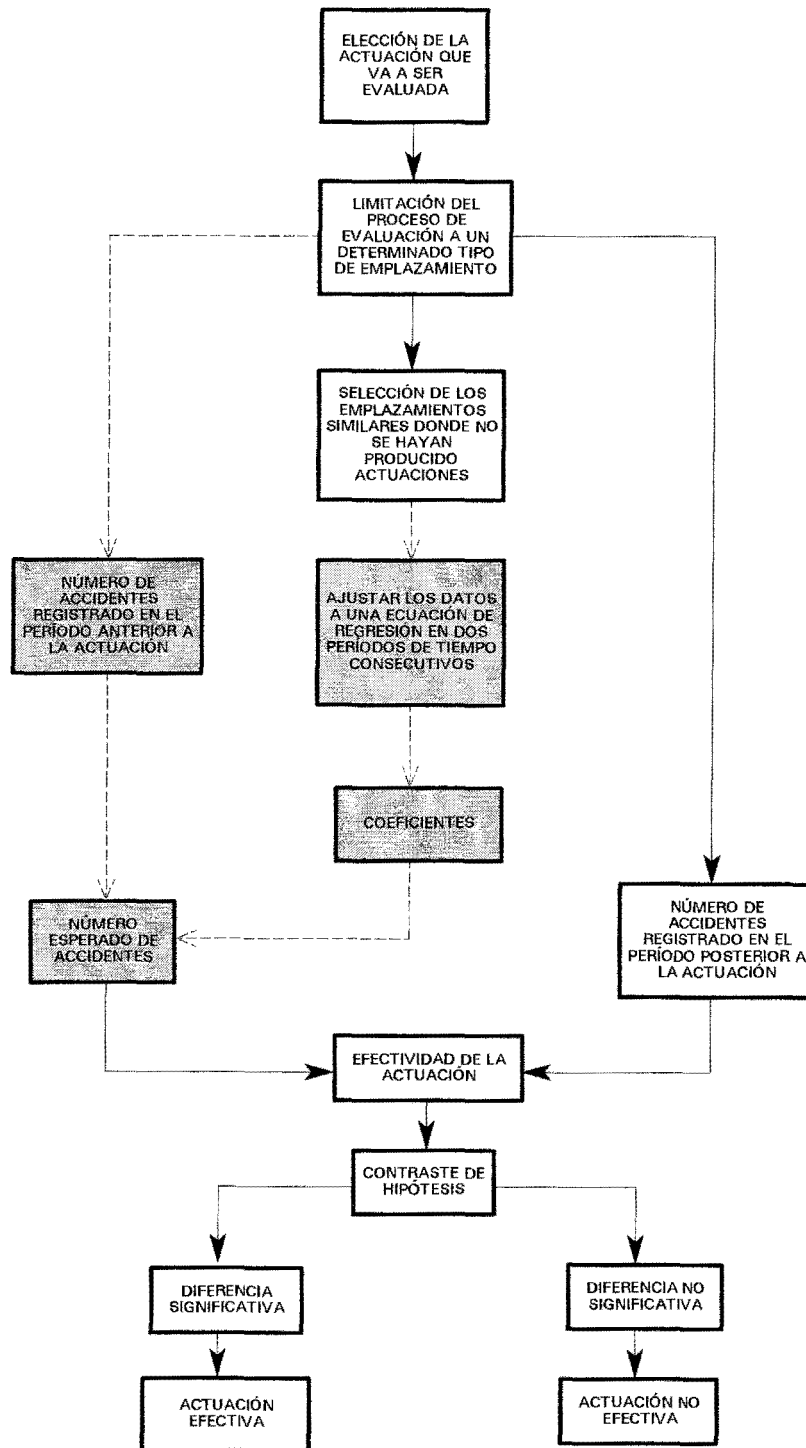


Figura 4.8.- Método de la función de regresión.

4.5.- TÉCNICA DE LOS CONFLICTOS DE TRÁFICO.

Este procedimiento de estimación se basa en la hipótesis de que el *número esperado de accidentes* en un emplazamiento es *proporcional* al *número de conflictos de tráfico* observados en el mismo. Por lo tanto, aquellos emplazamientos con una menor seguridad en la circulación, producirán un gran *número de conflictos de tráfico* durante un período de tiempo determinado, mientras que la ocurrencia de *conflictos de tráfico* será mucho menor en aquéllos que son más seguros (Hauer y Garder, 1986).

El acaecimiento de accidentes en un emplazamiento se produce de forma rara y aleatoria, de tal manera que para estimar el *número esperado de accidentes* se necesita registrar los accidentes durante un período de tiempo considerable; en contraposición, los *conflictos de tráfico* que se originan en un emplazamiento, además de ser observables, se producen con una frecuencia muy superior a la de los accidentes de tráfico.

Por lo tanto, ya que el *número esperado de accidentes* y el *número de conflictos de tráfico* durante un mismo período de tiempo son proporcionales, se puede intentar estimar el primero en función del *número de conflictos de tráfico* observados en el emplazamiento.

El *conflicto de tráfico* fue definido en una investigación realizada por Glauz et al (1985) de la siguiente manera:

"... un suceso de tráfico involucrando dos o más usuarios de la carretera, en el cual uno de los usuarios realiza alguna acción inusual o atípica, tal como un cambio en la dirección o velocidad, que sitúa al otro usuario en riesgo de una colisión al menos que realice una maniobra evasiva"

Aunque esta definición podría considerarse como restrictiva al no contemplar aquellas situaciones en las que se ve implicado un sólo vehículo nada impide que se pueda tomar como referencia de base para el análisis que sigue a continuación.

Según Hauer y Garder (1986) y Glauz et al (1985) el *número de conflictos de tráfico* y el *número esperado de accidentes* en un emplazamiento se deben relacionar mediante la siguiente expresión:

$$m = t \cdot r \quad (4.54)$$

donde:

- m = Número esperado de accidentes en un emplazamiento durante cierto período de tiempo.
- t = Número de conflictos ocurriendo en un emplazamiento en ese mismo período.
- r = Ratio entre los accidentes y conflictos observados en el emplazamiento.

La estimación del *número de conflictos* (t) que se producen en un emplazamiento durante el período de tiempo requerido para estimar el *número esperado de accidentes*, se obtiene en función del *número de conflictos de tráfico observados en el campo* (N_c) durante un período de tiempo que habitualmente suele ser mucho menor. En un período de un año, dicha estimación es igual a:

$$\hat{t} = \frac{365}{d} \cdot N_c \quad (4.55)$$

donde:

- d = Número de días en que se registran los conflictos de tráfico.
- N_c = Número de conflictos de tráfico registrados.

Para estimar el *ratio* (r) entre los accidentes y los conflictos de tráfico se debe investigar la relación entre el *número de accidentes registrados* y el *número de conflictos* en una gran cantidad de emplazamientos similares al que sea objeto de estudio. Una vez que se haya realizado dicha investigación se debe tomar como *ratio* para el emplazamiento en cuestión el promedio de los *ratios* obtenidos en los emplazamientos similares. Es decir, se debe cumplir la igualdad siguiente:

$$\hat{r} = \bar{r} \quad (4.56)$$

donde:

\bar{r} = Promedio de las relaciones entre el número de accidentes registrados y el número de conflictos en un grupo de emplazamientos similares al que es objeto de estudio.

Para Glauz et al (1985) la exactitud de la *técnica de los conflictos de tráfico* depende de la varianza del *número esperado de accidentes*. Según Glauz (1985) cuanto menor sea la varianza, mejor será la calidad de la estimación. Hauer y Garder (1986) estimaron dicha varianza mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} Var\{\hat{m}\} = & t^2 Var\{r\} + r^2 Var\{\hat{t}\} + (\bar{r} + E\{r\})^2 (Var\{\hat{t}\} + t^2) + \\ & + Var\{r\} Var\{\hat{t}\} \end{aligned} \quad (4.57)$$

Este último autor comprobó que la varianza del *número esperado de accidentes* dependía principalmente de $Var\{r\}$, es decir de la varianza del *ratio* entre el número de accidentes y los conflictos de tráfico. Por lo tanto, cuando todos los emplazamientos

similares al que es objeto de estudio tengan un *ratio* muy parecido, la exactitud de la estimación del *número esperado de accidentes* se puede considerar buena.

Una vez estimados los valores de *r* y *t*, éstos deben ser sustituidos en la fórmula 4.54 para estimar el valor del *número esperado de accidentes* en el emplazamiento.

A diferencia de otros procedimientos, para evaluar la efectividad a través de este método hay que estimar el *número esperado de accidentes* en los períodos anterior y posterior a la ejecución de la actuación y establecer luego la comparación.

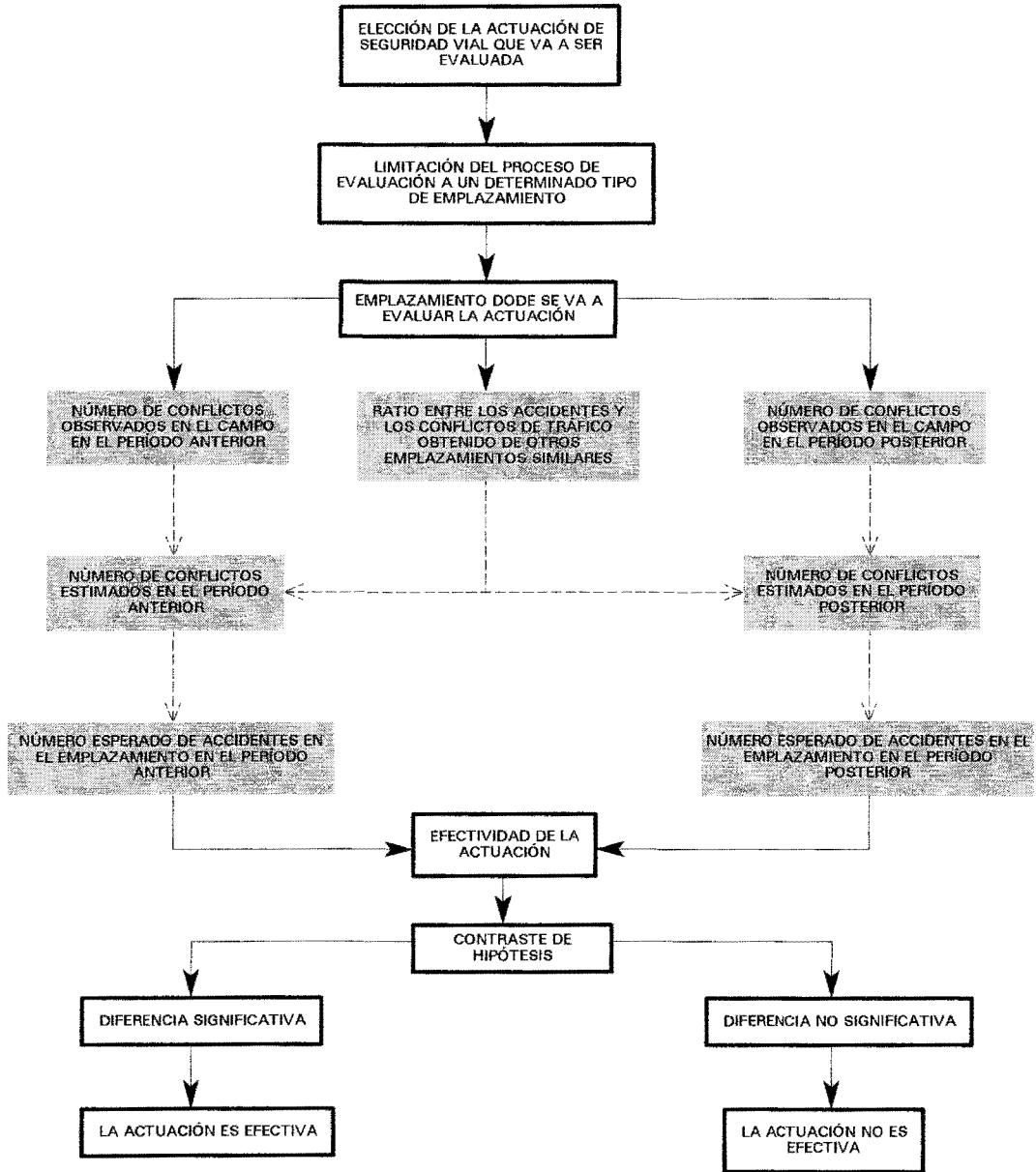


Figura 4.9. Técnica de los conflictos de tráfico.

CAPÍTULO 5

LA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD MEDIANTE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD Y DE PELIGROSIDAD A LARGO PLAZO.

5.1.- INTRODUCCIÓN.

En el capítulo precedente se expusieron *métodos estadísticos clásicos* que permitían evaluar la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación comparando el *número de accidentes registrados* en los períodos posterior y anterior a las mismas. A continuación se describieron diversos *métodos alternativos (no-paramétrico, bayesiano)* en los que se comparaba el *número esperado de accidentes a largo plazo* con el *número de accidentes registrados* después de las actuaciones de mejora, cerrando el tema con una explicación de la técnica basada en los *conflictos de tráfico*.

Este capítulo aborda de nuevo el *análisis clásico* y el *análisis bayesiano* en los *estudios antes y después*. Sin embargo en esta ocasión, ambos *análisis* deberán ser adaptados para utilizar en la evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación los *índices de peligrosidad y de peligrosidad a largo plazo* en lugar del *número de accidentes registrados* y del *número esperado de accidentes*.

Este planteamiento tiene la ventaja de que al tener en cuenta el *volumen de tráfico* de un emplazamiento se tiende a eliminar las fluctuaciones producidas en el *número registrado y esperado de accidentes* en dicho emplazamiento que derivan de las fuertes variaciones del tráfico en años sucesivos. Al proceder de esta manera se consigue una mejora en el método de evaluación de la efectividad de las actuaciones.

El procedimiento de evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación se analizará, por una parte, a *nivel individual* (es decir, considerando el caso de una actuación ejecutada en un sólo emplazamiento) y, por otra, la evaluación en el *conjunto de las actuaciones de un mismo tipo ejecutadas en emplazamientos de características similares*.

La evaluación clásica a *nivel individual* se explicará conjuntamente con los *contrastos de significación binomial* y de la *diferencia de medias*. Por otra parte, se verá como estimar *intervalos de confianza* de la *diferencia de las medias de los índices de peligrosidad* a través de los *límites superior e inferior* en los períodos anterior y posterior de una determinada actuación de mejora. También se obtendrán *intervalos de confianza* del *índice de peligrosidad* en cada emplazamiento en ambos períodos.

El *análisis bayesiano a nivel individual* se realizará mediante el *método empírico bayesiano*. Se utilizarán los *índices de peligrosidad a largo plazo* para hacer la evaluación de la efectividad con el fin de eliminar el efecto de *regresión a la media*. El recurso del *método empírico bayesiano* para estimar el *índice de peligrosidad a largo plazo* ha sido utilizado anteriormente en la *identificación de emplazamientos peligrosos* por Higle y Witkowski (1988). Recientemente Pardillo (1995a) también empleó dicho método para la identificación de emplazamientos peligrosos en las redes de carreteras del estado y de las Comunidades Autónomas de Andalucía y Extremadura. Gaver y O'Muircheartaigh (1987) se ha servido de la misma herramienta para estudiar fallos en equipos de aire acondicionado de aviones, centrales nucleares, etc. Sin embargo, hasta el momento no se tiene conocimiento de que este *método empírico bayesiano* haya sido utilizado para evaluar la *efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación*. Pardillo (1995) indica en las conclusiones de su tesis doctoral que uno de los aspectos en que podrían

profundizar futuras investigaciones que complementasen la suya es la evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación en función de sus características.

Por otro lado, tanto en el *análisis clásico* como en el *bayesiano*, la evaluación para el *conjunto de las actuaciones de un mismo tipo ejecutadas en emplazamientos de características similares* se hará uso del contraste de la *t de Student*. Para poder utilizar este contraste será de ayuda el *teorema central del límite*. Como se verá más adelante dicho teorema permite sumar los efectos individuales de cada una de las actuaciones cuando se considera que cada efecto individual por separado es de poca importancia respecto al efecto del conjunto.

También se expondrá como abordar el efecto de la *tendencia temporal* en la accidentalidad cuando se realice la evaluación de la efectividad en el conjunto de emplazamientos. Para ello se tomará en consideración un *factor de ponderación* que tenga en cuenta dicha *tendencia temporal* en una red de carreteras a lo largo de un período de tiempo más o menos dilatado.

5.2. ANÁLISIS CLÁSICO.

5.2.1.- Evaluación de la efectividad a nivel individual.

Para evaluar la efectividad de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación ejecutada en un único emplazamiento se hará uso del diseño *antes y después convencional* expuesto en el capítulo precedente, con la salvedad de que ahora se registra y compara el *índice de peligrosidad* durante dos intervalos de tiempo de la misma duración,

uno anterior y otro posterior a la ejecución de la actuación objeto de estudio. Si el *índice de peligrosidad* en el período posterior a la ejecución de la actuación disminuye, se dice que la actuación ha sido efectiva como *medida correctora* que mejora la seguridad. Por lo tanto, según este diseño la efectividad de una actuación ejecutada en un emplazamiento, se puede expresar en porcentaje de la manera siguiente:

$$E(\%) = \frac{I_{Ai} - I_{Di}}{I_{Ai}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

donde:

E = Efectividad de la actuación.

I_{Di} = Índice de peligrosidad en el emplazamiento i después de la actuación. Si éste es puntual se expresa en accidentes/ 10^6 veh. y, si es una sección, en accidentes/ 10^6 veh.- km.

I_{Ai} = Índice de peligrosidad en el emplazamiento i antes de la actuación. Si éste es puntual se expresa en accidentes/ 10^6 veh. y, si es una sección, en accidentes/ 10^6 veh.- km.

Una vez evaluada la efectividad de la actuación se puede confirmar la *significación* del cambio registrado en el *índice de peligrosidad* utilizando los contrastes correspondientes a dos procesos de *Poisson*, por ejemplo, el contraste *binomial* y el de la *diferencia de medias*. También se puede contrastar la *significación* del cambio producido en la accidentalidad utilizando para ello *intervalos de confianza* relativos a la *diferencia de las medias de los índices de peligrosidad*. En ambos casos se debe asumir la hipótesis de que en tanto no se modifiquen las características intrínsecas de un emplazamiento, la ocurrencia de accidentes en el mismo se produce de acuerdo a una distribución de *Poisson*. Como ya se sabe, esta hipótesis es utilizada en numerosos estudios de seguridad vial y está

basada en la evidencia de que los accidentes de tráfico en un emplazamiento son sucesos raros y aleatorios.

Hechas estas consideraciones precede abordar a continuación la descripción de la aplicación de los contrastes de significación *binomial* y de *la diferencia de medias* al objeto de estudio de esta tesis, para acabar explicando la operatoria de la estimación de *intervalos de confianza de la diferencia de medias*.

5.2.1.1.- Contrastes de significación basados en la distribución de *Poisson*.

Teniendo en cuenta que el *número de accidentes* registrados en un sólo emplazamiento antes y después de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación (N_A y N_D) viene determinado por los valores de dos variables aleatorias independientes correspondientes a dos *distribuciones de Poisson*, las probabilidades de ocurrencia en los períodos anterior y posterior a la actuación vienen dadas por las siguientes ecuaciones (Cox, 1954):

$$\begin{aligned} \text{Prob}(N_A) &= \frac{\nu_A^{N_A} \cdot e^{-\nu_A}}{N_A!} \\ \text{Prob}(N_D) &= \frac{\nu_D^{N_D} \cdot e^{-\nu_D}}{N_D!} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Al mismo tiempo, dichas distribuciones están caracterizadas por los parámetros η_A y η_D , correspondientes a las medias de los *índices de peligrosidad* en dicho emplazamiento antes y después de la actuación (N_A y N_D son estadísticos suficientes de η_A y η_D). Por otro lado, para comparar estos parámetros se puede recurrir a las medias de las variables

independientes de ambas distribuciones de *Poisson* cuya relación viene expresada por (Cox y Lewis, 1966):

$$\begin{aligned} \nu_A &= \eta_A \cdot E_A \\ \nu_D &= \eta_D \cdot E_D \end{aligned} \quad (5.3)$$

donde E_A y E_D son en este caso los valores de la exposición al riesgo.

Para evaluar la efectividad, a *nivel individual*, de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación se puede hacer uso de la comparación de estos dos distribuciones de *Poisson* y, a través de ellas, contrastar los *índices de peligrosidad* en el emplazamiento para los períodos anterior y posterior a la actuación. A continuación se exponen dos procedimientos que pueden ser utilizados para realizar dicho contraste.

- **Contraste de la distribución binomial.**

Como es sabido, la probabilidad conjunta de las dos distribuciones de *Poisson* es la siguiente:

$$\text{Prob}(N_A, N_D) = \frac{\nu_A^{N_A} \cdot e^{-\nu_A}}{N_A!} \cdot \frac{\nu_D^{N_D} \cdot e^{-\nu_D}}{N_D!} \quad (5.4)$$

Para comparar estos dos procesos de *Poisson* se puede utilizar el parámetro $\rho = \nu_D / \nu_A$ como el parámetro de interés, ya que como E_A y E_D tienen valores conocidos, hacer cualquier inferencia sobre ρ equivale a realizarla sobre η_D / η_A . Además, cuando dicho parámetro tiene un valor conocido, $N_A + N_D$ es un estadístico suficiente de ν_A , lo

cual permite hacer la inferencia de ρ basándose en que, dado el valor $N_A + N_D$, la probabilidad de N_D para dicha condición es igual a la siguiente expresión (Cox y Lewis, 1966):

$$\text{Prob } (N_D \mid N_A + N_D) = \binom{N_A + N_D}{N_A} p^{N_D} (1-p)^{N_A} \quad (5.5)$$

Como puede observarse, la ecuación 5.5 corresponde a una distribución *binomial* con el parámetro p igual a:

$$p = \frac{\rho}{1 + \rho} = \frac{\frac{\nu_D}{\nu_A}}{1 + \frac{\nu_D}{\nu_A}} = \frac{\frac{\eta_D \cdot E_D}{\eta_A \cdot E_A}}{1 + \frac{\eta_D \cdot E_D}{\eta_A \cdot E_A}} \quad (5.6)$$

Igualando ahora las medias de los *índices de peligrosidad* en el período anterior y posterior a una actuación ($\eta_A = \eta_D$), el valor del parámetro p vendrá dado por la siguiente expresión:

$$p = \frac{E_D}{E_A + E_D} \quad (5.7)$$

Por lo tanto, como es evidente, el uso de las ecuaciones 5.5 y 5.7 permite contrastar la *hipótesis nula* correspondiente a la igualdad de las medias de los *índices de peligrosidad* antes y después de una actuación frente a la *hipótesis alternativa* correspondiente a la no igualdad de los mismos.

En el caso que se requiera contrastar la *hipótesis nula* frente a la *alternativa* de que la media del índice antes de una actuación sea menor que la media del índice después de la misma, la siguiente ecuación proporcionaría dicha probabilidad:

$$\alpha = \sum_{r=N_D}^{N_A + N_D} \binom{N_A + N_D}{r} p^r (1-p)^{N_A + N_D - r} \quad (5.8)$$

donde las hipótesis nula y alternativa mencionadas anteriormente son las siguientes:

$$H_o : p = \frac{E_D}{E_A + E_D}$$

$$H_a : p > \frac{E_D}{E_A + E_D} \quad (5.9)$$

Por otra parte, en el supuesto de que se quiera contrastar la *hipótesis nula* con la *alternativa* de que la media del *índice de peligrosidad* antes de la actuación es mayor que la media del índice después de la actuación se tendría que utilizar ésta otra ecuación:

$$\alpha = \sum_{r=0}^{N_D} \binom{N_A + N_D}{r} p^r (1-p)^{N_A + N_D - r} \quad (5.10)$$

donde las *hipótesis nula* y *alternativa* son, por analogía con las expresiones 5.9, las siguientes:

$$\begin{aligned}
 H_o : p &= \frac{E_D}{E_A + E_D} \\
 H_a : p &< \frac{E_D}{E_A + E_D}
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

Como es sabido, para proceder a aceptar o rechazar la *hipótesis nula*, la probabilidad α obtenida mediante las ecuaciones 5.8 y 5.10, debe ser comparada con el *nivel de significación* que se adopte para un determinado *nivel de confianza*.

Esta fórmulas son parecidas a la expuesta en el apartado 4.2.1, en el que se explicaba el contraste de significación mediante la *distribución binomial*, pero en aquella ocasión se efectuaba el contraste sobre el *número de accidentes registrados* mientras que aquí se realiza a partir de los *índice de peligrosidad*.

- **Contraste de la diferencia de medias.**

Para realizar la comparación de dos procesos de *Poisson* también se puede utilizar la *diferencia de las medias de los índices de peligrosidad* ($\eta_A - \eta_D$). En este caso se tiene que al registrar N_A y N_D accidentes conjuntamente con las exposiciones E_A y E_D , la estimación insesgada de ($\eta_A - \eta_D$) tendrá la siguiente expresión (Cox y Lewis, 1966; Peña, 1992a):

$$\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D = \frac{N_A}{E_A} - \frac{N_D}{E_D}
 \tag{5.12}$$

siendo una estimación insesgada de la varianza una expresión igual a la siguiente (Cox y Lewis, 1966; Peña, 1992a):

$$\text{Var} (\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D) = \frac{N_A}{E_A} + \frac{N_D}{E_D} \quad (5.13)$$

Por lo tanto, la prueba estadística a utilizar sería en este caso la siguiente (Cox y Lewis, 1966; Peña, 1992a):

$$z = \frac{(\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D) - (\eta_A - \eta_D)}{\sqrt{\{\text{var} (\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D)\}}} \quad (5.14)$$

Cuando N_A y N_D toman valores lo suficientemente grandes, este estadístico se puede considerar como una *distribución normal estándar* con media y varianza iguales a *cero* y *uno* respectivamente. En estas condiciones se puede contrastar la *hipótesis nula* de la igualdad de las *medias de los índices de peligrosidad*, frente la *hipótesis alternativa* de que la media del índice antes de la actuación sea menor que la media del índice en el período posterior a la ejecución de la misma, o sea:

$$\begin{aligned} H_o : \eta_A &= \eta_D \\ H_a : \eta_A &< \eta_D \end{aligned} \quad (5.15)$$

Esto se logra haciendo $(\eta_A - \eta_D)$ igual a cero en la ecuación 5.14 y calculando z . A partir de este valor de z , se obtiene la probabilidad α correspondiente a una *distribución normal estándar*. Al igual que en el contraste de la distribución *binomial*, este valor de α se

compara con el *nivel de significación* fijado para un *nivel de confianza* determinado y, en función de esto, se acepta o se rechaza la *hipótesis nula*.

5.2.1.2.- Estimación de intervalos de confianza.

En este apartado se va a exponer como proceder a la estimación de *intervalos de confianza de la diferencia de las medias de los índices de peligrosidad* en dos procesos de *Poisson* con el fin de poder utilizar esta herramienta en la evaluación de la efectividad de una actuación. Asimismo también se expondrá como estimar, por separado, *intervalos de confianza para los índices de peligrosidad* antes y después de la actuación.

- **Intervalos de confianza de la diferencia de medias de los índices de peligrosidad.**

Como ya se dijo anteriormente, para valores grandes de N_A y N_D la variable correspondiente a la *diferencia de las medias de los índices de peligrosidad* es *asintóticamente normal*, en cuyo caso la estimación de la *diferencia entre las medias de los índices de peligrosidad* es igual a $(\hat{\eta}_A - \hat{\eta}_D)$ y la estimación de la varianza es igual a la suma de las varianzas. Por tanto, los *límites superior e inferior* aproximados para valores grandes serían los siguientes (Peña, 1992a):

$$(\eta_A - \eta_D)_{su.} = \left(\frac{N_A}{E_A} - \frac{N_D}{E_D} \right) + z_c \sqrt{\frac{N_A}{E_A} + \frac{N_D}{E_D}} \quad (5.16)$$

$$(\eta_A - \eta_D)_{in.} = \left(\frac{N_A}{E_A} - \frac{N_D}{E_D} \right) - z_c \sqrt{\frac{N_A}{E_A} + \frac{N_D}{E_D}} \quad (5.17)$$

donde:

$(\eta_D - \eta_A)_{su.}$ = Límite superior de la diferencia de medias del índice de peligrosidad.

$(\eta_D - \eta_A)_{in.}$ = Límite inferior de la diferencia de medias del índice de peligrosidad.

z_c = Valor crítico en una distribución *normal estándar* para un determinado nivel de confianza en un test unilateral.

Cuando, para un determinado *nivel de confianza*, los valores de los *límites superiores o inferiores de la diferencia de medias de los índices de peligrosidad* sean iguales a cero o negativos, se dirá entonces que la actuación no ha sido efectiva en la reducción del *índice de peligrosidad*.

- **Intervalos de confianza de los índices de peligrosidad.**

Además de estimar los *límites de confianza* de la diferencia de las medias de los índices de peligrosidad, también se pueden obtener los *límites del índice de peligrosidad* a través de la media ν del *número de accidentes registrados* en una distribución de *Poisson*. Esto se logra aproximando la distribución de *Poisson* a una *normal*. En tal caso los *límites superior e inferior de la media de la distribución de Poisson* son los siguientes (Ricker, 1937):

$$\nu_{su.} = N + \frac{(z_c)^2}{2} + z_c \sqrt{\frac{z_c}{4 + N}} \quad (5.18)$$

$$\nu_{in.} = N + \frac{(z_c)^2}{2} - z_c \sqrt{\frac{z_c}{4 + N}} \quad (5.19)$$

donde:

v_{su} = Límite superior de la media del número de accidentes.

v_{in} = Límite inferior de la media del número de accidentes.

z_c = Valor crítico en una distribución *normal estándar* para un determinado nivel de confianza en un test unilateral.

Los *límites de confianza* para las medias de los *índices de peligrosidad* se obtendrían dividiendo el resultado de las fórmulas anteriores entre la exposición al riesgo en cada período. Esta estimación es útil sobre todo para estimar los escenarios más favorables o desfavorables de la peligrosidad antes y después de una actuación.

5.2.2.- Evaluación para la totalidad de las actuaciones conjuntamente.

Hasta ahora se han expuesto métodos de contraste de la efectividad de una actuación que se realiza para mejorar la seguridad de la circulación en un sólo emplazamiento; es decir, se consideran una a una y por separado las actuaciones de un mismo tipo. Sin embargo, tal y como se explicaba en el apartado 4.2.1, es conocido por la ingeniería de tráfico que para que una actuación de mejora de la seguridad produzca una reducción significativa del *número de accidentes registrados* o del *índice de peligrosidad*, se requiere que la diferencia entre el *índice de peligrosidad* antes y después de la actuación sea considerable. Por eso, la mayoría de las veces, al aplicar el contraste de significación a la evaluación de una actuación, aunque como consecuencia de ella se produzca una reducción del *índice de peligrosidad*, el valor de esta reducción no permite asegurar que el resultado sea *estadísticamente significativo* y, por lo tanto, no cabe atribuir la mejora de las condiciones de seguridad en la circulación a la ejecución de dicha actuación. En consecuencia, para llegar a una conclusión sobre la efectividad de un determinado tipo de

actuación se necesitan sumar los resultados registrados en un elevado número de emplazamientos similares donde se haya ejecutado el mismo tipo de actuación.

En tal caso se requerirá el registro de cada uno de los *índices de peligrosidad* antes y después de la ejecución en la totalidad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación de un mismo tipo, con el fin de obtener la suma de los mismos. Por lo tanto, la fórmula a emplear sería, en este caso, la siguiente:

$$E(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n I_{Ai} - \sum_{i=1}^n I_{Di}}{\sum_{i=1}^n I_{Ai}} \cdot 100 \quad (5.20)$$

Como ya se sabe, hay que confirmar que el cambio registrado en la suma *del índice de peligrosidad* en los distintos emplazamientos antes y después del conjunto de actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación es *significativa* desde el punto de vista estadístico y, por lo tanto, no es debida al azar. Para ello, se puede realizar un contraste de hipótesis mediante el estadístico *t de Student* para muestras pareadas. En este contraste se toma como *hipótesis nula* la no existencia de una *diferencia significativa* entre las medias de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones en el conjunto de emplazamientos. También se debe asumir que las distribuciones de los *índices de peligrosidad* antes y después son aproximadamente *normales* con medias μ_A , μ_D y varianzas σ_A^2 , σ_D^2 respectivamente.

Para utilizar este contraste, las medias de las distribuciones de los *índices de peligrosidad* (μ_A y μ_D) se estiman a partir de las medias de las muestras (\bar{I}_A y \bar{I}_D) empleando la ecuación 3.2. Análogamente, las varianzas de la distribución de los *índices de*

peligrosidad en el conjunto de emplazamientos (σ_A^2 y σ_D^2) antes y después de las actuaciones se estiman a partir de las varianzas de la muestras (S_A^2 y S_D^2) empleando la ecuación 3.4. En tal caso, la expresión del estadístico de la *t de Student* es la siguiente (Snedecor y Cochran, 1989; Bowman y Brinkman, 1988):

$$t = \frac{\bar{I}_A - \bar{I}_D}{s_B / \sqrt{n}} \quad (5.21)$$

donde:

\bar{I}_A = Media de los índices de peligrosidad en el conjunto de emplazamientos antes de la ejecución de las actuaciones.

\bar{I}_D = Media de los índices de peligrosidad en el conjunto de emplazamientos después de la ejecución de las actuaciones.

S_A^2 = Varianza de los índices de peligrosidad, antes de la ejecución de las actuaciones, estimada a partir de la muestra.

S_D^2 = Varianza de los índices de peligrosidad, después de la ejecución de las actuaciones, estimada a partir de la muestra.

S_B^2 = Varianza de la diferencia de las medias de los índices de peligrosidad estimada a partir de la muestra.

n = Número de emplazamientos de la misma categoría.

La varianza de la *diferencia de las medias de los índices de peligrosidad* se estima en función de las varianzas y covarianza de las dos muestras utilizando la siguiente expresión (Snedecor y Cochran, 1989):

$$S_B^2 = S_A^2 + S_D^2 - 2 \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{Ai} - \bar{I}_A)(I_{Di} - \bar{I}_D) \right] \quad (5.22)$$

Una vez calculado el estadístico t mediante la ecuación 5.21, hay que localizar paralelamente el *valor crítico* t_c en las tablas de la *t de Student* para $n - 1$ *grados de libertad* y un *nivel de confianza* elegido. Cuando el valor de t sea mayor que el de t_c se rechazará la *hipótesis nula* y se dirá que la diferencia entre las dos medias es *significativa* y, por lo tanto, la actuación ha sido efectiva en la reducción del *índice de peligrosidad*.

El principal problema a la hora de utilizar el contraste de la *t de Student* consiste en la asunción de la hipótesis de *normalidad* en las distribución de los *índices de peligrosidad* en los períodos posterior y anterior a las actuaciones, ya que es conocido que la distribución *normal* no se adapta convenientemente a la ocurrencia de los accidentes. Como se ha visto anteriormente, los investigadores han utilizado frecuentemente la distribución de *Poisson* para representar la probabilidad de ocurrencia del número de accidentes registrados, pero esta distribución sólo es aplicable para datos discretos. Por el contrario, una distribución que se ajusta mejor a los *índices de peligrosidad* en el conjunto de emplazamientos es la distribución *Gamma*, ya que ésta, al ser muy general, se adapta a una gran variedad de datos de tipo continuo relacionados con el tráfico.

Si se asume que los *índices de peligrosidad* se ajustan a una distribución *Gamma*, se puede salvar el obstáculo de la falta de *normalidad* en la distribución de dichos índices en el conjunto de emplazamientos haciendo uso del *teorema central del limite*, el cual estipula lo siguiente (Arnaiz, 1986):

"Si I_1, I_2, \dots son variables aleatorias independientes teniendo todas la misma distribución de probabilidad, con $E\{I_i\} = \mu$, $E\{I_i - \mu\}^2 = \sigma^2$, $i=1, 2, 3, \dots, n, \dots$ las variables $S^*_1, S^*_2, \dots, S^*_n$ convergen en distribución a una variable *I normal* (0,1). Las variables $S^*_1, S^*_2, \dots, S^*_n$ quedan definidas de la siguiente forma":

$$S_1^* = \frac{S_1 - E\{S_1\}}{\sigma\{S_1\}} \quad S_1 = I_1$$

$$S_2^* = \frac{S_2 - E\{S_2\}}{\sigma\{S_2\}} \quad S_2 = I_1 + I_2$$

$$S_n^* = \frac{S_n - E\{S_n\}}{\sigma\{S_n\}} \quad S_n = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

Por lo tanto, el procedimiento a seguir consistiría en asumir la hipótesis del ajuste de los *índices de peligrosidad* en el conjunto de emplazamientos a una distribución *Gamma*, con el fin de poder realizar la suma de estas variables aleatorias, de tal forma que si n es lo suficientemente grande se puede aproximar la probabilidad de la suma de dichas variables a una distribución *normal estándar*.

En estas circunstancias, el primer paso sería comprobar si los *índices de peligrosidad* (I_i) en el conjunto de emplazamientos siguen una distribución *Gamma*. Para ello, hay que estimar el modelo correspondiente a la siguiente función de densidad que se ajusta a estas variables aleatorias:

$$f(I) = \frac{(\iota)^\kappa \cdot I^{\kappa-1} \cdot e^{-\iota \cdot I}}{\Gamma(\kappa)} \quad \iota, \kappa, I > 0 \quad (5.23)$$

donde:

- ι, κ = Parámetros de la función de densidad Gamma.
- $\Gamma(\kappa)$ = Función Gamma.

La estimación de los parámetros de la función de densidad se puede llevar a cabo empleando el *método de los momentos* o el método de la *máxima verosimilitud* (Peña, 1992a). A continuación se va a explicar como realizar la estimación de dichos parámetros.

- **Método de los momentos.**

Como ya se sabe, el *método de los momentos* consiste en tomar como estimaciones de los parámetros aquellos valores que hagan que los sucesivos momentos de la población coincidan con los correspondientes momentos de la muestra. Primeramente, se estiman la media y la varianza de los *índices de peligrosidad* en la muestra correspondiente al conjunto de emplazamientos de las mismas características utilizando las ecuaciones 3.2 y 3.4. Los resultados obtenidos mediante estas ecuaciones se igualan a la media y a la varianza de la función de densidad *Gamma*:

$$\bar{I} = \frac{\hat{\kappa}}{\hat{t}} \quad (5.24)$$

$$S^2 = \frac{\hat{\kappa}}{\hat{t}^2} \quad (5.25)$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones se obtienen las estimaciones de los parámetros de la función de densidad *Gamma*.

- **Método de la máxima verosimilitud.**

Para estimar los parámetros de la función de densidad *Gamma* es recomendable emplear el *método de la máxima verosimilitud*, ya que las estimaciones obtenidas son

mejores en el sentido de que suelen cumplir un mayor número de propiedades de los estimadores (Arnaiz, 1986). Este método plantea el cálculo de la probabilidad de aparición de la muestra de los *índices de peligrosidad*, probabilidad que depende de los valores de los parámetros desconocidos de la función de densidad *Gamma*. Denominando *función de verosimilitud* a la función que da la probabilidad de aparición de la muestra, el método consiste en tomar como estimaciones de ι y κ los valores que hagan que la muestra obtenida sea lo más probable posible (Arnaiz, 1986).

Si en la función de densidad *Gamma* 5.23 se hace $\kappa = \mu \cdot \iota$, la *función de verosimilitud* que maximiza la probabilidad de la muestra de datos es la siguiente (Cox y Lewis, 1966):

$$L(I; \kappa, \mu) = \frac{\left[\frac{\kappa}{\mu} \right]^{n \cdot \kappa} \cdot \left[\prod_{i=1}^n I_i^{\kappa-1} \right] \cdot e^{-\frac{\kappa \sum I_i}{\mu}}}{[\Gamma(\kappa)]^n} \quad (5.26)$$

Calculando el logaritmo neperiano de la *función de verosimilitud* y derivando con respecto a κ y μ e igualando finalmente a cero ambos resultados, se obtiene que las estimaciones que maximizan la verosimilitud de los parámetros corresponden a las soluciones de las siguientes ecuaciones (Cox y Lewis, 1966):

$$-\frac{n \cdot \hat{\kappa}}{\hat{\mu}} + \frac{\hat{\kappa}}{\hat{\mu}^2} \sum_{i=1}^n I_i = 0$$

$$n \cdot \ln \hat{\kappa} + n \cdot \ln \hat{\mu} + \sum_{i=1}^n \ln I_i - \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{\hat{\mu}} - n \cdot \psi(\hat{\kappa}) = 0 \quad (5.27)$$

Una vez que se han estimado los parámetros de la función de densidad *Gamma*, hay que proceder a comprobar la bondad del ajuste del modelo por cualquiera de los métodos pertinentes. Si el resultado da un buen ajuste, entonces los *índices de peligrosidad* en el conjunto de emplazamientos siguen una distribución *Gamma* y, por lo tanto, aplicando el *teorema central del límite* mencionado anteriormente, se obtiene que la función de distribución de la suma de dichos índices convergería hacia una distribución *normal estandarizada*. Este resultado permitiría utilizar el *contraste de significación* de la *t de Student* expresado en la ecuación 5.21.

Hay que tener en cuenta que, aunque las variables aleatorias de los *índices de peligrosidad* no sigan el mismo tipo de función de densidad, cuando el número de emplazamientos donde se ejecuta el mismo tipo de actuación es bastante elevado, se espera que la función de distribución de la suma de las variables aleatorias independientes que corresponden a los *índices de peligrosidad* se aproxime a la *normal estándar*. Los estadísticos suelen considerar que, para valores de *n* superiores a 30, la suma de las variables aleatorias sigue una distribución *normal* independientemente de la población (Papoulis, 1991).

5.2.3.- Evaluación para la totalidad de las actuaciones conjuntamente con corrección de la tendencia temporal.

Cuando el período durante el cual se ejecutaron las diferentes actuaciones de mejora de la seguridad que se requiere evaluar sea largo, puede ser conveniente introducir un *factor de ponderación* que tenga en cuenta la *tendencia temporal* observada en la accidentalidad durante dicho período de tiempo en una red de carreteras. Dicho *factor* (F_x) sería igual al cociente entre la *media anual del número de accidentes registrados* en el conjunto de

emplazamientos de una red de carreteras durante el período de tiempo considerado y el *número de accidentes registrados* en un año (x) perteneciente al período anterior o posterior de la actuación dependiendo del caso que se analice (Mountain, Fawaz y Sineng, 1991):

$$F_x = \frac{\text{Media anual de accidentes en la red}}{\text{Accidentes en el año } x} \quad (5.28)$$

Como el comienzo y final de una actuación no suele coincidir cronológicamente con el inicio y terminación del año considerado (x), en el denominador de la fórmula anterior es necesario introducir una modificación (Mountain, Fawaz y Sineng, 1991):

$$F_x = \frac{\bar{N}}{\frac{d_a}{365} N_a + \frac{d_{a+b}}{365} N_{a+b}} \quad (5.29)$$

donde:

- \bar{N} = Número medio anual de accidentes registrados durante el período de tiempo en la totalidad de emplazamientos de la red de carreteras.
- d_a = Número de días del año a pertenecientes a alguno de los períodos anteriores o posteriores a la actuación.
- d_{a+b} = Número de días del año $a + b$ pertenecientes a alguno de los períodos anteriores o posteriores a la actuación.
- N_a = Número de accidentes registrados durante el año a .
- N_{a+b} = Número de accidentes registrados durante el año $a + b$.

En la fórmula anterior, la suma de $d_a + d_{a+b}$ siempre será igual a 365 días y, por otra parte, N_a o N_{a+b} es el *número anual de accidentes registrados* en cualquiera de los años

En la fórmula anterior, la suma de $d_a + d_{a+b}$ siempre será igual a 365 días y, por otra parte, N_a o N_{a+b} es el *número anual de accidentes registrados* en cualquiera de los años durante el período a lo largo del cual se ha observado una tendencia general en la accidentalidad y en el que se han ejecutado las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación de un mismo tipo. Por ejemplo, suponiendo que el 31 de mayo de 1990 sea la fecha de finalización de una actuación, entonces el *factor de ponderación* que se tendría que aplicar a N_D (considerando el período de un año) sería el siguiente:

$$F_x = \frac{\bar{N}}{\left(\frac{215}{365} \cdot \text{Accidentes en 1990} \right) + \left(\frac{150}{365} \cdot \text{Accidentes en 1991} \right)} \quad (5.30)$$

Una vez que se han calculado los *factores de ponderación* (F_k) utilizando la fórmula 5.29, éstos se multiplican por el *número de accidentes registrados* en el período correspondiente (N_A y N_D) con el fin de obtener el *número de accidentes ponderado* (N'_A y N'_D). El *índice de peligrosidad ponderado* antes y después de la actuación se estima dividiendo el *número de accidentes ponderados* entre la *exposición al riesgo* correspondiente.

Finalmente, para estimar la efectividad del conjunto de actuaciones del mismo tipo, ejecutadas en los emplazamientos de las mismas características, hay que volver a repetir el análisis explicado en el apartado 5.2.2. partiendo esta vez de los *índices de peligrosidad ponderados*.

5.3.- ANÁLISIS BAYESIANO.

5.3.1.- Evaluación de la efectividad a nivel individual.

Para evaluar la efectividad de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación ejecutada en un único emplazamiento, al igual que en el *análisis clásico*, se hará uso del diseño implícito en las investigaciones *antes y después*, pero en esta ocasión hay que estimar y comparar la media de la distribución *a posteriori* del *índice de peligrosidad a largo plazo* durante dos períodos de tiempo de la misma duración, uno anterior y otro posterior a la ejecución de la actuación objeto de estudio. Si la media de la distribución *a posteriori* del *índice de peligrosidad a largo plazo* en el período posterior a la ejecución de la actuación disminuye, se dice que la actuación ha sido efectiva como medida que mejora la seguridad. Por lo tanto, según este tipo de estudio la efectividad de una actuación ejecutada en un emplazamiento, se puede expresar en porcentaje de la manera siguiente:

$$E(\%) = \frac{ILP_{Ai} - ILP_{Di}}{ILP_{Ai}} \cdot 100 \quad (5.31)$$

donde:

- E = Efectividad de la actuación.
- ILP_{Di} = Media de la distribución *a posteriori* del índice de peligrosidad a largo plazo en el emplazamiento i después de la actuación. Si éste es puntual se expresa en accidentes/ 10^6 veh. y si es una sección en accidentes/ 10^6 veh.- km.
- ILP_{Ai} = Media de la distribución *a posteriori* del índice de peligrosidad a largo plazo en el emplazamiento i antes de la actuación. Si éste es puntual se expresa en accidentes/ 10^6 veh. y si es una sección en accidentes/ 10^6 veh.- km.

El *índice de peligrosidad a largo plazo* (η) se define como el *índice de peligrosidad* promedio que se espera que se produzca *al término de varios años* en un emplazamiento, siempre y cuando no se modifiquen las características físicas del mismo como consecuencia de cualquier tipo de actuación.

El *índice de peligrosidad a largo plazo* en un emplazamiento se considera una variable aleatoria, siendo su valor desconocido, lo que se conoce es el *índice de peligrosidad* calculado en función del *número de accidentes registrados* y de la *exposición al riesgo*. Análogamente, el *índice de peligrosidad a largo plazo para un conjunto de emplazamientos* también es una variable aleatoria y, en este caso, solamente se conocen los *índices de peligrosidad de cada uno de los emplazamientos*. Por ello, como se puede observar en la ecuación 5.31, para evaluar ahora la efectividad de una actuación hay que previamente estimar la media de la distribución *a posteriori* del *índice de peligrosidad a largo plazo*, tanto en el período anterior como en el posterior a la actuación de mejora de la seguridad. Es por esto que en el siguiente apartado se explicará cómo realizar esta tarea utilizando el *método empírico bayesiano*. Más adelante también se expondrá la forma de comprobar si este cambio de la media del *índice de peligrosidad a largo plazo* es *significativo* desde el punto de vista estadístico.

5.3.1.1.- Estimación del índice de peligrosidad a largo plazo.

Antes de pasar a describir el procedimiento conviene hacer énfasis en que la estimación de la media de la distribución *a posteriori* del *índice de peligrosidad a largo plazo* habrá que hacerla antes y después de cada actuación; es decir, esta estimación no se considera constante sino que, por el contrario, puede variar una vez que se ha ejecutado la actuación en un determinado emplazamiento. Por esta razón, en el desarrollo matemático

que se expone en este apartado, la nomenclatura corresponde a cualquiera de los dos períodos, por lo que se sobrentiende que sirve tanto para estimar la *media* en el período anterior como en el posterior.

Antes de acometer el desarrollo matemático del procedimiento conviene puntualizar las siguientes hipótesis (Higle y Witkowski, 1988; Pardillo, 1995a):

- I. *"...en ausencia de grandes modificaciones en las características intrínsecas de un emplazamiento, la ocurrencia de accidentes en el mismo se produce de acuerdo a una distribución de Poisson."*
- II. *"...el índice de peligrosidad a largo plazo η_i es una variable aleatoria que se produce para un conjunto de emplazamientos de acuerdo con una función de densidad Gamma."*

Como ya se dijo al inicio de este capítulo, la primera hipótesis es corroborada por innumerables estudios de seguridad vial y está basada en la evidencia de que los accidentes de tráfico son sucesos raros que se producen aleatoriamente. La segunda de las hipótesis enunciadas se basa en que si, tal como se ha visto en el capítulo anterior, el *número esperado de accidentes a largo plazo* tiene una función de densidad *Gamma*, entonces el *índice de peligrosidad a largo plazo* deberá ajustarse al mismo tipo de función de densidad.

Por otra parte, el *número de accidentes registrados y la exposición al riesgo* (en vehículos-kilómetro) durante un período de tiempo, tanto para antes de la actuación o después de ella, son valores conocidos en una cantidad determinada de emplazamientos (n) donde se han ejecutado actuaciones del mismo tipo. Al mismo tiempo, se debe asumir que el *número esperado de accidentes* en cada emplazamiento, durante cualquiera de los dos períodos de tiempo, es igual a la siguiente expresión:

$$\nu_i = \eta_i \cdot E_i \quad (5.32)$$

donde:

η_i = Índice de peligrosidad a largo plazo en el emplazamiento i .

E_i = Exposición al riesgo en el emplazamiento i en millones de vehículos-kilómetro.

Asumiendo como verdadera la primera hipótesis enunciada anteriormente, se tendrá que, en un emplazamiento en particular y para un *índice de peligrosidad a largo plazo* η_i , la probabilidad de registrar N_i accidentes en dicho emplazamiento durante el período de tiempo de un año viene dada por la siguiente expresión (Higle y Witkowski, 1988; Pardillo, 1995a):

$$f(N_i \mid \eta_i, E_i) = \frac{(\eta_i \cdot E_i)^{N_i} \cdot e^{-\eta_i \cdot E_i}}{N_i!} \quad N_i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5.33)$$

Obsérvese como en la expresión anterior, a diferencia de lo expuesto en el apartado 5.2.1.1, al estudiar las expresiones 5.2, la probabilidad de ocurrencia del *número de accidentes registrados* está condicionada por el *índice de peligrosidad a largo plazo* del emplazamiento i para enfatizar el hecho de que en único emplazamiento sólo se considera la accidentalidad del mismo.

Sin embargo, la principal semejanza con el *análisis clásico* es que, en el *análisis bayesiano* se tiene en cuenta la variabilidad entre los diferentes emplazamientos mediante la introducción de la variable aleatoria correspondiente a los *índices de peligrosidad a largo plazo*.

Esa variabilidad de los *índices de peligrosidad a largo plazo* (η_i) entre las diferentes emplazamientos, deriva de la segunda hipótesis donde se asume que la probabilidad de dichos índices sigue una distribución *a priori Gamma* con parámetros ω y α . Lo cual se expresa a través de la ecuación 5.34 (Higle y Witkowski, 1988; Pardillo, 1995a):

$$g(\eta_i) = \frac{\omega^\alpha \cdot \eta_i^{\alpha-1} \cdot e^{-\omega \cdot \eta_i}}{\Gamma(\alpha)} \quad \omega, \alpha, \eta_i > 0 \quad (5.34)$$

donde:

$$\Gamma(\alpha) = \text{Función Gamma.}$$

Como es conocido en la literatura estadística, la media y la varianza de esta distribución *a priori* son las siguientes:

$$E\{\eta_i\} = \frac{\alpha}{\omega} \quad (5.35)$$

$$\text{Var}\{\eta_i\} = \frac{\alpha}{\omega^2} \quad (5.36)$$

Al considerar, por un lado, a $f(N_i \setminus \eta_i, E_i)$ como la probabilidad condicional de registrar N_i accidentes en un año en función de η_i y E_i y, por otro, a $g(\eta_i)$ la distribución *a priori* del *índice de peligrosidad a largo plazo*, al ser la segunda distribución *conjugada* de la primera (Raiffa y Schlaifer, 1961), aplicando el *teorema de bayes* resulta que la distribución *a posteriori* del *índice de peligrosidad a largo plazo* en dicho emplazamiento es una distribución *Gamma* pero, en este caso, con parámetros α'_i y ω'_i (Higle y Witkowski, 1988; Pardillo, 1995a):

$$f(\eta_i \setminus N_i, E_i) = \frac{(\omega')^{\alpha'} \eta_i^{\alpha'-1} e^{-\eta_i \cdot \omega'}}{\Gamma(\alpha')} \quad (5.37)$$

donde:

$$\begin{aligned} \alpha'_i &= \alpha + N_i \\ \omega'_i &= \omega + E_i \end{aligned}$$

Entonces, según se indica en las expresiones 5.38 y 5.39, la media y la varianza del *índice de peligrosidad a largo plazo* en un emplazamiento i , son iguales a la media y la varianza de la distribución *a posteriori* (Berger, 1980):

$$ILP_i = E\{\eta_i \setminus N_i, E_i\} = \frac{\alpha'_i}{\omega'_i} = \frac{\alpha + N_i}{\omega + E_i} \quad (5.38)$$

$$VILP_i = Var\{\eta_i \setminus N_i, E_i\} = \frac{\alpha'_i}{(\omega'_i)^2} = \frac{\alpha + N_i}{(\omega + E_i)^2} \quad (5.39)$$

En la ecuación 5.38 la media de la distribución *a posteriori* del *índice de peligrosidad a largo plazo* (ILP_i) puede corresponder al período anterior o posterior, siendo éstos los valores que deben ser sustituidos en la ecuación 5.31 para así evaluar la efectividad de una actuación de mejora de la seguridad en la circulación.

Por otra parte, puede observarse que la ecuación 5.37 indica que la distribución *a posteriori* depende de los datos registrados y de la información *a priori*. Los datos registrados corresponden al *número de accidentes registrados* (N) y a la *exposición al riesgo* (E). La información *a priori* se puede interpretar como la observación de α

accidentes en ω *vehículos-kilómetro recorridos*, o lo que es lo mismo, los parámetros de la distribución *a priori*. Por lo tanto, si se conocieran los valores de los parámetros *a priori*, a la luz de estos datos registrados, se podría estimar la distribución *a posteriori* y, por consiguiente, la media y la varianza del *índice de peligrosidad a largo plazo*.

Para estimar el valor de los parámetros se puede tomar en consideración la circunstancia de que cuando el *número de accidentes registrados* en un emplazamiento i se ajusta una distribución de *Poisson* con media $\nu_i = \eta_i \cdot E_i$ y además el *índice de peligrosidad a largo plazo* sigue una distribución *a priori Gamma* del tipo expresado en la ecuación 5.34, entonces la probabilidad no condicionada de registrar N_i accidentes en dicho emplazamiento se estima mediante la función siguiente (Raiffa y Schlaifer, 1961; Berger, 1985; Maritz y Lwin, 1989):

$$p(N_i) = \int_0^{\infty} f(N_i \mid \eta_i, E_i) g(\eta_i) d\eta_i \quad (5.40)$$

Como es sabido, la resolución de la integral anterior da como resultado una *distribución binomial negativa* con los mismos parámetros que la distribución *a priori* (Raiffa y Schlaifer, 1961; Berger, 1985; Maritz y Lwin, 1989):

$$p(N_i) = \frac{\Gamma(N_i + \alpha)}{\Gamma(\alpha) \cdot N_i!} \left(\frac{E_i}{E_i + \omega} \right)^{N_i} \left(\frac{\omega}{E_i + \omega} \right)^{\alpha} \quad (5.41)$$

La media y la varianza de esta *distribución binomial negativa* en el emplazamiento i son las siguientes:

$$E\{N_i\} = \frac{\alpha}{\omega} \cdot E_i \quad (5.42)$$

$$\text{Var}\{N_i\} = \frac{\alpha}{\omega} \cdot E_i + \frac{\alpha}{\omega^2} \cdot E_i^2 \quad (5.43)$$

Por lo tanto, para conocer el valor de los parámetros de la distribución *a priori*, puede recurrirse al hecho de que éstos son iguales a los de la *distribución binomial negativa*. Tal y como se ha hecho para el *análisis clásico*, los parámetros de la *distribución binomial negativa* se pueden estimar también aquí por medio del *método de los momentos* o el de la *máxima verosimilitud*. A continuación se expone como estimar dichos parámetros mediante los dos métodos mencionados.

- **Método de los Momentos.**

Las expresiones 5.42 y 5.43 corresponden a la media y varianza de la *distribución binomial negativa* del número de accidentes registrados en un sólo emplazamiento i . Para obtener la media y la varianza de los *índices de peligrosidad registrados* en los n emplazamientos de las mismas características, donde se ha ejecutado el mismo tipo de actuación de mejora de la seguridad en la circulación, hay que hacer uso de las siguientes expresiones deducidas por Morris (1988) a partir de las ecuaciones precedentes:

$$E\{I_n\} = \frac{\alpha}{\omega} \quad (5.44)$$

$$\text{Var}\{I_n\} = \frac{\alpha}{\omega} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} + \frac{\alpha}{\omega^2} \quad (5.45)$$

Sustituyendo en estas ecuaciones $E\{I_n\}$ por la media de la muestra (\bar{I}) que viene dada por la ecuación 3.2 y sustituyendo también $\text{Var}\{I_n\}$ por la varianza de la muestra (S^2) que vienen dada por la 3.4 resolviendo, a continuación, el sistema de ecuaciones se obtienen las siguiente expresiones que dan la estimación de los parámetros de la distribución *a priori* (Morris, 1988):

$$\hat{\alpha} = \frac{\bar{I}^2}{S^2 - \bar{I} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i}} \quad (5.46)$$

$$\hat{\omega} = \frac{\bar{I}}{S^2 - \bar{I} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i}} \quad (5.47)$$

- **Método de la Máxima Verosimilitud.**

Bajo la hipótesis de que los accidentes acaecidos en cada emplazamiento son sucesos independientes, la *función de verosimilitud* $L(\alpha, \omega)$ de registrar una serie determinada de accidentes será el producto de las *verosimilitudes* individuales que vienen dadas por la ecuación 5.41. Por lo tanto, incorporando estas consideraciones, la expresión de $L(\alpha, \omega)$ es la siguiente (Maritz y Lwin, 1989):

$$L(\alpha, \omega) = \prod_{i=1}^n p(N_i) = \prod_{i=1}^n \frac{\Gamma(N_i + \alpha)}{N_i! \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\omega}{\omega + E_i} \right)^\alpha \left(\frac{E_i}{\omega + E_i} \right)^{N_i} \quad (5.48)$$

Calculando el logaritmo neperiano de esta ecuación, derivando respecto a α y ω e igualando a cero los resultados se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones que permite estimar los valores *máximo verosímiles* de los parámetros α y ω (Maritz y Lwin, 1989):

$$\begin{aligned} n \ln \omega - \sum_{i=1}^n \ln(\omega + E_i) + \sum_{i=1}^n \Psi(\alpha + N_i) - n \Psi(\alpha) &= 0 \\ \frac{n \cdot \alpha}{\omega} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha + N_i}{\omega + E_i} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (5.49)$$

donde:

$$\Psi(\alpha + N_i) = \frac{\Gamma'(\alpha + N_i)}{\Gamma(\alpha + N_i)}$$

$$\Psi(\alpha) = \frac{\Gamma'(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$$

Los valores de α y ω estimados por cualquiera de los dos métodos expuestos se sustituyen en la ecuación 5.38 para obtener la media de la distribución *a posteriori* del índice de peligrosidad a largo plazo (ILP_i) en cada uno de los emplazamientos. Esta estimación sirve tanto para el período anterior como para el posterior a la ejecución de las actuaciones de un mismo tipo. Por consiguiente, siguiendo los pasos explicados a lo largo de este apartado se podrán estimar ILP_{Ai} y ILP_{Di} en cada uno de los emplazamiento antes y después de las actuaciones. Sustituyendo finalmente estos valores en la ecuación 5.31 se

obtendrá el valor de la efectividad, a nivel individual, de cada una de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación.

Hay que tener en cuenta que, en este caso, las diversas distribuciones *Gamma a posteriori*, en cada uno de los emplazamientos, pueden tener diferentes valores de los parámetros, ya que el *número de accidentes registrados* y las *exposiciones al riesgo* en los distintos emplazamientos no tienen por qué ser iguales. Por lo tanto, *a priori* todos los emplazamientos tienen la misma distribución; sin embargo, *a posteriori* las distribuciones pertenecen a la familia *Gamma* pero pueden diferir en el valor de los parámetros estimados.

Por último, cabe decir que basándose en la media de una distribución *normal* en lugar de la media de la distribución *Gamma a posteriori* se pueden obtener de una forma lo suficientemente exacta *intervalos de confianza* de los *índices de peligrosidad a largo plazo* (Berger, 1985).

5.3.1.2.- Significación de la efectividad de una actuación a nivel individual.

Al igual que se hacía en el *análisis clásico*, una vez evaluada la efectividad de la actuación, hay que confirmar la *significación* del cambio estimado en la media de la distribución *a posteriori* del *índice de peligrosidad a largo plazo*. Para ello, se deben asumir las siguientes hipótesis:

1. El *índice de peligrosidad a largo plazo* (η_{A_i}) en un emplazamiento *i*, *antes* de una actuación, es una variable aleatoria con la siguiente distribución *Gamma a posteriori*:

$$f(\eta_{Ai} \setminus N_i, E_i) = \frac{(\omega_{Ai}')^{\alpha_{Ai}'} \eta_{Ai}^{\alpha_{Ai}' - 1} e^{-\eta_{Ai} \cdot \omega_{Ai}'}}{\Gamma(\alpha_{Ai}')} \quad \omega_{Ai}', \alpha_{Ai}', \eta_{Ai} > 0 \quad (5.50)$$

donde:

$$\alpha_{Ai}' = \alpha_A + N_{Ai}$$

$$\omega_{Ai}' = \omega_A + E_{Ai}$$

2. El índice de peligrosidad a largo plazo (η_{Di}) en un emplazamiento i , después de una actuación, es una variable aleatoria con la siguiente distribución *Gamma a posteriori*:

$$f(\eta_{Di} \setminus N_i, E_i) = \frac{(\omega_{Di}')^{\alpha_{Di}'} \eta_{Di}^{\alpha_{Di}' - 1} e^{-\eta_{Di} \cdot \omega_{Di}'}}{\Gamma(\alpha_{Di}')} \quad \omega_{Di}', \alpha_{Di}', \eta_{Di} > 0 \quad (5.51)$$

donde:

$$\alpha_{Di}' = \alpha_D + N_{Di}$$

$$\omega_{Di}' = \omega_D + E_{Di}$$

Por lo tanto, si α_{Ai}' y ω_{Ai}' son los parámetros de la distribución *a posteriori* del índice de peligrosidad a largo plazo (η_{Ai}) en el período anterior a la ejecución de la actuación, y α_{Di}' y ω_{Di}' son los parámetros de la distribución *a posteriori* del índice de peligrosidad a largo plazo (η_{Di}) en el período posterior a la ejecución de la actuación, para confirmar la efectividad de una actuación de mejora de la seguridad se debe *comprobar* que la *probabilidad* de que el índice de peligrosidad a largo plazo en el período posterior sea menor que el índice de peligrosidad a largo plazo en el período anterior supere un

determinado *nivel*. Por lo tanto, la efectividad de una actuación se puede considerar significativa, desde un punto de vista estadístico, siempre que se cumpla lo siguiente:

$$P(\eta_{Ai} > \eta_{Di}) > \theta \quad (5.52)$$

donde:

θ = Nivel de confianza en el cual la actuación de seguridad se considera efectiva en la reducción del índice de peligrosidad a largo plazo.

La parte izquierda de la inequación anterior también se puede expresar de la siguiente manera (Higle y Witkowski, 1988; Pardillo, 1995a):

$$\begin{aligned} P(\eta_{Ai} > \eta_{Di}) &= 1 - P(\eta_{Ai} < \eta_{Di}) = \\ &= 1 - \frac{(\omega_{Ai}')^{\alpha_{Ai}'}}{\Gamma(\alpha_{Ai}')} \int_0^{E\{\eta_{Di}\}} \eta^{\alpha_{Ai}' - 1} \cdot e^{-\omega_{Ai}' \cdot \eta} \cdot d\eta \end{aligned} \quad (5.53)$$

Si el resultado de la ecuación anterior es mayor que el *nivel de confianza* adoptado, se dirá que la actuación de seguridad ha sido efectiva en la reducción del *índice de peligrosidad a largo plazo* y, por lo tanto, esta reducción se considera atribuible a la misma y no es un resultado del azar.

5.3.2.- Evaluación para la totalidad de las actuaciones conjuntamente.

En el apartado 5.2.2 del presente capítulo se explicaba que al llevar a cabo una evaluación de la efectividad de un determinado tipo de actuación, para poder llegar a una

conclusión *significativa* sobre la misma, hay que realizar dicha evaluación en un considerable número de emplazamientos similares en los que se hayan ejecutado el mismo tipo de actuaciones para, a continuación, proceder a sumar el efecto de cada actuación individual y evaluar la efectividad del conjunto de actuaciones del mismo tipo.

En el *análisis bayesiano* también hay que proceder de manera parecida, pero a diferencia de lo visto en el caso descrito en el apartado 5.2.2 donde sumaban los *índices de peligrosidad*, ahora hay que sumar las medias de cada una de las distribuciones *a posteriori* de los *índices de peligrosidad a largo plazo* antes (ILP_{Ai}) y después (ILP_{Di}) de la ejecución de la de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación de un mismo tipo. Por lo tanto, la fórmula a emplear para evaluar la efectividad sería la siguiente:

$$E(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n ILP_{Ai} - \sum_{i=1}^n ILP_{Di}}{\sum_{i=1}^n ILP_{Ai}} \cdot 100 \quad (5.54)$$

En el mencionado apartado se había dicho que para contrastar la media de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones se podía utilizar el contraste de la *t de Student*, siempre que las distribuciones de dichos índices fueran *normales*. También se había expuesto el *teorema central del límite* y se había dicho que la función de distribución de la suma de las variables aleatorias estandarizadas correspondientes a los *índices de peligrosidad* en los diferentes emplazamientos convergía hacia una función de distribución *normal* de media igual a *cero* y varianza igual a *uno*. En razón de lo cual, aunque las distribuciones de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones no eran *normales* dicho teorema permitía realizar el contraste de la *t de Student*.

Una vez que se ha evaluado la efectividad mediante la fórmula 5.54 se puede aplicar un proceso análogo al resumido anteriormente. Para ello, hay que tener en cuenta el hecho de que las distribuciones *a posteriori* de las *variables aleatorias* de los *índice de peligrosidad a largo plazo* en los diferentes emplazamientos son de la familia *Gamma*. Sin embargo, en este caso dichas variables no tienen una distribución idéntica, sino que las distintas distribuciones *a posteriori* en el conjunto de emplazamientos pueden ser diferentes.

Para poder utilizar el *teorema central del límite* se asumirá la hipótesis de que las *medias de los índices de peligrosidad a largo plazo* en el conjunto de emplazamientos antes y después de las actuaciones se distribuyen de acuerdo a una función de densidad *Gamma*. En estas condiciones se utilizará el sistema de ecuaciones 5.27 para estimar los parámetros de dicha distribución *Gamma*. Después se comprobará la bondad del ajuste y, si el resultado es positivo, se hará uso del *teorema central del límite* en la forma anteriormente descrita. Finalmente se utilizará el test de la *t de Student* para contrastar la efectividad del conjunto de actuaciones.

5.3.3.- Evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones con corrección de la tendencia temporal.

En el apartado 5.2.3 se había introducido un *factor de ponderación* en la evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones. Dicho *factor* tenía en cuenta la *tendencia temporal* observada en la accidentalidad durante un período de tiempo en una red de carreteras. Además, este factor se calculaba en cada emplazamiento y luego se multiplicaba por el número de accidentes registrado en el período correspondiente (N_{Ai} o N_{Di}) con el fin de obtener el *número de accidentes ponderado* (N_{Ai}' o N_{Di}').

Tal y como se expuso en su momento, para obtener los parámetros de las distribuciones *a posteriori* de cada uno de los emplazamientos en el período anterior a la ejecución de las actuaciones, el *análisis bayesiano* exige que se estimen previamente los parámetros de las distribuciones *a priori* para luego utilizar las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}(\alpha_{Ai})'_p &= \alpha_A + N_{Ai}' \\ \omega_{Ai}' &= \omega_A + E_{Ai}\end{aligned}\quad (5.55)$$

donde:

$(\alpha_{Ai})'_p$ = Parámetro ponderado de la distribución *a posteriori* en el emplazamiento *i* en el período anterior.

α_A = Parámetro de la distribución *a priori* en el período anterior.

ω_{Ai}' = Parámetro de la distribución *a posteriori* en el emplazamiento *i* en el período anterior.

ω_A = Parámetro de la distribución *a priori* en el período anterior.

N_{Ai}' = Número ponderado de accidentes en el emplazamiento *i* en el período anterior a la actuación.

E_{Ai} = Exposición al riesgo en el emplazamiento *i* en el período anterior a la actuación.

Aplicando el mismo razonamiento se estiman también los parámetros de la distribución *a posteriori* en cada uno de los emplazamientos para el período posterior a la ejecución de las actuaciones:

$$\begin{aligned}(\alpha_{Di})'_p &= \alpha_D + N_{Di}' \\ \omega_{Di}' &= \omega_D + E_{Di}\end{aligned}\quad (5.56)$$

donde:

$(\alpha_{Di})_p$ = Parámetro ponderado de la distribución *a posteriori* en el emplazamiento *i* en el período posterior.

α_D = Parámetro de la distribución *a priori* en el período posterior.

ω_{Di} = Parámetro de la distribución *a posteriori* en el emplazamiento *i* en el período posterior.

ω_D = Parámetro de la distribución *a priori* en el período posterior.

N_{Di} = Número ponderado de accidentes en el emplazamiento *i* en el período posterior a la actuación.

E_{Di} = Exposición al riesgo en el emplazamiento *i* en el período posterior a la actuación.

Por lo que la media de la distribución *a posteriori* de los *índices de peligrosidad a largo plazo ponderados* en los períodos anterior y posterior serían iguales a:

$$ILP_{Ai}' = \frac{(\alpha_{Ai})_p'}{\omega_{Ai}'} \quad (5.57)$$

$$ILP_{Di}' = \frac{(\alpha_{Di})_p'}{\omega_{Di}'} \quad (5.58)$$

Para evaluar la efectividad del conjunto de actuaciones del mismo tipo, ejecutadas en los emplazamientos de similares características, se sustituyen los valores de los *índices de peligrosidad a largo plazo ponderados* en la expresión 5.54. La comprobación de que el cambio observado en la accidentalidad es *significativo* desde el punto de vista estadístico exige repetir el análisis explicado en los apartados 5.3.2 y en el 5.2.2.

CAPÍTULO 6

***TOMA DE DATOS Y CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS DE LA
COMUNIDAD DE MADRID.***

6.1.- INTRODUCCIÓN.

En este capítulo, en primer lugar, se describirá cómo se obtuvo la información acerca de las actuaciones que ejecuta la Comunidad de Madrid con el fin de reducir la accidentalidad en sus carreteras. Asimismo se explicarán las causas por las que éstas fueron seleccionadas para la posterior aplicación de las metodologías explicadas en el capítulo precedente. También se expondrá como se consiguió la información adicional que se precisa para la evaluación de la efectividad de las actuaciones: datos sobre los accidentes, sobre la infraestructura viaria y sobre las intensidades de tráfico.

En segundo lugar, se explicará cómo se llevo a cabo el acopio de toda esa información mediante el diseño de un banco de datos *ad hoc* que permitiera el uso de dicha información de una manera rápida, sencilla y eficaz.

Finalmente, se realizará una clasificación de las carreteras de la Comunidad de Madrid en categorías homogéneas según la peligrosidad de las mismas a partir de la información disponible en el banco de datos. Esta tipología de carreteras se elabora a través de un *análisis de la varianza*. Dicho análisis se lleva a cabo con objeto de reducir la variabilidad de la red desde el punto de vista de la accidentalidad de manera que cuando, en el siguiente capítulo, se realice la evaluación de la efectividad de las actuaciones los grupos de referencia sean lo más homogéneos posibles.

6.2.- TOMA DE DATOS.

En el capítulo 1, donde se analizó la *política de seguridad vial* de la CAM, se había visto que, desde el punto de vista de la infraestructura viaria, esta Comunidad se enfrentaba al problema de la accidentalidad en sus carreteras tanto con *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación* como con *actuaciones preventivas*. A raíz de ello se procedió a la localización de los datos relativos a las actuaciones ya ejecutadas en las carreteras de la CAM, así como de cualquier otra información adicional que estuviera relacionada con las mismas.

Después de proceder a realizar una búsqueda por los archivos disponibles en instituciones públicas directamente concernidas por el problema, se llegó a la conclusión de que, para llevar a cabo la evaluación de las actuaciones, era preciso recolectar los siguientes tipos de datos:

- Datos de las propias actuaciones y de la infraestructura viaria
- Datos de los accidentes de tráfico
- Datos de intensidades medias diarias

Los datos de las actuaciones y de las intensidades de tráfico fueron facilitados por la Dirección General de Carreteras de la CAM. Los datos de accidentes se obtuvieron, por un lado, a partir de los ficheros informáticos centrales de la Dirección General de Tráfico y, por otro, en la Dirección General de Carreteras de la CAM.

6.2.1.- Datos de actuaciones.

La Consejería de Transportes puso a disposición de esta tesis una base de datos con las actuaciones sobre la infraestructura viaria ejecutadas a partir del año 1988. Después de una revisión detallada de la información sobre las mismas, se observó que los tipos predominantes de actuaciones eran preferentemente los de creación de nueva infraestructura y los de *acondicionamientos, ensanches de plataforma y calzada y refuerzos del firme* de las carreteras existentes.

Al no encontrarse información específica acerca de actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación o de otro tipo de actuaciones que se pudieran considerar como *preventivas* - exceptuando las ya mencionadas de *acondicionamientos, ensanches de plataforma y calzada y refuerzos de firme* - se procedió a realizar un segundo intento de localización a través de una revisión más minuciosa de los datos disponibles. Ésta tarea se realizó a partir de la revisión de información adicional proporcionada por el personal encargado de la seguridad vial de la CAM, con un resultado igualmente infructuoso debido a que los datos sobre este tipo de actuaciones no se almacena o registra de una forma sistemática.

Por otra parte, también se intentó obtener información en el *Servicio de Conservación y Mantenimiento* de la CAM, acerca de las actuaciones ejecutadas en los *puntos negros* o *tramos peligrosos* de las carreteras de la Comunidad, pero nuevamente afloró el problema de la inexistencia de un almacenamiento de datos ordenado y sistemático. De todas formas; tal y como se explicó en el capítulo 1, el número de *puntos negros*, identificados según los criterios de la Comunidad de Madrid, resultaba ser relativamente pequeño, lo cual generaba a su vez un escaso número de actuaciones anuales; por si fuera poco, cuando éstas se

producían, eran muy dispares unas de otras, imposibilitando la realización de cualquier estudio estadístico que pretendiera evaluar la efectividad de las mismas.

En vista de los inconvenientes expuestos en el párrafo anterior, se optó por proceder a una explotación de la base datos que contiene la información de las actuaciones sobre la infraestructura viaria proporcionada inicialmente por la CAM. Ello se hizo con el fin de retener la información referente a las actuaciones de *acondicionamiento, ensanche de plataforma y calzada y refuerzos* ejecutadas a partir del año 1988, dado que éstas se pueden considerar como *preventivas* y que, por lo tanto, se espera que influyan disminuyendo la peligrosidad de la red. En estos casos, los datos vaciados fueron los siguientes:

- Código de la actuación
- Denominación de la actuación o del proyecto
- Tipo de actuación
- Fecha de inicio
- Fecha de terminación
- Director de la obra

Con esta información inicial se procedió a realizar una nueva serie de consultas a los técnicos de la Dirección General de Carreteras de la CAM - directores y ayudantes de obra - con la finalidad expresa de verificar las condiciones y características de cada ejecución u otras aclaraciones sobre los datos de las mismas. Además, en vista de que la cantidad de actuaciones resultaba escasa, se consultaron también los archivos no informatizados del *Servicio de Publicaciones* de la CAM, así como los del *Servicio de Conservación y Mantenimiento* con el fin de localizar cualquier información existente, susceptible de ser utilizada en la realización de los análisis previstos en esta tesis.

En el *Servicio de Publicaciones y Documentación* se obtuvieron los códigos y nombres de las actuaciones de interés durante el período 1985 al 1987, para en una segunda fase buscar en los archivos del *Servicio de Conservación y Mantenimiento* las fechas de inicio y terminación de las obras y otros datos necesarios. A partir de estos datos y los correspondientes al período 1988-1993, se localizaron los proyectos de *acondicionamiento, ensanche de plataforma y calzada y refuerzos* archivados en la Consejería de Transportes. Toda esta documentación técnica fue revisada para estudiar en ella los detalles de cada actuación. Los datos extraídos de los proyectos fueron, entre otros, los siguientes:

- Origen del proyecto
- Final del proyecto
- Tramos de carretera que abarcaba el proyecto
- Intersecciones dentro del proyecto
- Punto kilométrico en el origen
- Punto kilométrico en el final
- Posible desagregación de actuaciones dentro del proyecto
- Intensidad media diaria

Una vez revisados, por un lado, los proyectos de *acondicionamiento* y, por otro, los de *ensanche de plataforma y calzada* se llegó a la conclusión de que no existía un criterio claro que permitiera discriminarlos en razón de las definiciones enunciadas en el apartado 1.3.1.2. En vista de ello, se optó por agrupar ambos tipos en una sola categoría a la cual se denominó *actuaciones de acondicionamiento en carreteras*.

Por otra parte, el *Servicio de Publicaciones y Documentación* de la CAM puso también a disposición de esta tesis una colección completa de planos de las carreteras de la Comunidad de Madrid a escala 1:25.000, que fue utilizada para delimitar con precisión la

ubicación de cada proyecto o actuación en los diferentes tramos de las carreteras de la Comunidad.

6.2.2.- Datos de intensidades de tráfico y características geométricas.

Por otro lado, en el *Servicio de Planificación* de la Dirección General de Carreteras de la CAM se obtuvieron los datos relativos a las intensidades medias diarias por tramos de carretera y estaciones de aforo, así como las tramificaciones de la red viaria incluidas en los planes generales 1986-1993 y 1994-2001. Estas tramificaciones, entre otros, permitieron la obtención de los siguientes datos:

- Longitud del tramo
- Punto kilométrico en el origen y final del tramo
- Intensidad media diaria
- Ancho de calzada y plataforma
- Número de calzadas

6.2.3.- Datos de los accidentes.

En un principio los datos de accidentes fueron extraídos de los listados de la Consejería de Transportes de la Comunidad, pero se tropezó con el inconveniente de que sólo se disponía de datos de accidentes a partir del año 1989. Por lo tanto, se intentó localizar directamente la información necesaria en los partes de accidentes de tráfico, pero éstos habían sido destruidos. En vista de ello, se solicitó en las oficinas centrales de la Dirección General de Tráfico, los datos de accidentes acaecidos en las Carreteras de la CAM durante el período de tiempo comprendido entre los años 1983 a 1995. Estos datos

fueron proporcionados en soporte informático que incluía tres archivos conteniendo la siguiente información:

- Datos generales y de la infraestructura
- Datos del vehículo
- Datos de las personas involucradas en el accidente

Para los fines analíticos de esta tesis, los datos de mayor interés resultaban ser los del primero de los tres archivos citados, en concreto los siguientes:

- Año del accidente
- Día del accidente
- Red a la que pertenece la carretera
- Nomenclatura de la carretera
- Punto kilométrico
- Punto hectométrico
- Zona
- Tipo de vía
- Fuera de intersección

La depuración de esta información resultó ser extremadamente laboriosa debido a los numerosos errores detectados. A título de ejemplo, basta mencionar que a raíz del Plan de carreteras 1986-1993 se produjo una modificación de la nomenclatura de las Carreteras de la *CAM* y, como consecuencia de esta modificación, había carreteras que aparecían en la base de datos de la *DGT* con diferentes nomenclaturas, distintos orígenes kilométricos, etc. Además, como ya se ha advertido en el capítulo 2, los agentes de tráfico suelen cometer diversos errores al registrar los accidentes, produciéndose con ello un agravamiento de las dificultades derivadas de la modificación de la nomenclatura y origen de las carreteras o de la falta de precisión y carencia de hitos kilométricos y hectométricos.

Se observó también que el número de accidentes registrados con sólo daños materiales era muy pequeño, alrededor de un 3% de los accidentes totales, lo cual es difícilmente admisible, reflejando esa cifra la falta de registro de los mismos. Como alternativa, se intentó conseguir datos de accidentes con sólo daños materiales en las compañías aseguradoras pero las gestiones fueron aquí infructuosas.

Para la asignación de los accidentes de tráfico a los diferentes tramos donde se habían producido las actuaciones se utilizaron los planos de carreteras 1:25.000, delimitando en ellos los diferentes tramos, intersecciones, travesías, etc. En la realización de esta asignación se tuvieron en cuenta los puntos kilométricos y hectométricos, conjuntamente con el resto de la información tomada de la base de datos de la *DGT*, comprobando posteriormente si ésta concordaba con el P. K. del plano 1:25.000. Este proceso de asignación tuvo que ser realizado manualmente debido a la falta de homogeneidad e inexactitud de los datos disponibles sobre los accidentes. En el caso de que un accidente no estuviera debidamente localizado, éste era rechazado y no se tenía en cuenta. Esta asignación de los accidentes se realizó, allí donde fue posible, en todos y cada uno de los tramos de carretera de la *CAM* durante los años 1989, 1990 y 1991. Por último, se imputaron igualmente los accidentes tanto durante el primer y segundo año anterior a la fecha de inicio de cada actuación como durante el primer y segundo año posterior a la fecha de terminación.

6.3.- BASE DE DATOS.

A raíz de lo dicho en el epígrafe anterior se decidió confeccionar una base de datos de la tramificación de las carreteras de la *CAM* en campo abierto, basada en la información disponible a partir de los Planes de Carreteras 1986-1993 y 1993-2001. En ella quedó

excluida el área metropolitana de Madrid. Este fichero automatizado incluía los siguientes campos (ver anejos 1, 2, 3, 4, 6, 7 y 8):

- Nomenclatura del tramo de carretera
- Origen del tramo
- Destino del tramo
- Red a la que pertenece el tramo
- Número de calzadas
- Última nomenclatura conocida
- Nomenclatura anterior al Plan 1986-1993
- Longitud del tramo
- Ancho de calzada
- Ancho del arcén
- Ancho de plataforma
- Tipo de terreno
- *IMD* desde el año 1983 al año 1994
- Accidentes en el año 1989
- Accidentes en el año 1990
- Accidentes en el año 1991
- Tipo de actuación realizada en el tramo
- Código de la actuación
- Fecha de inicio de la actuación
- Fecha de terminación de la actuación
- Número de accidentes durante el primer y segundo año anterior a la fecha de inicio de la actuación
- Número de accidentes durante el primer y segundo año posterior a la fecha de terminación de la actuación

En el caso del número de accidentes durante el primer y segundo año anterior y posterior a las fechas de inicio y finalización de las actuaciones solamente se tuvieron en cuenta los accidentes producidos en tramos de carretera en campo abierto; es decir, se excluyeron los tramos de carreteras que coincidían con travesías urbanas. Tampoco se

tuvieron en cuenta los accidentes producidos en las intersecciones, con el fin de que las obras de *acondicionamiento de intersecciones* no afectarán al análisis que se iba a realizar posteriormente.

6.4.- CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID SEGÚN LA ACCIDENTALIDAD.

Una vez finalizada la confección y depuración de la base de datos en los términos expuestos en el epígrafe anterior, se procedió a realizar una clasificación de las carreteras con el objeto de agruparlas en *categorías homogéneas* que difirieran entre ellas *significativamente* desde el punto de vista de la accidentalidad. Para ello, se realizó un *análisis de la varianza* utilizando como variable dependiente el *índice de peligrosidad*.

En la clasificación funcional, que ya fue expuesta en el capítulo 1, se observa que las mayores intensidades de tráfico suelen estar distribuidas (figuras 1.2 y 1.3) en las *redes principal, secundaria* y en las carreteras con *doble calzada*. Las menores intensidades de tráfico se registran en la *red local*. A la vista de dicha situación, se decidió hacer una clasificación previa para el análisis de la varianza en función del *número de calzadas* y de las *intensidades de tráfico*.

Por un lado, se tuvo en cuenta al conjunto de carreteras con doble calzada y todas las intensidades de tráfico. Por otro lado, se consideró el grupo de carreteras con una sola calzada, pero éstas se subdividieron en tres *subcategorías* en función de su intensidad de tráfico. En la tabla 6.1 pueden verse las tres *subcategorías* de esta *clasificación previa*, donde están excluidas de la misma las carreteras de doble calzada.

<i>Nº de Calzadas</i>	<i>IMD</i>
<i>UNA</i>	< 1000
	1000 - 5000
	> 5000

Tabla 6.1. Clasificación previa de las carreteras de la CAM.

Como se explicó en el apartado anterior, en la base de datos, las carreteras de la CAM estaban divididas por tramos con sus intensidades de tráfico y, además, se disponía del número de accidentes registrados en cada uno de dichos tramos desde el año 1989 al año 1991. Ello permitió calcular los *índices de peligrosidad* promedio correspondientes a los años 1989 a 1991 en cada uno de esos tramos. A continuación, después de haber efectuado el cálculo de los índices de peligrosidad y teniendo en cuenta la tabla 6.1, se realizó el *análisis de la varianza* para el período de tiempo correspondiente a los años 1989 a 1991. El resultado de dicho análisis fue que las tres categorías de la tablas 6.1 *no eran significativamente diferentes con un 99% de nivel de confianza* (anejos 4 y 5, tablas 6.2 y 6.3).

<i>GRUPOS</i>	<i>MEDIA</i>	<i>TRAMOS</i>	<i>VARIACIÓN</i>
< 1000	0,6680	213	4,3127
1000 - 5000	0,4290	168	1,5729
> 5000	0,3604	85	2,2333
<i>TOTAL</i>	0,5258	466	8,2090

Tabla 6.2. Medias de los índices de peligrosidad en la clasificación previa.

<i>FRENTE DE VARIACIÓN</i>	<i>DESVIACIONES CUADRÁTICAS</i>	<i>GRADOS DE LIBERTAD</i>	<i>MEDIAS CUADRÁTICAS</i>	<i>F</i>	<i>F CRÍTICO</i>
<i>INTERGRUPO</i>	8,2090	2	4,1045	4,1095	4,7865
<i>INTRAGRUPPO</i>	462,4396	463	0,9988		
<i>TOTAL</i>	470,6486	465			

Tabla 6.3. Análisis de la varianza de la clasificación previa.

Posteriormente, se aplicó el *test de Scheffé* para comprobar en qué grupos no radicaba la diferencia y se encontró que ésta no era *significativa* entre la categoría con intensidades de tráfico menores de 1000 v/d y la categoría de 1000 y 5000 v/d. Asimismo, tampoco se halló una diferencia *significativa* entre las categorías con intensidades de tráfico menores de 1000 v/d y superiores a 5000 v/d. Sin embargo, como puede observarse en la tabla 6.4, entre la categoría *1000-5000 v/d* y la categoría *> 5000 v/d* se encontró que la diferencia entre ambas es todavía menos *significativa*, ya que el valor de *F* se aleja bastante del *valor crítico* (anexo 5).

<i>TEST DE SCHEFFÉ</i>	<i>F</i>	<i>F CRÍTICO</i>
<i>< 1000 / 1000 - 5000</i>	2,6869	2,9957
<i>< 1000 / > 5000</i>	2,8781	2,9957
<i>1000 - 5000 / > 5000</i>	0,1328	2,9957

Tabla 6.4. Test de Scheffé.

En vista de estos resultados, se decidió agrupar las carreteras de una calzada con intensidades de tráfico ente 1000 y 5000 v/d y las carreteras con intensidades de tráfico superiores a 5000 v/d en una sola categoría, con lo cual resultó la tabla 6.5.

<i>Nº de Calzadas</i>	<i>IMD</i>
<i>UNA</i>	< 1000
	> 1000

Tabla 6.5.- Clasificación definitiva de las carreteras de la CAM.

A partir de esta última clasificación de las carreteras se procedió a realizar un segundo *análisis de la varianza* (tablas 6.6 y 6.7), observando que el efecto de las intensidades de tráfico era *significativo* en los tres años citados a un *nivel de significación* de un 1 %. A continuación, se aplicó de nuevo el *test de Scheffé* para contrastar la diferencia de medias entre los dos grupos, resultando ya la diferencia entre ellos *estadísticamente significativa* (anejo 5).

<i>GRUPOS</i>	<i>MEDIA</i>	<i>TRAMOS</i>	<i>VARIACIÓN</i>
< 1000	0,6680	213	4,3127
> 1000	0,4060	253	3,6309
TOTAL	0,5258	466	7,9436

Tabla 6.6. Medias de los índices de peligrosidad en la clasificación definitiva.

<i>FRENTE DE VARIACIÓN</i>	<i>DESVIACIONES CUADRÁTICAS</i>	<i>GRADOS DE LIBERTAD</i>	<i>MEDIAS CUADRÁTICAS</i>	<i>F</i>	<i>F CRÍTICO</i>
<i>INTERGRUPO</i>	7,9436	1	7,9436	7,9658	6,8510
<i>INTRAGRUPO</i>	462,7050	464	0,9972		
<i>TOTAL</i>	470,6486	465			

Tabla 6.7. Análisis de la varianza de la clasificación definitiva.

En vista de los resultados obtenidos en el último *análisis de la varianza*, se decidió adoptar como clasificación de las carreteras de una calzada de la Comunidad de Madrid la expuesta en la tabla 6.5.

Esta división de las carreteras de una calzada de la Comunidad de Madrid, en dos categorías *significativamente diferentes* desde el punto de vista de la accidentalidad, será utilizada en el siguiente capítulo para la agrupación de las actuaciones de *acondicionamiento y refuerzos de firme* con el fin de evaluar la efectividad de las mismas.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS Y RESULTADOS.

7.1.- INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se va a proceder a realizar la evaluación de la efectividad de las actuaciones de *acondicionamiento y refuerzo de firmes* sobre la accidentalidad. Aunque estas actuaciones en carreteras no son propiamente de mejora de la seguridad en la circulación, su elección para el análisis viene justificada, en primer lugar, por la falta de información acerca de otros tipos de actuaciones ejecutadas en la Comunidad de Madrid y, en segundo lugar, porque a ellas se les puede aplicar la metodología explicada en el capítulo 5. Además, siempre resulta interesante conocer si dichas actuaciones han sido efectivas o no en la reducción de la peligrosidad.

Para realizar la evaluación de la efectividad por el *método clásico* o el *empírico bayesiano* se toma como referencia la información recopilada en la base de datos construida a estos efectos y que ya ha sido descrita en el capítulo 6. Como ya se ha señalado entonces, los datos necesarios para el análisis son de tres tipos: datos de accidentes, intensidades de tráfico y actuaciones.

7.2.- DATOS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS.

Al realizar, en el capítulo 6, el *análisis de la varianza* se había llegado a la división de las carreteras de una calzada de la Comunidad de Madrid en dos categorías desde el punto de vista de la peligrosidad:

- *Carreteras con IMD menor de 1000 v/d.*
- *Carreteras con IMD superior a 1000 v/d.*

En consecuencia, el primer paso a realizar fue la búsqueda de las actuaciones ejecutadas dentro de dichas categorías en los tramos de carretera de la Comunidad.

Para poder conseguir un número suficiente de actuaciones que permitiera realizar el posterior análisis estadístico, fue preciso seleccionar todas las actuaciones ejecutadas entre los años 1985 y 1993 inclusive. El número de actuaciones de *acondicionamiento* ejecutadas dentro de la categoría de *carreteras con una IMD menor de 1000 v/d* fue de 48, mientras que las actuaciones de *refuerzo de firmes* fueron 12. Por otra parte, en la categoría de *carreteras con una IMD mayor de 1000 v/d* el total de actuaciones seleccionadas fue de 150, correspondiendo la mitad a proyectos de *acondicionamiento* y la otra mitad a *refuerzo de firmes*.

El segundo paso fue recuperar la información sobre las *fechas de inicio* y de *terminación* de las actuaciones conjuntamente con el *número de accidentes registrados* y la *exposición al riesgo* en los dos años anteriores y posteriores a dichas fechas. Aquellos tramos en los cuales se había producido otro tipo de actuación durante estos periodos fueron excluidos del proceso de análisis a fin de evitar la influencia derivada de la simultaneidad de las actuaciones.

Las figuras 7.1 y 7.2 expresan la forma en que se obtuvieron los datos.

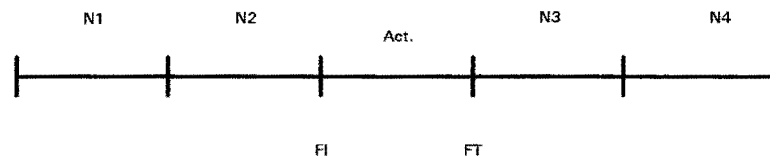


Figura 7.1. Períodos para la toma de datos de accidentes.

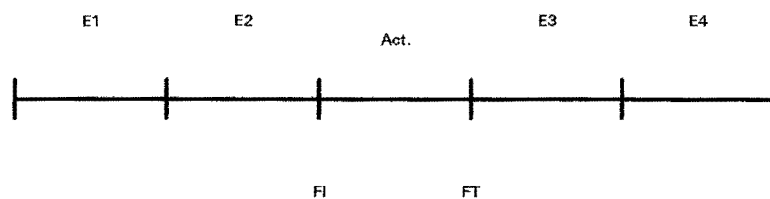


Figura 7.2. Períodos para la toma de datos de la exposición al riesgo.

En estas figuras, FI y FT corresponden respectivamente a las fechas de inicio y terminación de cada actuación, N1 y N2 son el *número de accidentes registrados* en el primer y segundo año anterior a la ejecución de la actuación, siendo N3 y N4 los valores del *número de accidentes registrados* en el primer y segundo año del período posterior a la ejecución de la actuación. E1, E2, E3 y E4 son, por último, las *exposiciones al riesgo* en los mismos períodos de tiempo.

Una vez obtenidos esta información se procedió, a continuación, al examen de los datos de accidentes. Debido a que no se habían registrado accidentes antes y después de las actuaciones, en la mayoría de los tramos de las carreteras pertenecientes a la categoría con una *IMD menor de 1000 v/d*, éstas tuvieron que ser también excluidas del análisis posterior.

Como última observación, cabe mencionar todavía que los datos obtenidos siguiendo estos esquemas son los mismos tanto para realizar la evaluación mediante el método *clásico*, como para realizarla mediante el método *empírico bayesiano*.

7.3.- ANÁLISIS CLÁSICO.

7.3.1.- Evaluación de la efectividad a nivel individual.

A partir de los datos de accidentes agrupados según se mostraba en las figuras 7.1 y 7.2, se calcularon los *índices de peligrosidad* antes y después de cada actuación. Los resultados de dichos cálculos se ofrecen en los anexos 7-A-1 y 7-B-1. El esquema de evaluación utilizado se ilustra en la figura 7.3, donde N_A y N_D son el *número de accidentes registrados* en el período anterior y posterior respectivamente, E_A y E_D son las *exposiciones al riesgo* e I_A y I_D son los *índices de peligrosidad*.

Después de haber calculado los *índices de peligrosidad* antes y después de cada actuación se evaluó, siguiendo la metodología de la figura 7.3, la *efectividad* o *factor de reducción de accidentes* de cada actuación mediante la fórmula 5.1 (anexos 7-A-1 y 7-B-1).

En las tablas 7.1 a 7.4, expuestas más adelante, quedan reflejados los *índices de peligrosidad* estimados antes y después de cada actuación, así como la efectividad de la misma.

Llegado a este punto hay que hacer constar que, para poder realizar la *evaluación de la efectividad*, se ha supuesto que durante el período anterior y posterior a cada actuación el *nivel de falta de registro de accidentes* permanece constante. La evaluación ha sido

realizada de esta manera porque no existe, en nuestro país, ningún dato o estudio objetivo que permita cuantificar la proporción de *falta de registros de accidentes*. Por lo que es obligado dar por buena la hipótesis de que el *nivel de falta de registros de accidentes* se mantiene constante en los períodos de tiempo considerados.

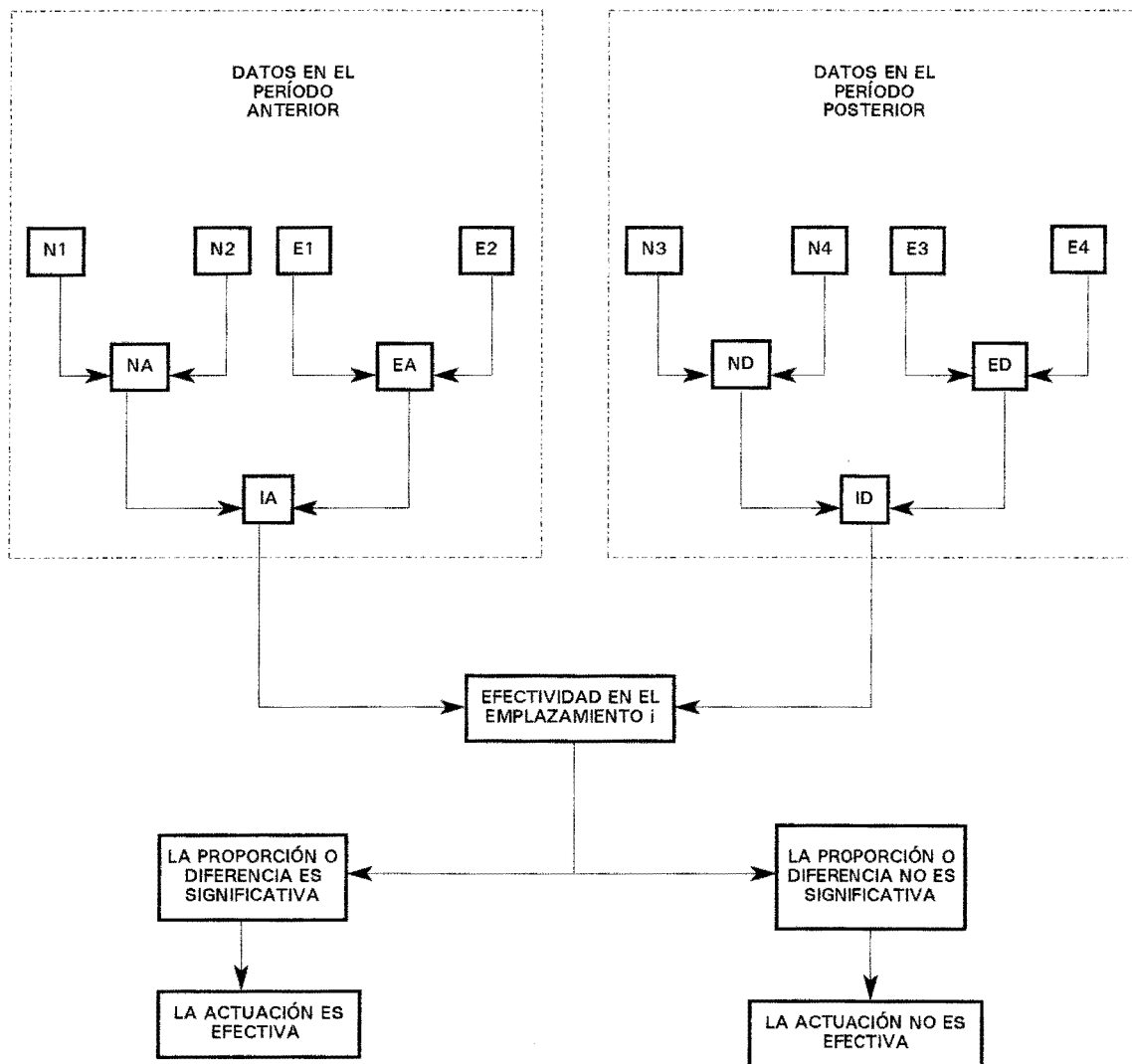


Figura 7.3.- Evaluación de la efectividad mediante el método clásico.

A partir de los resultados de las tablas 7.1 y 7.2 se puede afirmar que la mayoría de las actuaciones de *acondicionamiento* ejecutadas en la Comunidad de Madrid produjeron una *disminución del índice de peligrosidad*. Concretamente, de un total de 75 actuaciones, en 63 de ellas se produjo, en el período posterior a la ejecución de la actuación, una reducción de la peligrosidad y en las 12 restantes un incremento del índice citado.

Con respecto a los *refuerzos de firmes*, tal y como se refleja en las tablas 7.3 y 7.4, de un total de 75 actuaciones, en 37 de ellas se produjo una disminución del índice, en 35 un aumento y en 3 no se registraron accidentes ni antes ni después de la actuación. Evidentemente en esta ocasión no hay una mayoría clara de actuaciones en un sentido u otro, por lo que, a primera vista, de estas cifras no se puede extraer ninguna conclusión sobre su eficacia.

Después de haber evaluado la efectividad de cada actuación, hay que corroborar todavía, haciendo uso de los *contrastos de significación* de los *índices de peligrosidad* explicados en el capítulo 5, que las diferencias observadas en la estimación de la efectividad son *estadísticamente significativas* y no un producto del azar.

7.3.1.1- Aplicación de los contrastes de significación.

En primer lugar se empleó el contraste de las *proporciones o binomial*, haciendo uso de las ecuaciones explicadas en el apartado 5.2.1.1. En el supuesto de que se requiriera contrastar un incremento del *índice de peligrosidad* después de ejecutada la actuación, se utilizaban las expresiones 5.8 y 5.9. Por otro lado, cuando fue necesario contrastar una disminución del *índice de peligrosidad* o, lo que es lo mismo, que la actuación había sido *efectiva*, se utilizaban entonces las expresiones 5.10 y 5.11.

Para llevar a cabo el contraste de las *diferencias de medias*, basado en la distribución *normal*, se utilizó en cambio el estadístico *z*, de la manera que ha sido explicado en el apartado 5.2.1.1 (ecuaciones 5.12 a 5.15).

A continuación se procederá a describir los resultados de los *contrastos de significación*, realizados individualmente para todas y cada una de las actuaciones de *acondicionamiento* y de *refuerzo de firmes*.

- **Resultados de la aplicación de los contrastes de significación en las actuaciones de acondicionamiento.**

En los anexos 7-A-1 y 7-A-2 se presenta el cálculo detallado de los *niveles de significación* de la efectividad de las actuaciones de acondicionamiento que resultan de la aplicación de los contrastes de las *diferencias (PN)* y *binomial (PB)* respectivamente. Del mismo modo, las tablas 7.1 a 7.2 reflejan los *niveles de significación* obtenidos en dichos anexos. Como puede constatarse en dichas tablas, la mayor parte de los *niveles de significación* calculados mediante el contraste *binomial* son ligeramente superiores a los obtenidos con el *normal*. Es decir, al utilizar el contraste *normal* se observa una mayor probabilidad de rechazar la hipótesis nula de la igualdad de los *índices de peligrosidad*.

Resumiendo los resultados de las tablas 7.1 y 7.2 se confeccionó la tabla 7.5. En ella puede verse como, al aplicar el contraste *binomial* con un *nivel de confianza* del 90 %, de las 63 actuaciones de acondicionamiento que produjeron una reducción de la peligrosidad, en 46 de ellas se produjo una disminución *significativa* mientras que en las 17 restantes no se pudo verificar dicha circunstancia. En contraposición, de los 12 tramos en que los que se

observó un incremento de la peligrosidad después de las actuaciones, solamente en 3 de ellos se produjo un incremento que puede ser considerado como *significativo*.

En la tabla 7.5 también se resumieron los resultados obtenidos mediante el contraste *normal*. Para un *nivel de confianza* de un 90 % se volvieron a repetir los resultados obtenidos mediante el contraste *binomial*, lo cual confirma que una mayoría de las actuaciones de *acondicionamiento* produjeron una *disminución significativa* del *índice de peligrosidad*.

- **Resultados de la aplicación de los contrastes de significación en las actuaciones de refuerzo de firmes.**

Con respecto a las actuaciones de *refuerzo de firmes*, el cálculo de los *niveles de significación* mediante los contrastes *normal* y *binomial* queda reflejado en los anexos 7-B-1 y 7-B-2; asimismo se muestran los resultados obtenidos en las tablas 7.3 y 7.4. También en este caso el *nivel de significación* correspondiente al contraste de las *diferencias o normal* es menor que el obtenido mediante el contraste *binomial*. En la tabla 7.6 se ofrece el resumen de los resultados de ambas tablas.

En los 37 tramos donde las actuaciones produjeron una disminución del índice, al utilizar el contraste *binomial* al *nivel de confianza* del 90 %, esta reducción resulta *significativa* en sólo 6 tramos; elevándose a 9 al aplicar el contraste *normal*. En contraposición, de los 35 tramos donde las actuaciones llevan asociado un aumento de la peligrosidad, solamente fue *significativo* este incremento en 7 de ellos utilizando el contraste *binomial* y en 9 casos cuando se aplicó el contraste *normal*.

De lo dicho anteriormente se deduce que en las actuaciones de *refuerzo de firmes* no hay una mayoría clara donde se produzca un aumento o una disminución *significativa* de la peligrosidad en el período posterior. No obstante, este ya era un resultado esperado. Tal y como se explicó en capítulos anteriores, es conocida por los ingenieros de tráfico la dificultad de verificar la *significación* de una reducción o incremento de la accidentalidad en un emplazamiento donde ha sido ejecutada una actuación de mejora de la seguridad en la circulación. Por lo tanto, debido a las bajas frecuencias con las que se opera en estos casos, para llegar a tener un resultado *significativo* desde el punto de vista estadístico habitualmente hay que sumar los efectos de un gran número de actuaciones de un mismo tipo en emplazamientos similares.

Por último, como consecuencia práctica de estos análisis, resulta ampliamente satisfactorio poder confirmar que al realizar actuaciones de *acondicionamiento* en los tramos de carreteras de la Comunidad de Madrid, en la mayor parte de los mismos (61,33 %) se registró una disminución *significativa* de la peligrosidad después de las actuaciones.

7.3.1.2.- Estimación de intervalos de confianza de la diferencia de medias.

Para estimar los *límites superior e inferior de la diferencia de los índices de peligrosidad* antes y después de la actuaciones, se utilizaron las expresiones 5.16 y 5.17 del apartado 5.2.1.2. En este caso se sustituyó en las mismas un valor de z_c igual a 1,28 correspondiente a un *nivel de confianza* de un 90% en un contraste *normal unilateral* (anexos 7-A-1 y 7-B-1).

Los resultados obtenidos al emplear estas expresiones están también reflejados en las tablas 7.1 y 7.2 para los *acondicionamientos* y en las tablas 7.3 y 7.4 en el caso de los

refuerzos. En dichas tablas *LSDM* y *LIDM* son respectivamente los límites superior e inferior de la diferencia de medias. Tal y como puede observarse en ellas, al contrastar de esta manera la efectividad de las actuaciones, los resultados obtenidos coinciden con los del *contraste de significación normal*. Obsérvese como aquellas actuaciones con una *probabilidad* estimada mayor de 0,10 ofrecen un *límite inferior* negativo como resultado.

7.3.1.3.- Estimación de intervalos de confianza de los índices de peligrosidad.

En el apartado 5.2.1.2 se explicó como estimar *intervalos de confianza de la media del número de accidentes registrado* antes y después de las actuaciones aplicando las fórmulas 5.18 y 5.19. Al sustituir en estas fórmulas un valor de z_c igual a 1,645, correspondiente a un *nivel de confianza* de un 90% para un contraste *normal bilateral*, se estiman los *límites superior (NS) e inferior (NI) de la media del número de accidentes registrado*, tanto en el período anterior como posterior a la actuación. Los *límites superiores e inferiores de los índices de peligrosidad* en ambos períodos se calcularon dividiendo los resultados de las ecuaciones 5.18 y 5.19 entre sus correspondientes *exposiciones al riesgo* (anexos 7-A-3 y 7-B-3).

Las estimaciones del *límite superior del índice de peligrosidad* en ambos períodos serán utilizadas posteriormente para evaluar la efectividad de cada actuación en la condición pésima (anexos 7-A-3 y 7-B-3) para comparar después este resultado con el obtenido mediante el método *empírico bayesiano*.

TRAMO	I_A	I_D	$E(\%)$	PB	PN	LSDM	LIDM
M-100/4	0,9451	0,1325	85,98	0,0046	0,0067	1,2332	0,3918
M-102/2	0,5469	0,5111	6,54	0,6617	0,4731	0,7133	-0,6417
M-102/3	0,4167	0,3894	6,54	0,7328	0,4810	0,7572	-0,7028
M-102/4	0,1902	0,1778	6,54	0,7328	0,4809	0,3457	-0,3208
M-103/1	1,0906	0,2662	75,72	0,0171	0,0114	1,2971	0,3637
M-103/3	1,0292	0,4568	55,62	0,0696	0,0535	1,0269	0,1179
M-103/4	0,7485	0,2610	65,13	0,0670	0,0492	0,8652	0,1098
M-103/5	1,1333	0,1917	83,09	0,0749	0,0411	1,6353	0,2481
M-113/4	1,1786	0,1249	89,40	0,0460	0,0639	1,9393	0,1681
M-113/5	1,2693	0,1345	89,40	0,0460	0,0639	2,0885	0,1811
M-123/2	1,4295	0,1861	86,98	0,0499	0,0461	2,1887	0,2980
M-203/1	0,3020	0,1248	58,68	0,0866	0,0618	0,3245	0,0299
M-203/5	0,0466	0,1049	-125,24	0,3896	0,1783	0,1393	-0,0227
M-204/8	0,2003	0,1114	44,40	0,5870	0,3490	0,3823	-0,2044
M-204/9	1,3019	0,7239	44,40	0,5870	0,3490	2,4847	-1,3287
M-204/10	0,3272	0,5060	-54,64	0,3890	0,2764	0,5644	-0,2069
M-204/11	0,7103	1,4066	-98,02	0,1900	0,1183	1,4491	-0,0567
M-206/2	0,6003	0,2509	58,20	0,0849	0,0691	0,6511	0,0477
M-206/3	0,1200	0,0359	70,11	0,3152	0,1806	0,2020	-0,0338
M-217/1	0,4610	0,2317	49,74	0,3702	0,2316	0,6294	-0,1708
M-218/1	0,5942	0,2910	51,03	0,0920	0,0711	0,5677	0,0388
M-218/2	0,1226	0,1439	-17,36	0,5633	0,4120	0,1438	-0,1012
M-219/1	1,3171	0,4446	66,25	0,0915	0,0596	1,5895	0,1556
M-219/2	1,0877	1,0753	1,14	0,4971	0,4968	1,9701	-1,9453
M-219/3	5,7996	0,9205	84,13	0,0293	0,0503	8,6833	1,0750
M-227/1	0,1285	0,7789	-506,08	0,0706	0,0399	1,1256	0,1751
M-227/2	0,5954	1,0826	-81,33	0,4106	0,2590	0,4774	-1,4519
M-233/2	0,6700	0,1391	79,24	0,0986	0,0331	0,9007	0,1611
M-300/1	1,8622	1,1261	39,53	0,0807	0,0624	1,3500	0,1222
M-300/2	2,2772	1,3197	42,05	0,0971	0,0729	1,8000	0,1150
M-300/3	0,4014	0,0884	77,99	0,0751	0,0682	0,5821	0,0440
M-300/4	2,3842	0,2781	88,33	0,0382	0,0427	3,6730	0,5392
M-300/5	0,6460	0,1141	82,33	0,0983	0,0603	0,9704	0,0934
M-300/6	1,4193	0,2508	82,33	0,0983	0,0603	2,1320	0,2051
M-300/7	1,0662	0,4768	55,28	0,0269	0,0232	0,9681	0,2107
M-300/8	1,1446	0,3763	67,12	0,0011	0,0013	1,0953	0,4412
M-301/4	0,2076	1,1367	-447,58	0,0656	0,0200	1,5081	0,3501

Tabla 7.1.- Método clásico. Evaluación de la efectividad en acondicionamientos a nivel individual.

TRAMO	I_A	I_D	E(%)	PB	PN	LSDM	LIDM
M-301/5	2,2983	0,5368	76,65	0,0690	0,0539	3,1640	0,3591
M-301/6	0,3155	0,2873	8,95	0,5643	0,4412	0,2725	-0,2160
M-301/7	0,0693	0,0674	2,83	0,7428	0,4919	0,1257	-0,1218
M-305/3	0,2832	0,5293	-86,89	0,3760	0,2292	0,6709	-0,1787
M-404/1	0,9213	0,3910	57,56	0,0949	0,0667	0,9826	0,0780
M-404/2	1,0023	0,1531	84,72	0,0584	0,0365	1,4555	0,2429
M-404/3	1,6056	0,4730	70,54	0,0605	0,0444	1,9844	0,2808
M-404/7	0,1373	0,2808	-104,53	0,2311	0,1393	0,3131	-0,0260
M-404/9	1,5117	0,6342	58,05	0,4345	0,2401	2,4685	-0,7134
M-404/10	0,5039	0,4228	16,09	0,7043	0,4509	0,9231	-0,7609
M-404/14	0,7106	0,1873	73,65	0,0808	0,0504	0,9316	0,1152
M-408/2	0,4917	0,2004	59,25	0,0956	0,0576	0,5281	0,0546
M-413/2	2,4769	0,6112	75,32	0,0177	0,0221	3,0530	0,6785
M-413/3	0,2819	0,1893	32,86	0,6420	0,3925	0,5272	-0,3420
M-501/4	0,3733	0,0724	80,62	0,0000	0,0001	0,4046	0,1973
M-501/5	0,4302	0,0249	94,20	0,0001	0,0004	0,5612	0,2492
M-501/6	0,0947	0,0771	18,59	0,6070	0,4192	0,1281	-0,0929
M-501/7	0,1548	0,2773	-79,10	0,2004	0,1296	0,2614	-0,0165
M-501/8	0,2348	0,2185	6,96	0,5439	0,4448	0,1669	-0,1343
M-504/1	0,2091	0,1502	28,14	0,5203	0,3657	0,2782	-0,1606
M-504/2	0,6577	0,0806	87,75	0,0011	0,0018	0,8308	0,3234
M-506/10	0,6298	0,3143	50,10	0,0827	0,0588	0,5737	0,0574
M-510/9	1,2693	0,2337	81,59	0,0911	0,0458	1,8214	0,2499
M-511/2	0,8935	0,3393	62,02	0,0641	0,0487	0,9820	0,1263
M-511/4	0,5083	0,0793	84,39	0,0756	0,0536	0,7697	0,0882
M-513/2	0,2232	0,1146	48,65	0,0936	0,0661	0,2009	0,0163
M-515/4	0,3115	0,1245	60,05	0,0645	0,0528	0,3350	0,0391
M-516/1	0,2658	0,0947	64,37	0,0068	0,0064	0,2590	0,0832
M-541/2	0,3347	0,1755	47,56	0,5179	0,2945	0,5363	-0,2180
M-600/5	0,6220	0,2054	66,98	0,0773	0,0477	0,7364	0,0968
M-604/9	4,6902	1,8483	60,59	0,0997	0,0672	5,2717	0,4119
M-608/1	0,4840	1,4651	-202,69	0,3489	0,8045	2,4447	-0,4826
M-608/2	0,1341	1,2172	-807,41	0,0183	0,0177	1,7419	0,4242
M-608/4	0,5165	0,0955	81,50	0,0921	0,0461	0,7409	0,1010
M-608/5	1,4865	0,3815	74,34	0,0877	0,0618	2,0233	0,1867
M-608/6	0,7851	0,0745	90,51	0,0151	0,0239	1,1700	0,2512
M-608/8	1,4526	0,4355	70,02	0,0639	0,0461	1,7901	0,2442
M-608/9	1,6601	0,3871	76,68	0,0574	0,0408	2,2086	0,3375

Tabla 7.2.- Método clásico. Evaluación de la efectividad en acondicionamientos a nivel individual (continuación).

TRAMO	I_A	I_D	$E(\%)$	PB	PN	LSDM	LIDM
M-100/1	0,4594	0,4791	-4,29	0,5351	0,4561	0,2484	-0,2090
M-100/4	0,1323	0,0601	54,61	0,4638	0,2579	0,2148	-0,0703
M-100/5	0,4397	0,5369	-22,10	0,3812	0,3025	0,3376	-0,1433
M-100/6	0,4845	0,2212	54,34	0,0523	0,0429	0,4595	0,0671
M-103/1	0,4300	0,9176	-113,40	0,1935	0,1079	0,9918	-0,0166
M-111/4	0,2872	0,1439	49,88	0,1055	0,0743	0,2700	0,0165
M-121/1	0,4804	0,7381	-53,64	0,2873	0,2064	0,6605	-0,1450
M-203/4	0,3530	0,4046	-14,62	0,4726	0,3832	0,2740	-0,1708
M-206/1	0,0000	0,0000					
M-206/5	0,3710	0,2107	43,19	0,1789	0,1292	0,3417	-0,0212
M-206/6	0,3213	0,2268	29,41	0,2517	0,1946	0,2347	-0,0457
M-206/7	0,3139	0,1020	67,52	0,3029	0,1541	0,4781	-0,0542
M-219/3	0,7993	0,5600	29,94	0,5092	0,3566	1,0728	-0,5942
M-219/4	0,6177	0,5770	6,58	0,5853	0,4621	0,5877	-0,5064
M-233/2	0,0000	0,0000					
M-301/2	0,4422	0,1309	70,39	0,0439	0,0415	0,5410	0,0815
M-301/3	0,6873	0,3844	44,07	0,3256	0,2121	0,7882	-0,1823
M-301/4	0,1298	0,1102	15,07	0,7076	0,4543	0,2375	-0,1984
M-301/5	0,7354	0,2082	71,69	0,2540	0,1325	1,1325	-0,0781
M-307/2	0,3784	0,1639	56,70	0,1106	0,0633	0,3942	0,0349
M-311/1	0,2269	0,1185	47,76	0,3645	0,2212	0,2889	-0,0722
M-313/5	0,6831	0,8623	-26,22	0,5216	0,3727	0,8852	-0,5269
M-405/1	0,6361	0,9098	-43,03	0,1499	0,1114	0,5611	-0,0137
M-501/1	0,2688	0,3294	-22,55	0,3125	0,2567	0,1793	-0,0581
M-501/2	1,2772	0,7096	44,44	0,1041	0,0774	1,0782	0,0571
M-501/10	0,2188	0,2745	-25,42	0,4576	0,3432	0,2321	-0,1208
M-501/11	0,3771	0,4953	-31,36	0,2273	0,1822	0,2851	-0,0487
M-501/12	0,0884	0,4655	-81,00	0,0869	0,0149	0,5992	0,1550
M-501/13	0,0575	0,1316	-128,81	0,4196	0,2186	0,1962	-0,0480
M-501/14	0,0932	0,1156	-19,32	0,6729	0,4286	0,1810	-0,1364
M-501/15	0,1595	0,3182	-99,50	0,5009	0,2825	0,5118	-0,1943
M-504/2	0,0422	0,1848	-77,16	0,1436	0,0622	0,2614	0,0238
M-505/6	0,6446	0,4476	30,56	0,1252	0,1022	0,3957	-0,0017
M-505/7	0,9827	1,8050	-83,67	0,1053	0,0814	1,5764	0,0681
M-506/9	0,3626	0,5106	-40,84	0,2682	0,1998	0,3731	-0,0769
M-506/10	0,5134	0,3588	30,10	0,2006	0,1597	0,3532	-0,0442
M-506/11	0,5257	0,0691	86,85	0,0270	0,0150	0,7258	0,1873

Tabla 7.3.- Método clásico. Evaluación de la efectividad en refuerzos a nivel individual.

TRAMO	I_A	I_D	E(%)	PB	PN	LSDM	LIDM
M-507/2	0,0771	0,7160	-828,72	0,0001	0,0002	0,8657	0,4120
M-507/3	0,1076	0,6435	-83,28	0,0509	0,0166	0,8581	0,2138
M-510/4	0,5740	0,1607	72,01	0,0947	0,0562	0,7467	0,0800
M-511/2	0,1632	0,8582	-80,99	0,0686	0,0174	1,1166	0,2735
M-511/3	0,7579	3,9865	-80,99	0,0686	0,0174	5,1868	1,2706
M-519/1	0,7215	0,6467	10,36	0,6825	0,4114	0,5023	-0,3527
M-527/1	0,2406	0,2333	3,01	0,6419	0,4851	0,2549	-0,2404
M-528/1	1,2753	0,6635	47,97	0,1777	0,1190	1,2753	-0,0518
M-533/1	0,4850	0,4260	12,15	0,5413	0,4191	0,4285	-0,3106
M-536/1	0,2299	0,3623	-36,56	0,8057	0,3502	0,5730	-0,3081
M-600/1	0,4957	0,1954	60,57	0,2404	0,1450	0,6634	-0,0629
M-600/2	0,4446	0,1270	71,56	0,2555	0,1331	0,6875	-0,0483
M-600/3	0,4637	0,3332	28,16	0,2089	0,1669	0,3037	-0,0426
M-600/7	0,1415	0,0568	59,83	0,2478	0,1491	0,1886	-0,0193
M-600/8	0,5106	0,4109	19,53	0,3941	0,3152	0,3652	-0,1657
M-600/9	0,0893	0,0816	8,64	0,7269	0,4746	0,1624	-0,1470
M-600/10	0,3450	0,1076	68,81	0,0394	0,0308	0,3998	0,0750
M-601/1	0,5351	0,1953	63,51	0,0123	0,0011	0,5486	0,1311
M-601/2	0,3263	0,4454	-36,51	0,4044	0,2964	0,4043	-0,1661
M-601/3	0,2220	0,3289	-48,13	0,3333	0,2350	0,2962	-0,0824
M-604/1	0,4397	0,3261	25,84	0,5498	0,3702	0,5526	-0,3253
M-604/2	0,3291	0,9877	-200,13	0,0796	0,0488	1,1675	0,1498
M-604/3	1,5423	2,4257	-57,28	0,5892	0,3509	3,8360	-2,0690
M-604/4	1,7626	2,0794	-17,98	0,6110	0,4274	2,5319	-1,8982
M-604/5	0,4113	0,8095	-96,83	0,3352	0,1956	0,9926	-0,1962
M-604/6	0,2742	0,8634	-214,93	0,2707	0,1246	1,2439	-0,0654
M-604/7	0,7257	1,1416	-57,30	0,5892	0,3508	1,8053	-0,9736
M-604/8	1,2338	1,9406	-57,29	0,5892	0,3509	3,0688	-1,6552
M-604/10	0,5070	1,2964	-155,67	0,0734	0,0404	1,3679	0,2107
M-604/12	0,0000	0,0000					
M-607/7	0,3085	0,2789	9,59	0,6948	0,3591	0,1344	-0,0752
M-607/8	0,3909	0,3413	12,71	0,5603	0,4241	0,3818	-0,2824
M-607/9	0,8447	0,6256	25,94	0,3714	0,2825	0,7067	-0,2684
M-611/1	0,4624	0,2833	38,74	0,2016	0,1483	0,3990	-0,0407
M-611/2	0,5041	1,7945	-256,00	0,1584	0,1194	2,6928	-0,1120
M-611/3	0,3259	0,1867	42,70	0,2085	0,1472	0,3090	-0,0307
M-618/2	1,2491	1,3163	-5,38	0,5083	0,4393	0,6307	-0,4962
M-626/1	0,9599	0,9878	-2,90	0,6210	0,4839	0,9094	-0,8536

Tabla 7.4.- Método clásico. Evaluación de la efectividad en refuerzos a nivel individual (continuación).

<i>Hipótesis.</i>	<i>Actuaciones</i>	<i>Significativo al 90%.</i>		<i>No significativo al 90%.</i>	
		<i>BINOMIAL</i>	<i>NORMAL</i>	<i>BINOMIAL</i>	<i>NORMAL</i>
<i>Disminución del índice</i>	63	46	46	17	17
<i>Incremento del índice</i>	12	3	3	9	9

Tabla 7.5. Resumen de los contrastes de significación en acondicionamientos.

<i>Hipótesis.</i>	<i>Actuaciones</i>	<i>Significativo al 90%.</i>		<i>No significativo al 90%.</i>	
		<i>BINOMIAL</i>	<i>NORMAL</i>	<i>BINOMIAL</i>	<i>NORMAL</i>
<i>Disminución del índice</i>	37	6	9	31	28
<i>Incremento del índice</i>	35	7	9	28	26

Tabla 7.6. Resumen de los contraste de significación en refuerzos.

7.3.2.- Evaluación de la efectividad en el conjunto de actuaciones.

7.3.2.1.- Evaluación de la efectividad sin corrección de la tendencia temporal.

En el apartado anterior se evaluó la efectividad, a nivel individual, de cada una de las actuaciones de *acondicionamiento* y *refuerzo*. En éste se va a realizar la evaluación de la efectividad considerando el efecto producido en el conjunto de actuaciones. Para ello se utilizará la fórmula 5.20, que ya fue explicada en el apartado 5.2.2 del capítulo anterior.

A continuación se procederá a evaluar primero la efectividad en el conjunto de actuaciones de *acondicionamiento* y después se evaluarán las actuaciones de *refuerzo*.

• Resultado de la evaluación de la efectividad al conjunto de actuaciones de acondicionamiento.

En el anexo 7-A-1 se presenta la estimación de la efectividad del conjunto de las actuaciones de *acondicionamiento*. En él puede observarse que el valor de la efectividad de dichas actuaciones es de un 55,36%. Esto quiere decir que, en conjunto, se aprecia que las actuaciones de *acondicionamiento* redujeron la peligrosidad - en aquellos tramos donde fueron ejecutadas - en un 55,36%. Sin embargo, como se sabe, queda todavía por verificar que ese valor de la efectividad es *significativo* desde el punto de vista estadístico y, que por lo tanto, la reducción de la peligrosidad es atribuible a la ejecución de dichas actuaciones.

Para llevar a cabo este cometido, se hizo uso del *teorema central del límite* en la forma explicada en el apartado 5.2.2. Además, como también se explicó en dicho apartado, se analizó qué tipo de *función de distribución* sigue la variable aleatoria correspondiente a

los *índices de peligrosidad* antes y después de la actuaciones en los diversos tramos de carretera.

En el apartado 5.2.2 se había asumido la hipótesis de que esta variable se regía de acuerdo a una función de distribución *Gamma*. Para confirmar esta hipótesis hubo que estimar los parámetros de la función de densidad utilizando el *método de los momentos* y el *método de la máxima verosimilitud*. Por último, se comprobó la *bondad del ajuste* de la mencionada función de densidad, estimada mediante el *método de la máxima verosimilitud*.

Para conocer los valores de los parámetros, éstos se estimaron aplicando, en primer lugar, el *método de los momentos* en los períodos anterior y posterior a la ejecución de las actuaciones. A tal fin, se calcularon la media y la varianza del conjunto de actuaciones de *acondicionamiento* para poder resolver el sistema de ecuaciones 5.24 y 5.25 explicadas en el capítulo 5. En segundo lugar se empleó el *método de la máxima verosimilitud* resolviendo iterativamente el sistema de ecuaciones 5.27 a través de la utilización del programa de cálculo Mathcad plus 5.0.

En el anexo 7-A-1 se presenta la estimación de los parámetros para cada uno de los períodos, recurriendo al *método de los momentos*. Por otra parte, en el anexo 7-A-4 puede observarse cómo se realizaron las estimaciones de los parámetros de la función de densidad en el período *anterior* y *posterior* a las actuaciones de *acondicionamiento* utilizando el método de la *máxima verosimilitud*.

Los resultados de las estimaciones del período anterior y posterior, empleando los métodos referidos se reflejan en la siguiente tabla:

	PERÍODO ANTERIOR		PERÍODO POSTERIOR	
	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD
ι	1,0060	1,4660	2,6263	3,4450
κ	0,8961	1,3058	1,0443	1,3696

Tabla 7.7. Valores de los parámetros en acondicionamientos.

Como puede observarse, los dos métodos producen estimaciones diferentes. El *método de los momentos* es de aplicación más sencilla; pero, desde el punto de vista estadístico, produce estimaciones peores que el *método de la máxima verosimilitud*. Dado que este último método produce estimaciones más precisas y proporciona valores más centrados, se tomaron como válidas las generadas por el mismo.

Una vez estimados los parámetros de la función de densidad *Gamma* en el período anterior a la ejecución de las actuaciones, se comprobó a continuación la *bondad del ajuste* de dicha función de densidad mediante los test *chi-cuadrado* y de *Kolmogorov-Smirnov* (anexo 7-A-4). Como resultado del test *chi-cuadrado* se obtuvo un valor igual a 0,6408 con 4 *grados de libertad* y un *nivel de significación* de 0,9584. El test de *Kolmogorov-Smirnov* dio un estadístico *DN* igual a 0,0664 con un *nivel de significación* de 0,8954. En vista de estos resultados, se pudo aceptar como válida la hipótesis de que la muestra procedía de una función de densidad *Gamma*.

Al aplicar nuevamente los contrastes de *bondad del ajuste* al período posterior a las actuaciones, los resultados fueron, en el caso del test *chi-cuadrado*, un valor de 7,0836 para

5 grados de libertad con un nivel de significación de 0,2145. En el test de Kolmogorov-Smirnov el resultado del estadístico *DN* fue 0,1078 con un nivel de significación de 0,3475 (anexo 7-A-4). Dados estos resultados, en este caso también se aceptó la hipótesis de la función de densidad *Gamma*. En el cuadrado 7.8 de esta página se presenta un resumen de los resultados obtenidos mediante la aplicación de los test *chi-cuadrado* y de *Kolmogorov-Smirnov*.

Por otra parte, las figuras 7.4 y 7.5 muestran las funciones de distribución o de la probabilidad acumulada de las funciones de densidad *Gamma*, ajustadas a la probabilidad acumulada de los *índices de peligrosidad*.

PERÍODO	PARÁMETROS		CONTRASTE CHI-CUADRADO			CONTRASTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	
	κ	ι	Resultado	Grados de libertad	Nivel de significación	DN	Nivel de significación
ANTERIOR	1,3058	1,4660	0,6408	4	0,9584	0,0664	0,8954
POSTERIOR	1,3696	3,4450	7,0836	5	0,2144	0,1078	0,3475

Tabla 7.8. Resumen de los contrastes de bondad del ajuste en acondicionamientos.

Una vez confirmado que se puede asumir que, tanto para el período anterior como para el posterior a la ejecución de las actuaciones de *acondicionamiento* de carreteras, la variable aleatoria correspondiente a los *índices de peligrosidad* sigue una función de densidad *Gamma*, el siguiente paso es contrastar que la *diferencia de medias* de los *índices de peligrosidad* antes y después es *significativa*. En el apartado 5.2.2 se había explicado

que cuando un conjunto de variables aleatorias tienen una función de densidad idéntica y una media y varianza común, el *teorema central del límite* permitía aproximar la variable aleatoria correspondiente a la suma de las variables aleatorias independientes mediante una distribución *normal estándar*. En consecuencia, se podía utilizar el test de la *t de Student* para muestras pareadas como estadístico de contraste de la significación de la diferencia de medias entre los índices de peligrosidad (ecuación 5.21).

Antes de llevar cabo el contraste de la *t de Student*, es recomendable asegurar que los índices de peligrosidad antes y después de las actuaciones son variables aleatorias independientes. En el anexo 7-A-5 se presenta el resultado del *coeficiente de correlación de Pearson* entre los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones. Dicho resultado fue de 0,4557 y, por lo tanto, no se puede aceptar la hipótesis de la independencia de las variables aleatorias. En vista de ello, cabe utilizar el test *t de Student* para muestras pareadas.

Las medias de los *índices de peligrosidad* en el conjunto de tramos de carreteras antes y después de las actuaciones, son respectivamente 0,8908 y 0,3976, siendo los valores de las varianzas 0,8855 y 0,1514. Para poder realizar el test *t de Student* hay que estimar primero la covarianza y sustituir después el valor obtenido en la expresión 5.22 para estimar S_B^2 . En el anexo 7-A-5 puede verse que la estimación de la covarianza dio un resultado de 0,1668. A continuación se estimó un valor de S_B^2 igual a 1,0414. Al sustituir estos valores en la fórmula del estadístico *t de Student* se obtuvo un valor de $t = 4,1854$. Por otro lado, consultando la tabla de la *t de Student* se obtiene que el *valor crítico* t_c , con 74 *grados de libertad* y un *nivel de confianza* de un 95%, es igual a 1,67. En consecuencia, dado que t es mayor que t_c se rechaza la *hipótesis nula* y se puede concluir, por tanto, que las actuaciones de *acondicionamiento* son *efectivas* en la reducción del *índice de peligrosidad*.

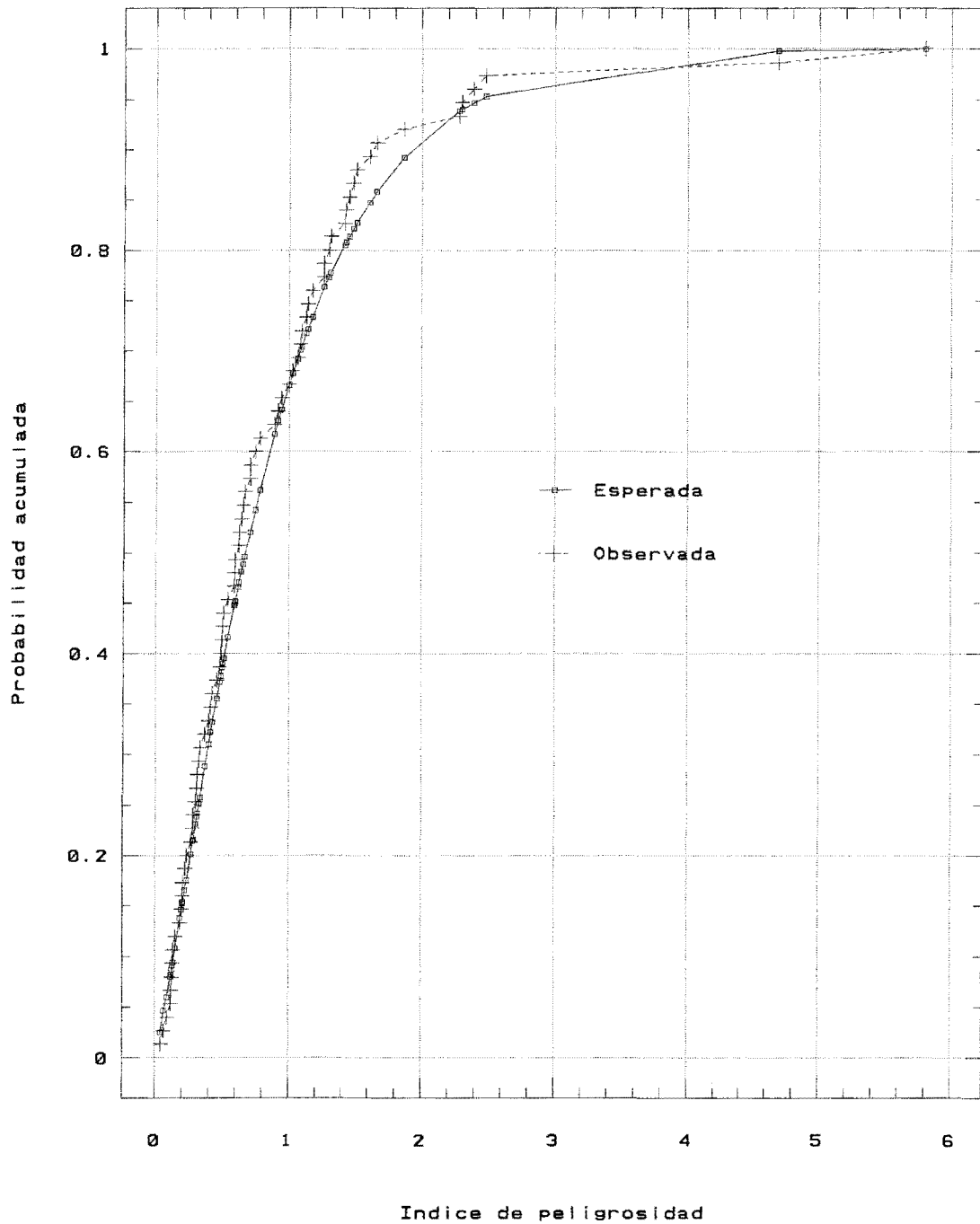


Figura 7.4.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad en el período *anterior* a las actuaciones de *acondicionamiento*.

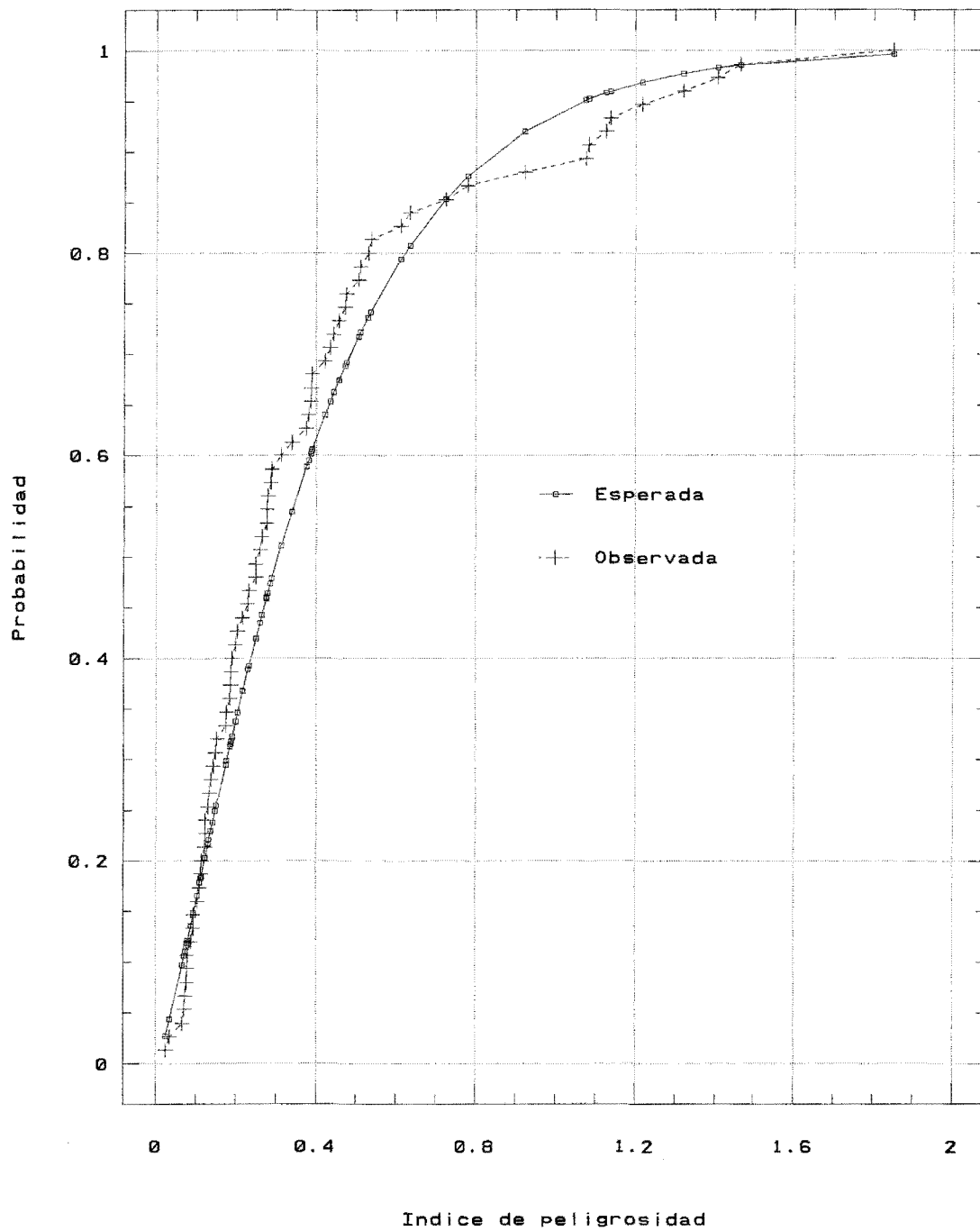


Figura 7.5.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad en el período *posterior* a las actuaciones de *acondicionamiento*.

• **Resultado de la evaluación de la efectividad al conjunto de actuaciones de refuerzo.**

Para poder evaluar las actuaciones de *refuerzo de firmes* hay que repetir los mismos pasos que en las actuaciones de acondicionamiento. En este caso, la efectividad del conjunto de actuaciones de *refuerzo de firmes*, evaluada empleando la ecuación 5.20, es de un -20,98% o, lo que es lo mismo, dichas actuaciones incrementaron, en conjunto, la peligrosidad de los tramos de carretera donde fueron ejecutadas en un 20,98%.

En la tabla 7.9 se pueden observar los valores de los parámetros de la función de densidad *Gamma* antes y después de la ejecución de las actuaciones de *refuerzo*, estimados empleando el *método de los momentos* y el *método de la máxima verosimilitud*. Al igual que se hizo con las actuaciones de *acondicionamiento*, se adoptaron, por ser los más adecuados, los valores de los parámetros estimados mediante el *método de la máxima verosimilitud*. En los anexos 7-B-1 y 7-B-4 pueden verse las estimaciones de los parámetros empleando ambos métodos.

	PERÍODO ANTERIOR		PERÍODO POSTERIOR	
	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD
ι	3,7157	4,2560	1,3721	2,1820
κ	1,7587	2,0980	0,7857	1,3012

Tabla 7.9. Valores de los parámetros en *refuerzos*.

Al comprobar la *bondad del ajuste* en el período anterior, el resultado del contraste *chi-cuadrado* fue de 10,1357 para 6 *grados de libertad* y un *nivel de significación* de 0,1190. En el contraste mediante el test de *Kolmogorov-Smirnov* se obtuvo un valor $DN = 0,0850$ y un *nivel de significación* de 0,6751, con lo cual, se aceptó la bondad de dicho ajuste. Los valores obtenidos en el período posterior fueron en el test *chi-Cuadrado* 3,6880 con 4 *grados de libertad* y un *nivel de significación* de 0,4498. Para el test de *Kolmogorov-Smirnov* se obtuvo un valor $DN = 0,0784$ y un *nivel de significación* de 0,8144, por lo que se volvió a aceptar la bondad del ajuste (anexo 7-B-4).

En la tabla 7.10 está expuesto un resumen con los valores de los parámetros y los resultados de los *contrastos de bondad del ajuste* de la función de densidad *Gamma* en los períodos anterior y posterior a las actuaciones de *refuerzo de firmes* de carreteras con una sola calzada en la Comunidad de Madrid.

PERÍODO	PARÁMETROS		CONTRASTE CHI-CUADRADO			CONTRASTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	
	κ	ι	Resultado	Grados de libertad	Nivel de significación	DN	Nivel de significación
ANTERIOR	2,0980	4,2560	10,1357	6	0,1190	0,0850	0,6751
POSTERIOR	1,3012	2,1820	3,6880	4	0,4498	0,0748	0,8144

Tabla 7.10. Resumen de los contrastes de bondad del ajuste en *refuerzos*.

Por otra parte, las figuras 7.6 y 7.7 representan las funciones de distribución *Gamma*, en los mismos períodos, ajustadas a la probabilidad acumulada de los *índices de peligrosidad*.

Después de haber aceptado la *bondad del ajuste* y dar por buena la hipótesis de que los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones de *refuerzo de firmas* siguen una función de densidad *Gamma*, hay que proceder a realizar el contraste de hipótesis mediante el test *t de Student*.

En primer lugar se calculó el *coeficiente de correlación de Pearson* para ver el grado de correlación existente entre los *índices de peligrosidad*, dando éste un resultado de 0,5936, por lo que estos índices de peligrosidad no pueden considerarse independientes. Las medias de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones de *refuerzo de firmas* son, respectivamente, 0,4930 y 0,5965. Las varianzas estimadas fueron 0,1230 y 0,4205. La covarianza es igual a 0,13497 (ver anexo 7-B-5). Por lo tanto, aplicando el test estadístico *t de Student* para muestras pareadas se obtiene un resultado del contraste igual a -1,1871. Buscando el *valor crítico t_c* en la tabla de la *t de Student* se obtiene un valor de -1,67 para 71 *grados de libertad* y un *nivel de confianza* de un 95%; por lo tanto, no se puede rechazar la *hipótesis nula* de la igualdad de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones de *refuerzo de firmas*. Es decir, no se puede afirmar que, tomadas en su conjunto, el incremento del *índice de peligrosidad* registrado después de las actuaciones de *refuerzo de firme* sea debido a la ejecución de las mismas.

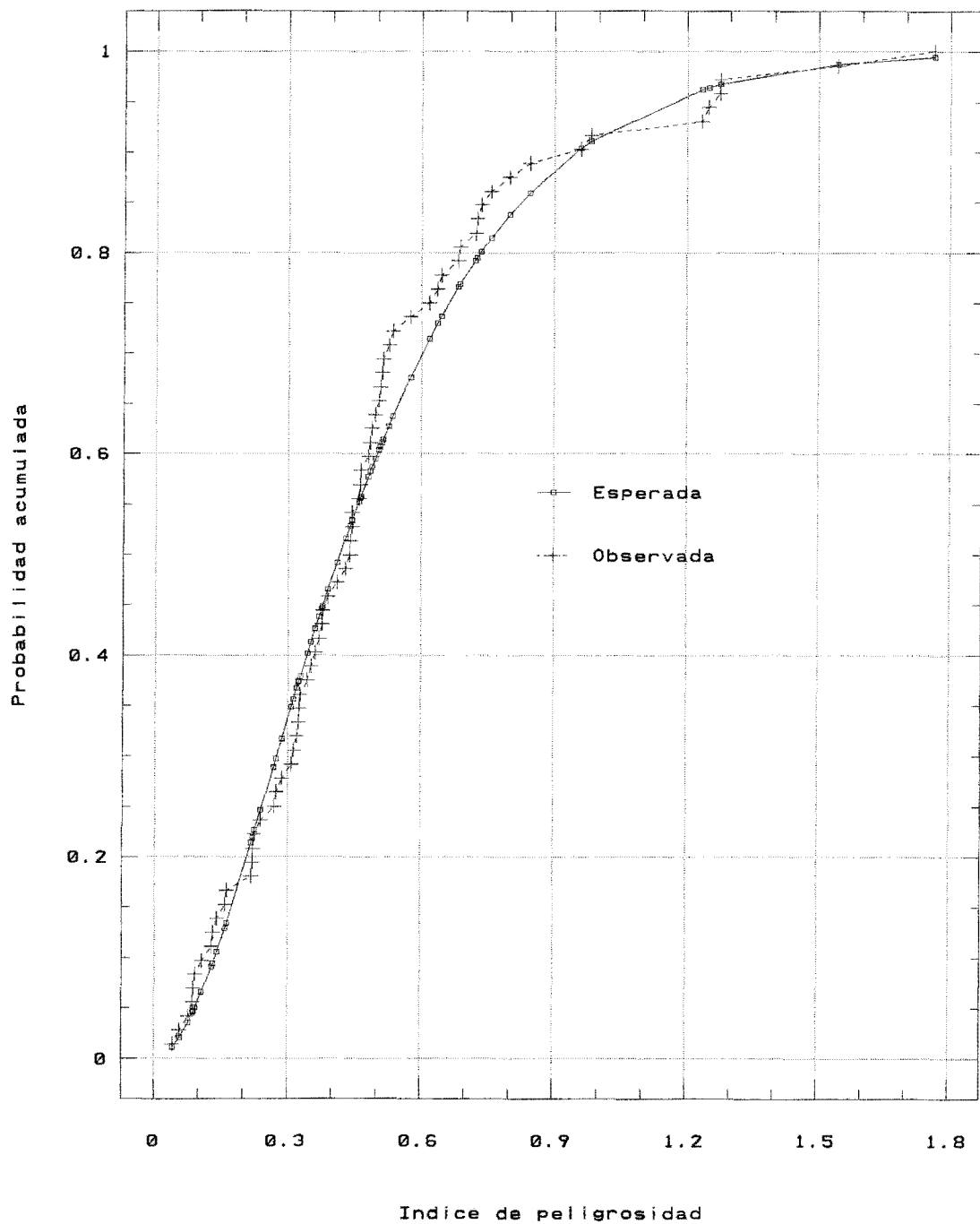


Figura 7.6.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad en el período anterior a las actuaciones de refuerzo.

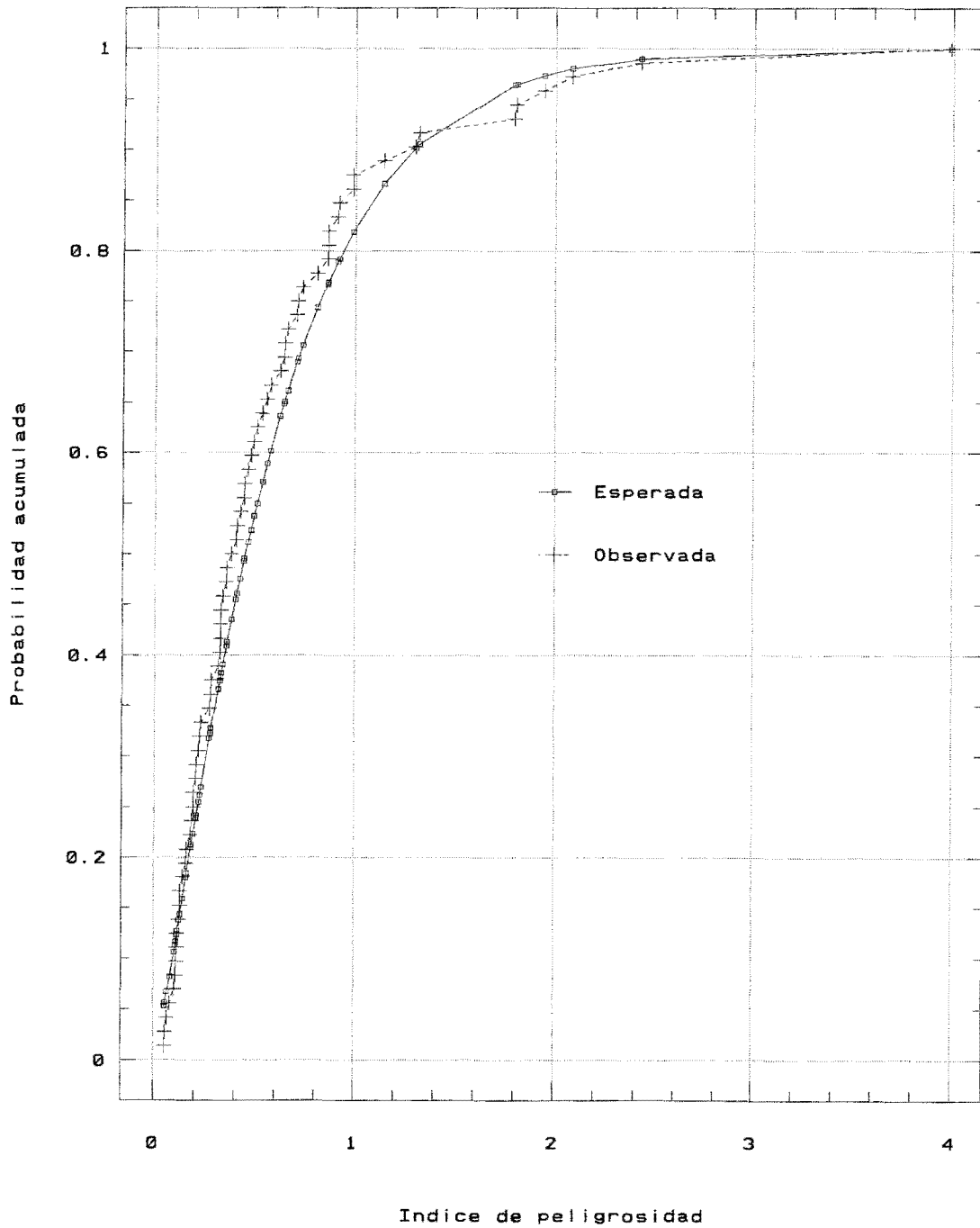


Figura 7.7.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de perigosidade en el período *posterior* a las actuaciones de *refuerzo*.

7.3.2.2.- Evaluación de la efectividad con corrección de la tendencia temporal.

En el epígrafe anterior se evaluó la efectividad del conjunto de las actuaciones de *acondicionamiento* y *refuerzo de firmes*, pero no se ha tenido en cuenta que en el período de tiempo desde el año 1983 a 1995, durante el cual se tomaron los datos de accidentes, se había producido una *tendencia temporal* en la accidentalidad de la Red de Carreteras de la Comunidad de Madrid. A consecuencia de esa *tendencia*, con independencia de estas actuaciones, en los tramos donde se produjeron las mismas y a causa de otros tipos de medidas ha habido una evolución de la accidentalidad que se refleja en una mejora o empeoramiento de la seguridad de la red de carreteras en su conjunto. Es por ello que se hace necesario corregir el *índice de peligrosidad* obtenido antes y después de las actuaciones, con el objetivo de que, cuando se estime la efectividad de las actuaciones de *acondicionamiento* o *refuerzo*, no se tenga en cuenta la parte proporcional correspondiente al conjunto de medidas a las que se hacía referencia con anterioridad.

Al analizar la frecuencia anual de accidentes registrados en el conjunto de las carreteras de la Comunidad de Madrid se observa que, desde el año 1983 hasta el año 1989, se produjo un incremento del número anual de accidentes (figura 7.8). Sin embargo, en el año 1990 cambia esta *tendencia* y se observa una disminución del número anual de accidentes. Para corregir el *índice de peligrosidad* antes y después de cada actuación de acuerdo a la evolución de esta *tendencia temporal* de la accidentalidad, hay que hacer uso del *factor de ponderación* de la ecuación 5.29 explicada en el apartado 5.2.3.

Después de estimar los *índices de peligrosidad* ponderados antes y después de las actuaciones utilizando el *factor* mencionado (ver los anexos 7-C-1 y 7-D-1), hay que repetir los mismos pasos dados en el apartado 7.3.2.1.

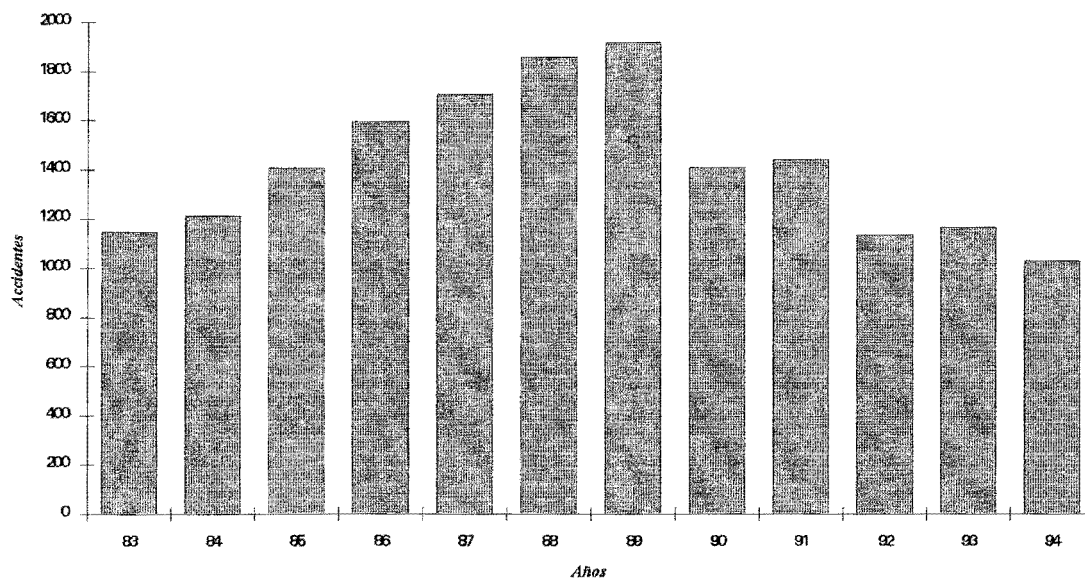


Figura 7.8. Evolución del número anual de accidentes en la Comunidad de Madrid.

A continuación se presentan los resultados de la evaluación de la efectividad de las actuaciones de *acondicionamiento* con los *índices de peligrosidad* corregidos, en los períodos anterior y posterior, de acuerdo con esta *tendencia temporal* de la accidentalidad en la Comunidad de Madrid y más adelante se presentarán los resultados de las actuaciones de *refuerzo de firmes*.

- **Resultado de la evaluación de la efectividad al conjunto de actuaciones de acondicionamiento con corrección de la tendencia temporal.**

Al evaluar la efectividad en el conjunto de las actuaciones se obtuvo como resultado que ésta era igual a un 54,51% (anexo 7-C-1). Comparando este resultado con la efectividad estimada sin tener en cuenta la corrección de la *tendencia temporal*, se ve que la diferencia entre ambos valores es mínima. Una explicación de ello es que la similitud entre

ambos resultados se debe a que el incremento del número anual de accidentes observados desde el año 1983 hasta el 1989, y del decremento registrado a partir del año 1990 se compensan, lo cual repercute en el cálculo del *factor de ponderación*.

Acto seguido se estimaron los valores de los parámetros de la función de densidad *Gamma*. En el anexo 7-C-1 se ofrece la estimación de los parámetros antes y después de la ejecución de las actuaciones mediante el *método de los momentos*. En el anexo 7-C-2 está reflejada, en cambio, la estimación de los parámetros utilizando el *método de la máxima verosimilitud*. El resumen de los valores de los parámetros mediante los dos métodos y en ambos períodos de tiempo es la siguiente:

	PERÍODO ANTERIOR		PERÍODO POSTERIOR	
	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD
λ	0,8541	1,3800	2,5285	3,5700
κ	0,7257	1,1726	0,9773	1,3798

Tabla 7.11. Valores de los parámetros en ambos período en *acondicionamientos* con corrección de la *tendencia temporal*.

Una vez estimados los parámetros y después de haber adoptado los obtenidos mediante el *método de la máxima verosimilitud* hay que contrastar la *bondad del ajuste* de la función de densidad *Gamma*. Estos contrastes están reflejados en el anexo 7-C-2.

En el período anterior el *test chi-cuadrado* dio un resultado de 3,3530 con 3 *grados de libertad* y un *nivel de significación* de 0,3403. El *test de Kolmogorov-Smirnov* dio un estadístico *DN* igual a 0,0823 con un *nivel de significación* de 0,6891. A la vista de tales resultados se decidió aceptar como válida la hipótesis de la función de densidad *Gamma* en el período anterior. En el período posterior, en cambio, el *test chi-cuadrado* dio un resultado de 9,2989 con un *nivel de significación* de 0,0977. Al realizar el *test de Kolmogorov-Smirnov* el estadístico *DN* resulta ser igual a 0,1154 con un *nivel de significación* de 0,2706. Ante estos resultados, se decidió aceptar la hipótesis de la función de densidad *Gamma* para el período posterior. En el siguiente cuadro se ofrecen los valores obtenidos al realizar ambos contrastes.

PERÍODO	PARÁMETROS		CONTRASTE CHI-CUADRADO			CONTRASTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	
	κ	t	Resultado	Grados de libertad	Nivel de significación	DN	Nivel de significación
ANTERIOR	1,1726	1,3800	3,3530	3	0,3403	0,0823	0,6891
POSTERIOR	1,3798	3,5700	9,2989	5	0,0977	0,1154	0,2706

Tabla 7.12. Resumen de los contrastes de bondad del ajuste en *acondicionamientos* con corrección de la *tendencia temporal*.

Después de aceptar la hipótesis de que los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones de *acondicionamiento* siguen una función de densidad *Gamma*, se procedió a estudiar la relación existente entre ambos índices. La correlación entre esas variables es igual a 0,3296 (anexo 7-C-3), lo cual lleva a rechazar la hipótesis de independencia. A continuación se calculó la covarianza, arrojando esta un valor de 0,1285. Como se sabe,

para poder aplicar el test estadístico de la *t de Student* para muestras pareadas, hay que comparar la media antes de la actuación con la media después de la misma, siendo los valores de éstas iguales a 0,8497 y 0,3865 respectivamente. Por otro lado, las varianzas de ambas muestras son 0,9949 y 0,1528. Con todos estos datos se estimó S_B^2 , dando un resultado de 1,1513. Posteriormente se obtuvo el estadístico *t de Student* que resultaba ser igual a 3,6377. El *valor crítico* en la tabla *t de Student* es 1,67. Por lo tanto, en consonancia con tales resultados, se puede afirmar que las actuaciones de *acondicionamiento* son *efectivas* en la reducción de la accidentalidad. Esta conclusión era de esperar ya que los valores de la efectividad en el conjunto de actuaciones de *acondicionamiento*, en los casos con y sin corrección de la tendencia temporal, son muy parecidos.

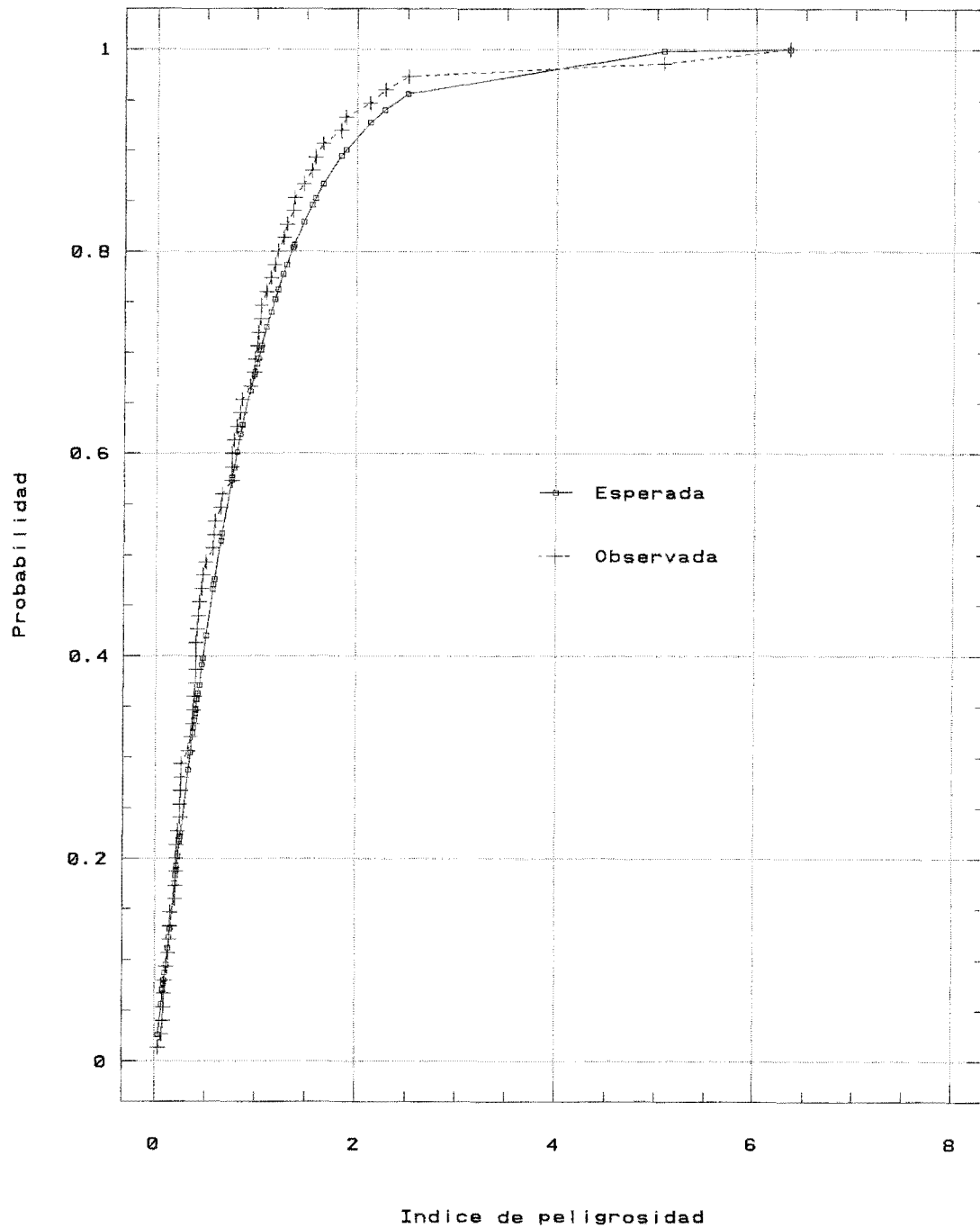


Figura 7.9.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad ponderados en el período anterior a las actuaciones de *acondicionamiento*.

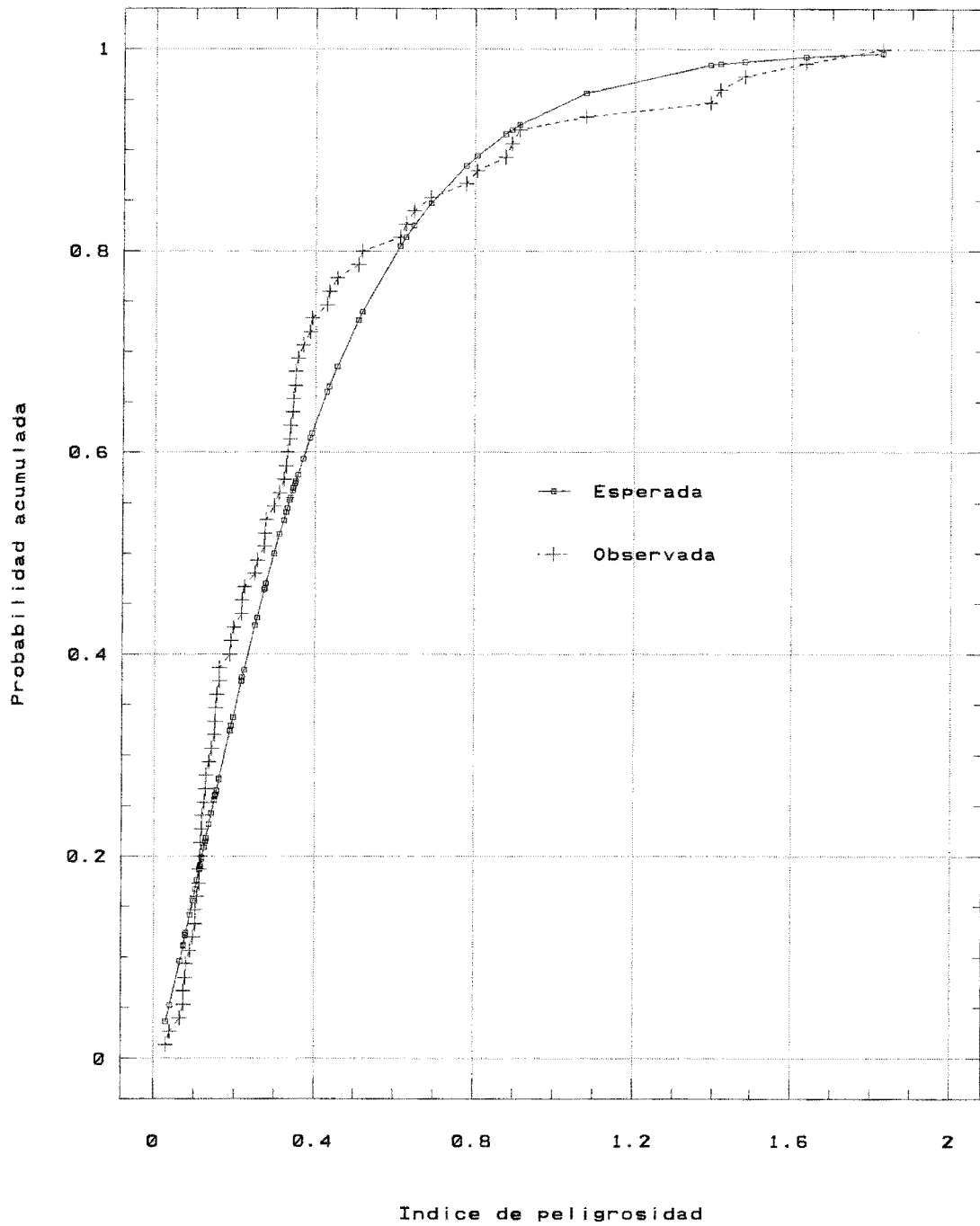


Figura 7.10.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de perigosidade ponderados en el período *posterior* a las actuaciones de *acondicionamiento*.

• **Resultado de la evaluación de la efectividad al conjunto de actuaciones de refuerzos de firme con corrección de la tendencia temporal.**

Por último, en los *refuerzos de firmes*, el resultado de la efectividad después de la corrección de *tendencia* fue de -21,70%. Nuevamente la diferencia con respecto al resultado que se obtuvo al no corregir la *tendencia temporal* es aquí también muy pequeña. De todas maneras se volvió a repetir el análisis descrito (anexos 7-D-1 y 7-D-2). Los resultados de las estimaciones de los parámetros se representan en la tabla 7.13.

	PERÍODO ANTERIOR		PERÍODO POSTERIOR	
	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD
ι	3,4179	4,2830	1,7407	2,7330
κ	1,5050	1,9645	0,9328	1,5257

Tabla 7.13. Valores de los parámetros en ambos período en *refuerzos* con corrección de la *tendencia temporal*.

Como se puede observar en el anexo 7-D-2, los resultados de los contrastes de *bondad del ajuste* de las funciones de densidad *Gamma* en ambos períodos, fueron satisfactorios. Estos resultados se detallan en la siguiente tabla:

PERÍODO	PARÁMETROS		CONTRASTE CHI-CUADRADO			CONTRASTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	
	κ	t	Resultado	Grados de libertad	Nivel de significación	DN	Nivel de significación
ANTERIOR	1,9645	4,2830	2,8991	5	0,7155	0,0711	0,8591
POSTERIOR	1,5257	2,7330	3,7233	4	0,4447	0,0945	0,5409

Tabla 7.14. Resumen de los contrastes de bondad del ajuste en refuerzos con corrección de tendencia.

En este caso la medias antes y después de las actuaciones de *refuerzo de firmas* son 0,4587 y 0,5582 respectivamente. El *coeficiente de correlación de Pearson* es igual a 0,6669; es decir, existe dependencia entre las variables. Las varianzas, antes y después, son 0,1257 y 0,3082, siendo la covarianza 0,1312. Con todos estos datos se cálculo el estadístico *t de Student*, que dio un valor igual a -1,2763. Comparando -1,2763 con el *valor crítico* -1,67 se acepta la *hipótesis nula* y se puede afirmar, por lo tanto, que el incremento en la media de los *índices de peligrosidad* no es *significativo*.

Las figuras 7.11 y 7.12 reflejan las funciones de distribución ajustadas a la probabilidad acumulada de los *índices de peligrosidad ponderados*.

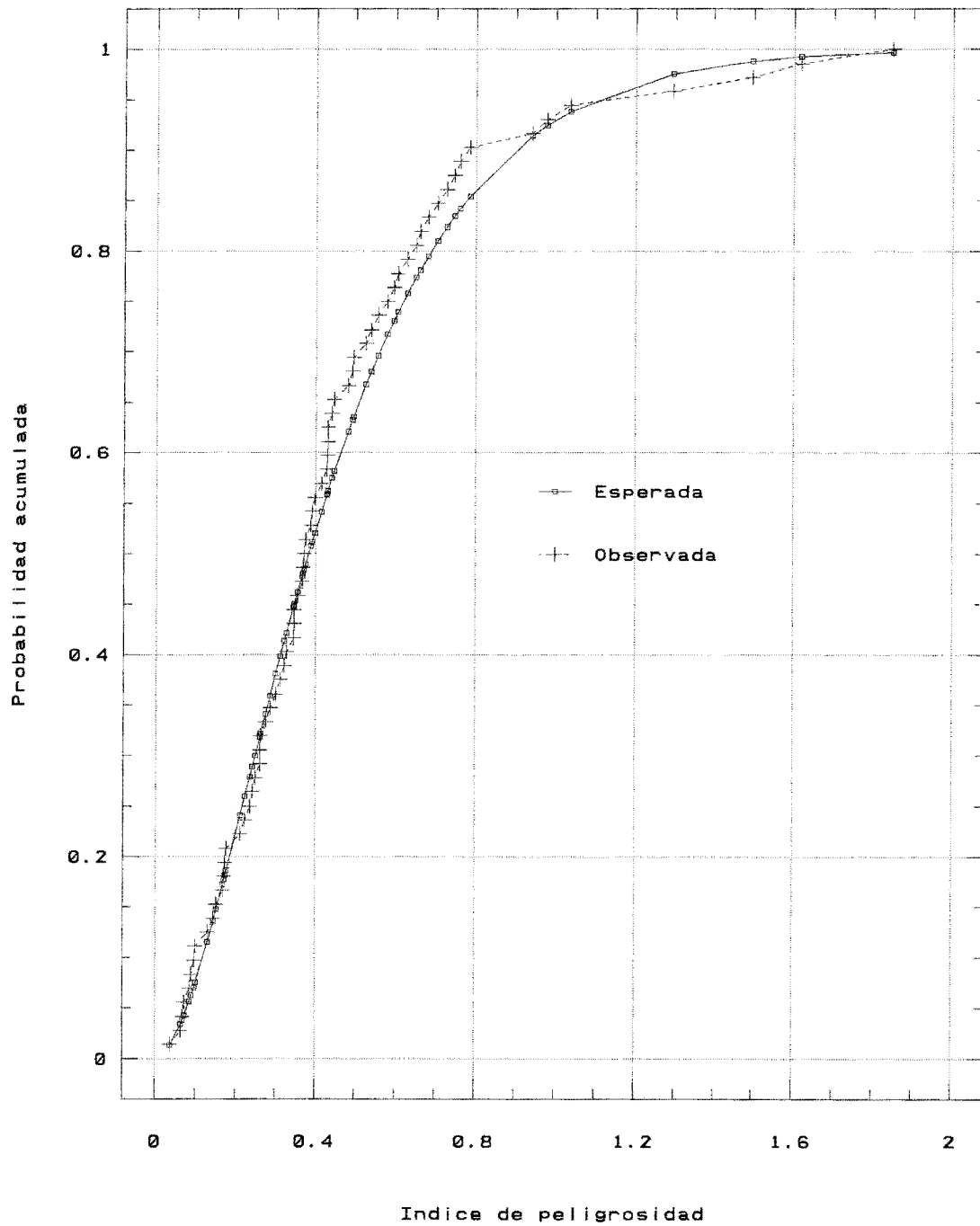


Figura 7.11.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad ponderados en el período anterior a las actuaciones de refuerzo.

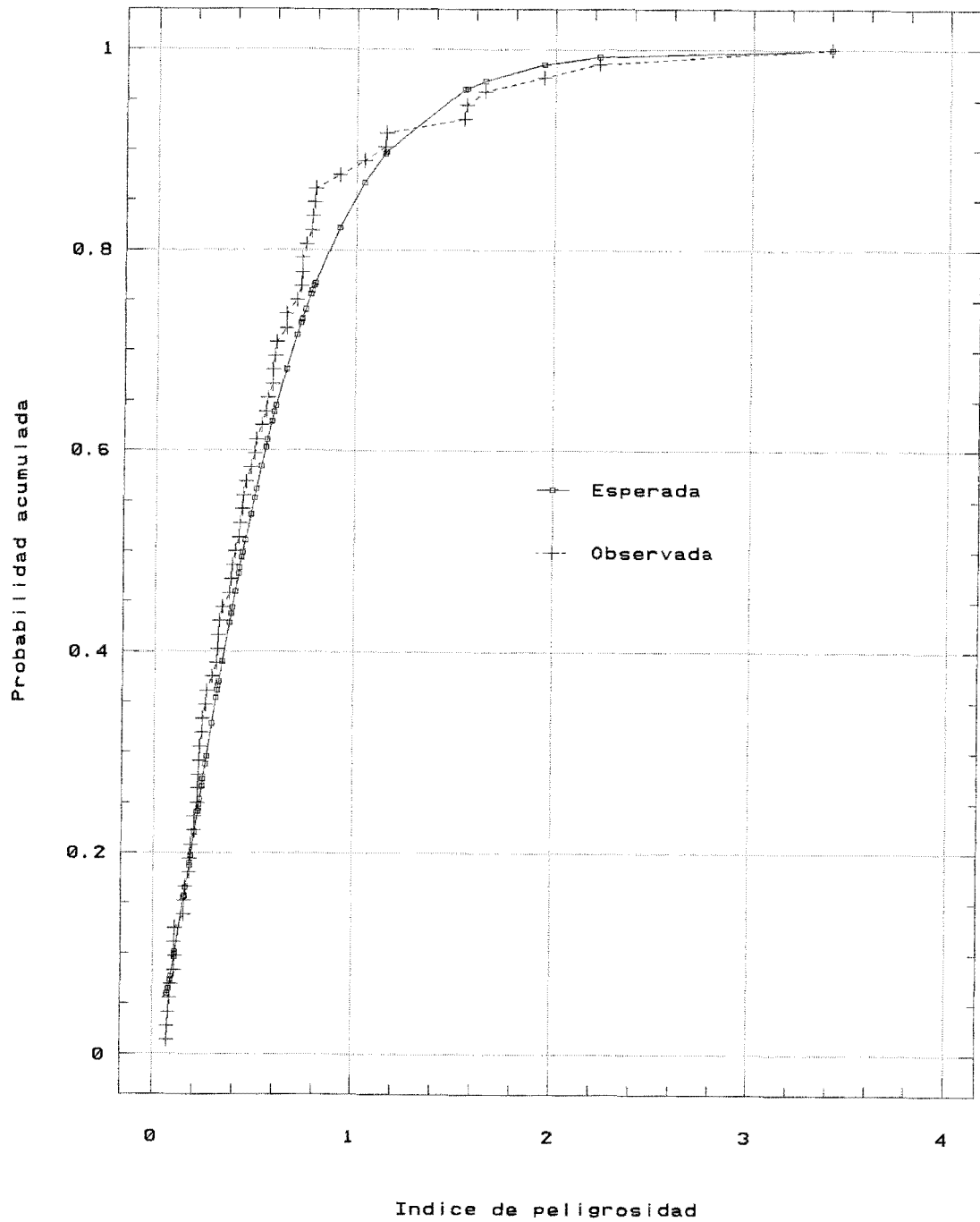


Figura 7.12.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad ponderados en el período *posterior* a las actuaciones de *refuerzo*.

7.4.- MÉTODO EMPÍRICO BAYESIANO.

7.4.1.- Introducción.

En el apartado 7.3 se realizó la evaluación de la efectividad de las actuaciones de *acondicionamiento* y *refuerzo de firmas* utilizando métodos *clásicos*. En este apartado se va a realizar nuevamente la evaluación, pero esta vez utilizando el método *empírico bayesiano*. Como ya se dijo anteriormente, los datos de partida son los mismos que se emplearon en el método *clásico*. Para hacer la evaluación en el conjunto de actuaciones también se volverá a recurrir al *teorema central del límite*.

7.4.2.- Evaluación de la efectividad a nivel individual.

Para evaluar la efectividad de las actuaciones a nivel individual se deben estimar los *índices de peligrosidad a largo plazo* antes y después de cada actuación. Para lograr esto, en primer lugar se estimaron los parámetros de las distribuciones *a priori* a partir de la muestra del *número de accidentes registrados* y la *exposición al riesgo* correspondiente al primer año antes y después de cada una de las actuaciones. Esta estimación de los parámetros se realizó empleando primero el método de los *momentos* a través de las ecuaciones 5.46 y 5.47 y después el *método de la máxima verosimilitud*, mediante la resolución del sistema de ecuaciones 5.49 para contrastar la consistencia entre ambos resultados. En esta ocasión también se hizo uso del programa de cálculo Mathcad plus 5.0 para resolver iterativamente el sistema de ecuaciones 5.49.

Los valores de estos parámetros para el caso de las actuaciones de *acondicionamiento* se presentan en la tabla 7.15. La estimación de los mismos está reflejada en los anexos 8-A-1 y 8-A-2.

	PERÍODO ANTERIOR		PERÍODO POSTERIOR	
	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD
α	2,5637	2,4980	1,6982	1,7338
ω	3,1089	3,9148	5,7346	6,5793

Tabla 7.15. Valores de los parámetros de la distribución *a priori* en *acondicionamientos*.

Los valores de los parámetros correspondientes a las actuaciones de *refuerzo de firmas* están expuestos en la tabla 7.16 y las estimaciones de los parámetros se encuentran en los anexos 8-B-1 y 8-B-2.

	PERÍODO ANTERIOR		PERÍODO POSTERIOR	
	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD	MÉTODO DE LOS MOMENTOS	MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD
α	1,8627	2,7771	0,9854	2,1019
ω	4,8708	7,5075	1,5666	4,3468

Tabla 7.16. Valores de los parámetros de la distribución *a priori* en *refuerzos*.

En vista de que, según la literatura estadística, las estimaciones obtenidas mediante el método de la *máxima verosimilitud* son más exactas, éstas se adoptaron para el análisis que sigue a continuación, si bien para fines prácticos, por su mayor sencillez, se podrían utilizar las obtenidas mediante el *método de los momentos*.

Tal y como se exponía en el apartado 4.4.3.1, Abbess et al (1981) comprobaron que el *número de accidentes registrados* en los *puntos negros* de Hertfordshire (Inglaterra) se ajustaba razonablemente a una *distribución binomial negativa* y, por lo tanto, el *número esperado de accidentes* se ajustaba a una *distribución Gamma*. En esta ocasión no se pueden ajustar los datos disponibles a una *distribución binomial negativa*, ya que los tramos de carretera tienen diferentes *exposiciones al riesgo*. En consecuencia, habrá que dar por buena la hipótesis del ajuste de la *distribución Gamma* a los *índices de peligrosidad a largo plazo*. De todas formas, como se verá en los próximos apartados, los *índices de peligrosidad a largo plazo* de las distribuciones *a posteriori* se ajustan razonablemente a la *distribución Gamma* y, por lo tanto, se puede decir que tampoco existe una evidencia que contradiga dicha hipótesis.

Una vez que se han estimado los parámetros de las dos distribuciones *a priori* para antes y después de la ejecución de las actuaciones, tal y como se refleja en la figura 7.13, se procedió a estimar los parámetros de las distribuciones *a posteriori* en cada uno de los tramos mediante el empleo de la ecuación 5.37 que ya fue descrita en el apartado 5.3.1.1. Esto se ejecutó con la salvedad de que, en esta ocasión, N_2 correspondía al *número de accidentes registrados* en el período anterior y E_2 a la *exposición al riesgo* en el mismo período. Del igual modo, para estimar los parámetros de la distribución *a posteriori* en cada uno de los tramos en el período posterior a la ejecución de las actuaciones se empleó la

mencionada ecuación 5.37. Pero ahora, N_4 era el *número de accidentes registrados* en el período posterior y E_4 la exposición al riesgo en el mismo período de tiempo.

A continuación, siguiendo el proceso descrito en la figura 7.13 y teniendo en cuenta la fórmula 5.38, se estimaron los *índices de peligrosidad a largo plazo* en los períodos anterior y posterior a las actuaciones (anexos 8-A-2 y 8-B-2). Seguidamente, la efectividad de cada actuación se estimó mediante la ecuación 5.31 del apartado 5.3.1. Después de haber evaluado la efectividad de las actuaciones en cada uno de los tramos de carretera, se comprobó, por último, si dicho valor de la efectividad era estadísticamente *significativo*; para ello se hizo uso de la fórmula 5.53 descrita en el apartado 5.3.1.2 (anexos 8-A-3 y 8-B-3). Por otra parte, al igual que se decidió para el análisis clásico, aquí también se asumió que una actuación producía una reducción significativa del *índice de peligrosidad* cuando $P(\eta_{Ai} > \eta_{Di})$ era superior a 0,90; es decir, se tomó un *nivel de confianza* de un 90%.

Los resultados de los *índices de peligrosidad a largo plazo* antes y después de las actuaciones de *acondicionamiento* y *refuerzo* obtenidos mediante este procedimiento están reflejados en las tablas 7.17 a 7.20, donde P es la probabilidad de que el *índice de peligrosidad a largo plazo* anterior a la actuación sea mayor que el posterior.

Por otra parte, también se estimaron en los anexos 8-A-4 y 8-B-4 los límites superior (*ILPS*) e inferior (*ILPI*) de los *índices de peligrosidad a largo plazo* antes y después de las actuaciones.

Tal como se hizo para la aplicación del método *clásico*, aquí también se evaluaron, en primer lugar, las actuaciones de *acondicionamiento* para, en un análisis posterior, evaluar las de *refuerzos* de firmes. Según se puede observar en las tablas 7.17 a 7.20, la estimación

de la efectividad de las actuaciones en los distintos tramos de carretera refleja diferencias en los valores obtenidos, lo cual era de esperar ya que la efectividad de cada actuación a nivel individual o *factor de reducción de accidentes* es una variable aleatoria independiente.

A continuación se va a realizar una somera explicación de los resultados obtenidos.

• **Resultados de la significación estadística de la efectividad de las actuaciones de acondicionamiento.**

De las 75 actuaciones de *acondicionamiento* analizadas, 68 de ellas produjeron una reducción del *índice de peligrosidad a largo plazo*, observándose en las 7 restantes un incremento de ese indicador (ver las tablas 7.17 y 7.18). A primera vista, se podría pensar que la mayoría de las actuaciones de *acondicionamiento* produjeron una mejora de la seguridad en la circulación. No obstante, cabe la duda de que tales resultados positivos entren dentro de la previsión de las variaciones debidas al azar, por lo que resulta necesario todavía descartar esta hipótesis contrastando los valores registrados mediante el recurso a la fórmula 5.53.

En la tabla 7.21 se presenta un resumen de los resultados de las tablas 7.17 y 7.18 donde, tal y como se puede ver, de las 68 actuaciones que produjeron una disminución de la peligrosidad, se confirma que en 44 tramos de carretera ese decremento es *significativo* al *nivel de confianza* del 90%. Por otra parte, de las 7 actuaciones restantes donde se registró un aumento del *índice de peligrosidad a largo plazo* en los tramos correspondientes, solamente se confirma como *significativo* dicho incremento en uno solo de esos tramos.

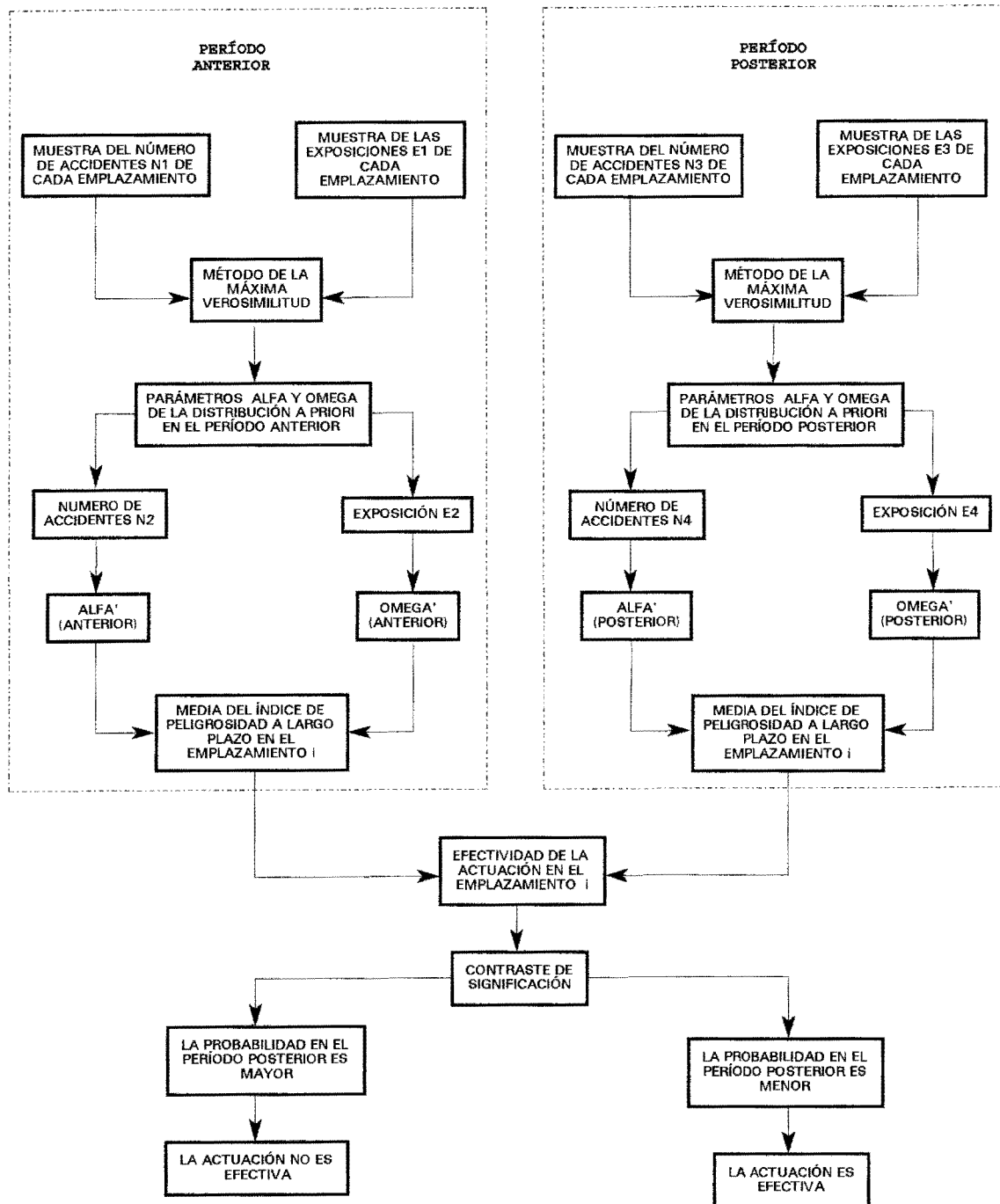


Fig. 7.13. Método empírico bayesiano adaptado a la evaluación de la efectividad de las actuaciones de seguridad vial, empleando el índice de peligrosidad a largo plazo, antes y después de las actuaciones.

- **Resultados de la significación estadística de la efectividad de las actuaciones de refuerzo.**

Por lo que se refiere a las actuaciones de *refuerzo de firmas*, los resultados están expuestos en las tablas 7.19 y 7.20. Del total de actuaciones de *refuerzo*, 43 de las mismas ocasionaron un aumento del *índice de peligrosidad a largo plazo* y 32 una disminución. El resumen de las dos tablas queda reflejado en la tabla 7.22. En ella puede observarse que de las 43 actuaciones que ocasionaron un incremento del *índice de peligrosidad a largo plazo*, éste era *significativo* en sólo 13 de las mismas y de las 32 actuaciones que motivaron una disminución, ésta era *significativo* solamente en 12 de ellas. Al igual que con el método *clásico*, no hay una mayoría clara de actuaciones que ocasionen un aumento o reducción *significativa* del *índice de peligrosidad a largo plazo*. Por lo tanto, es necesario sumar los efectos de cada una de las actuaciones para poder llegar a una conclusión sobre la efectividad en el conjunto de las actuaciones de *refuerzo de firmas*.

TRAMO	ILP_A	ILP_D	$E(\%)$	$DILP$	P
M-100/4	0,7466	0,2004	73,08	0,5442	0,9954
M-102/2	0,4194	0,3231	22,95	0,0962	0,5708
M-102/3	0,6657	0,3499	47,44	0,3158	0,8158
M-102/4	0,3647	0,1868	48,78	0,1779	0,7671
M-103/1	1,1553	0,2207	80,90	0,9346	0,9999
M-103/3	1,0960	0,4015	63,37	0,6945	0,9963
M-103/4	0,6784	0,4015	40,82	0,2769	0,8629
M-103/5	1,0346	0,2945	71,53	0,7400	0,9940
M-113/4	0,8203	0,2492	69,62	0,5711	0,9739
M-113/5	1,0236	0,2565	74,94	0,7670	0,9935
M-123/2	0,6398	0,2991	54,34	0,3477	0,8662
M-203/1	0,3513	0,1415	59,74	0,2099	0,9790
M-203/5	0,1996	0,1510	24,35	0,0486	0,6237
M-204/8	0,3865	0,2366	38,78	0,1499	0,6904
M-204/9	0,5800	0,3722	35,82	0,2078	0,6677
M-204/10	0,3442	0,5178	-50,45	-0,1736	0,1605
M-204/11	0,5183	1,1407	-120,11	-0,6225	0,0312
M-206/2	0,5195	0,2898	44,20	0,2296	0,8640
M-206/3	0,2714	0,1318	51,42	0,1395	0,8456
M-217/1	0,3371	0,2385	29,25	0,0986	0,6176
M-218/1	0,7365	0,3841	47,85	0,3524	0,9637
M-218/2	0,2440	0,1523	37,58	0,0917	0,7774
M-219/1	0,9297	0,3687	60,34	0,5610	0,9716
M-219/2	0,5717	0,3881	32,11	0,1836	0,6393
M-219/3	1,2804	0,4805	62,47	0,7999	0,9660
M-227/1	0,3126	0,3807	-21,76	-0,0680	0,2977
M-227/2	0,7928	0,3429	56,75	0,4499	0,9183
M-233/2	0,8445	0,2522	70,14	0,5923	0,9957
M-300/1	1,4238	0,7199	49,44	0,7039	0,9875
M-300/2	1,4506	0,7016	51,63	0,7490	0,9819
M-300/3	0,5911	0,1858	68,57	0,4053	0,9832
M-300/4	1,1153	0,3262	70,76	0,7892	0,9875
M-300/5	0,7988	0,2471	69,06	0,5517	0,9842
M-300/6	1,0441	0,3172	69,63	0,7270	0,9854
M-300/7	0,9579	0,4488	53,15	0,5091	0,9819
M-300/8	1,0241	0,3165	69,10	0,7076	0,9999
M-301/4	0,5587	0,5664	-1,37	-0,0077	0,4189

Tabla 7.17. *M. E. Bayesiano*. Efectividad de las actuaciones de *acondicionamiento* a nivel individual.

TRAMO	ILP_A	ILP_D	$E(\%)$	$DILP$	P
M-301/5	1,0765	0,3233	69,97	0,7352	0,9861
M-301/6	0,2891	0,3761	-30,11	-0,0870	0,2451
M-301/7	0,3053	0,1225	59,89	0,1828	0,8960
M-305/3	0,3406	0,3572	-4,87	-0,0166	0,3869
M-404/1	0,7989	0,2743	65,66	0,5245	0,9908
M-404/2	0,8196	0,1705	79,20	0,6491	0,9972
M-404/3	0,7174	0,2701	62,36	0,4473	0,9468
M-404/7	0,2345	0,2002	14,65	0,0343	0,5425
M-404/9	0,7584	0,3726	50,87	0,3858	0,8415
M-404/10	0,7050	0,3543	49,75	0,3508	0,8332
M-404/14	0,6491	0,2265	65,11	0,4226	0,9744
M-408/2	0,6093	0,1005	83,50	0,5088	0,9999
M-413/2	1,4691	0,4578	68,83	1,0112	0,9968
M-413/3	0,6035	0,1813	69,96	0,4222	0,9539
M-501/4	0,2904	0,0653	77,53	0,2252	0,9999
M-501/5	0,4659	0,0693	85,13	0,3967	0,9999
M-501/6	0,2293	0,1916	16,42	0,0376	0,5573
M-501/7	0,1645	0,1419	13,76	0,0226	0,5353
M-501/8	0,2759	0,2716	1,58	0,0044	0,4577
M-504/1	0,3553	0,1524	57,10	0,2029	0,8847
M-504/2	1,0062	0,1917	80,95	0,8146	0,9999
M-506/10	0,2991	0,0865	70,29	0,2046	0,9758
M-510/9	0,9445	0,2029	78,52	0,7416	0,9967
M-511/2	1,0139	0,3229	68,16	0,6911	0,9978
M-511/4	0,7949	0,2000	74,84	0,5949	0,9968
M-513/2	0,3475	0,1348	61,22	0,2128	0,9974
M-515/4	0,3398	0,1204	64,57	0,2194	0,9828
M-516/1	0,2152	0,0973	54,79	0,1179	0,9728
M-541/2	0,4862	0,2918	39,98	0,1944	0,7562
M-600/5	0,6751	0,2709	59,87	0,4042	0,9794
M-604/9	1,5780	0,4847	69,29	1,0934	0,9949
M-608/1	0,5111	0,5000	2,17	0,0111	0,4292
M-608/2	0,3364	0,5859	-74,14	-0,2495	0,1213
M-608/4	0,7263	0,2306	68,25	0,4957	0,9897
M-608/5	1,1397	0,2918	74,40	0,8479	0,9965
M-608/6	0,4011	0,2097	47,71	0,1914	0,8179
M-608/8	0,9804	0,1719	82,47	0,8066	0,9995
M-608/9	0,9241	0,2968	67,88	0,6273	0,9816

Tabla 7.18. *M. E. Bayesiano. Efectividad de las actuaciones de acondicionamiento a nivel individual (continuación).*

TRAMO	ILP_A	ILP_D	$E(\%)$	$DILP$	P
M-100/1	0,4022	0,5530	-37,49	-0,1508	0,1344
M-100/4	0,3207	0,2418	24,60	0,0789	0,6674
M-100/5	0,3878	0,5549	-43,09	-0,1671	0,1192
M-100/6	0,3781	0,2419	36,00	0,1361	0,8675
M-103/1	0,4295	0,9620	-123,95	-0,5324	0,0147
M-111/4	0,2643	0,1379	47,81	0,1263	0,9347
M-121/1	0,4349	0,6491	-49,26	-0,2142	0,1218
M-203/4	0,3353	0,3708	-10,58	-0,0355	0,3468
M-206/1	0,2403	0,3268	-35,98	-0,0865	0,2308
M-206/5	0,4369	0,0998	77,14	0,3370	0,9998
M-206/6	0,2113	0,1412	33,19	0,0701	0,8025
M-206/7	0,3752	0,3397	9,48	0,0356	0,5237
M-219/3	0,3122	0,5569	-78,38	-0,2447	0,1041
M-219/4	0,4682	0,3039	35,10	0,1643	0,7652
M-233/2	0,2275	0,2191	3,69	0,0084	0,4445
M-301/2	0,4818	0,0941	80,47	0,3877	0,9997
M-301/3	0,5309	0,2547	52,03	0,2762	0,9232
M-301/4	0,3235	0,2371	26,73	0,0865	0,6546
M-301/5	0,2859	0,3119	-9,69	-0,0260	0,3642
M-307/2	0,4062	0,2555	37,11	0,1508	0,8767
M-311/1	0,3528	0,2460	30,26	0,1067	0,7499
M-313/5	0,5854	0,5563	4,97	0,0291	0,4927
M-405/1	0,3664	0,4687	-28,98	-0,1053	0,2069
M-501/1	0,2616	0,2050	21,66	0,0567	0,7472
M-501/2	1,0011	0,6528	34,79	0,3483	0,9175
M-501/10	0,3007	0,2633	12,42	0,0373	0,5681
M-501/11	0,3082	0,4793	-55,51	-0,1711	0,0556
M-501/12	0,2852	0,5493	-92,56	-0,2640	0,0557
M-501/13	0,1746	0,2495	-42,87	-0,0749	0,2040
M-501/14	0,3042	0,3550	-16,68	-0,0508	0,3163
M-501/15	0,2521	0,5386	-113,65	-0,2865	0,0510
M-504/2	0,1914	0,3474	-81,50	-0,1560	0,0736
M-505/6	0,8136	0,4562	43,93	0,3574	0,9928
M-505/7	0,6646	1,0480	-57,75	-0,3837	0,0680
M-506/9	0,5474	0,5791	-5,81	-0,0318	0,3866
M-506/10	0,5799	0,3066	47,13	0,2733	0,9638
M-506/11	0,3521	0,2564	27,18	0,0957	0,6920

Tabla 7.19. Método Empírico Bayesiano. Efectividad de las actuaciones de refuerzo a nivel individual.

TRAMO	ILP_A	ILP_D	$E(\%)$	$DILP$	P
M-507/2	0,2316	0,5011	-116,37	-0,2695	0,0189
M-507/3	0,3092	0,4289	-38,68	-0,1196	0,2004
M-510/4	0,5951	0,1921	67,72	0,4030	0,9942
M-511/2	0,3430	0,6089	-77,52	-0,2659	0,0813
M-511/3	0,4572	1,0958	-139,70	-0,6387	0,0160
M-519/1	0,6673	0,4262	36,13	0,2411	0,8685
M-527/1	0,4383	0,4700	-7,24	-0,0317	0,3789
M-528/1	0,4571	0,5901	-29,10	-0,1380	0,2318
M-533/1	0,3674	0,3789	-3,14	-0,0115	0,4127
M-536/1	0,4066	0,5249	-29,10	-0,1183	0,2460
M-600/1	0,4068	0,3324	18,29	0,0744	0,6069
M-600/2	0,3367	0,3664	-8,83	-0,0297	0,3677
M-600/3	0,4902	0,3088	37,00	0,1814	0,9406
M-600/7	0,2249	0,1478	34,28	0,0771	0,7580
M-600/8	0,4365	0,2995	31,39	0,1370	0,8065
M-600/9	0,2724	0,2052	24,66	0,0672	0,6367
M-600/10	0,4454	0,1732	61,12	0,2722	0,9926
M-601/1	0,3017	0,1707	43,41	0,1309	0,9075
M-601/2	0,3968	0,6380	-60,77	-0,2412	0,1014
M-601/3	0,3033	0,3380	-11,72	-0,0355	0,3412
M-604/1	0,5323	0,5511	-3,53	-0,0188	0,4119
M-604/2	0,3151	0,7333	-132,69	-0,4181	0,0193
M-604/3	0,4824	0,6496	-34,64	-0,1671	0,2187
M-604/4	0,5919	0,8048	-35,96	-0,2129	0,1958
M-604/5	0,4816	0,5430	-12,75	-0,0614	0,3375
M-604/6	0,4054	0,4594	-13,31	-0,0540	0,3377
M-604/7	0,4611	0,5900	-27,95	-0,1289	0,2520
M-604/8	0,4775	0,6353	-33,04	-0,1578	0,2264
M-604/10	0,5425	0,9316	-71,72	-0,3891	0,0593
M-604/12	0,2370	0,2751	-16,11	-0,0382	0,3249
M-607/7	0,3338	0,2564	23,19	0,0774	0,8295
M-607/8	0,2196	0,4203	-91,39	-0,2007	0,0803
M-607/9	0,7804	0,3489	55,30	0,4315	0,9825
M-611/1	0,2879	0,3274	-13,70	-0,0394	0,3252
M-611/2	0,2637	0,5963	-126,09	-0,3326	0,0393
M-611/3	0,3546	0,2485	29,93	0,1061	0,7708
M-618/2	0,9170	1,1276	-22,96	-0,2105	0,1957
M-626/1	0,3091	0,4957	-60,38	-0,1866	0,1474

Tabla 7.20. Método Empírico Bayesiano. Efectividad de las actuaciones de refuerzo a nivel individual (continuación).

<i>Hipótesis</i>	<i>Actuaciones</i>	<i>Significativo al 90%</i>	<i>No significativo al 90%</i>
<i>Disminución del índice</i>	68	44	24
<i>Incremento del índice</i>	7	1	6

Tabla 7.21. Resumen de los niveles de significación en acondicionamientos.

<i>Hipótesis</i>	<i>Actuaciones</i>	<i>Significativo al 90%</i>	<i>No significativo al 90%</i>
<i>Disminución del índice</i>	32	12	20
<i>Incremento del índice</i>	43	13	30

Tabla 7.22. Resumen de los niveles de significación en refuerzos.

7.4.3.- Evaluación de la efectividad en el conjunto de actuaciones.

7.4.3.1.- Evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones sin corrección de la tendencia temporal.

En el apartado anterior se evaluó la efectividad de las actuaciones a nivel individual, es decir, se vio separadamente cual era la efectividad de cada actuación. Esto se lograba utilizando la metodología *bayesiana* para estimar el *índice de peligrosidad a largo plazo* en cada tramo de carretera tanto antes como después de cada actuación y evaluar, a continuación, el cambio registrado en función de dichos *índices*. Se ha visto que, en el caso de los *acondicionamientos*, había una mayoría de actuaciones en las que, como consecuencia de las mismas, se producía una reducción *significativa* del *índice de peligrosidad a largo plazo* en el tramo correspondiente. Sin embargo, en los *refuerzos de firme* no se detectaba una mayoría de actuaciones que ocasionara un incremento o reducción *significativa* del índice citado. En consecuencia, para llegar a una conclusión estadísticamente significativa sobre la efectividad de estas actuaciones se hace necesario evaluarlas a nivel del conjunto de las actuaciones. Además, como ya se dijo, debe tenerse en cuenta que la efectividad de cada actuación o *factor de reducción de accidentes* es una variable aleatoria y, como su nombre indica, esta variable puede adoptar diferentes valores para cada una de las actuaciones.

Para hacer la evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones, bien sean de *acondicionamiento* o bien de *refuerzos de firme*, es necesario hacer uso del *teorema central del límite* en la forma ya explicada en el capítulo 5. Ello implica que se asume la condición de que las funciones de distribución *a posteriori* son todas ellas del tipo *Gamma*, pero con diferentes medias y varianzas. Para ello, antes y después de las actuaciones en los tramos de

carretera, se ajustaron las medias de las funciones de densidad *a posteriori* de los *índices de peligrosidad a largo plazo* a una función de densidad *Gamma*. Para lograr esto se utilizó el método de la *máxima verosimilitud*, recurriendo de nuevo al sistema de ecuaciones 5.27.

Como se ha venido haciendo hasta ahora se van a exponer, en primer lugar, los resultados obtenidos para el caso de las actuaciones de *acondicionamiento* y, en segundo lugar, se expondrán los resultados de las actuaciones de *refuerzo de firmes*.

• **Resultado de la evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones de acondicionamiento sin corrección de la tendencia temporal.**

Los resultados de la estimación de los parámetros, así como los contrastes *chi-cuadrado* y de *Kolmogorov-Smirnov* se reflejan en la tabla 7.23. Como puede observarse a la vista de dichos resultados se puede considerar como aceptable el ajuste de la función de densidad, tanto para el período anterior como para el posterior (anexo 8-A-5).

PERÍODO	PARÁMETROS		CONTRASTE CHI-CUADRADO			CONTRASTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	
	κ	t	Resultado	Grados de libertad	Nivel de significación	DN	Nivel de significación
ANTERIOR	3,6638	5,4190	10,5471	7	0,1596	0,1062	0,3656
POSTERIOR	3,7361	12,5360	3,2762	5	0,6575	0,0725	0,8258

Tabla 7.23. Resultados de la función de densidad *Gamma* ajustada a los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior y posterior a las actuaciones de *acondicionamiento*.

Por otra parte, para evaluar la efectividad del conjunto de actuaciones de *acondicionamiento* se utilizó la fórmula 5.54, dando como resultado, para el conjunto de las mismas, una efectividad igual a un 55,92% (anexo 8-A-2).

Por otro lado, en la totalidad de actuaciones de *acondicionamiento* se tiene que la media del *índice de peligrosidad a largo plazo*, antes y después de dichas actuaciones de *acondicionamiento* es igual a 0,6759 y 0,2979 respectivamente. La estimación de la varianza de la muestra antes y después de las actuaciones da 0,1205 y 0,0287 respectivamente. El *coeficiente de correlación de Pearson* arroja un resultado de 0,3692, de lo que se deriva que las muestras son independientes (anexo 8-A-6). La covarianza por su parte es igual a 0,0217 (anexo 8-A-6). El estadístico *t de Student* alcanza un valor de 8,456, siendo el *valor crítico* obtenido en la correspondiente tabla igual a 1,67. A la vista de estos resultados se puede concluir que la diferencia de las medias es *significativa* y que, por lo tanto, se puede considerar al conjunto de las actuaciones como efectivo en la reducción del *índice de peligrosidad a largo plazo*.

• Resultado de la evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones de refuerzo de firme sin corrección de la tendencia temporal.

La estimación de los parámetros de las funciones de densidad *Gamma* de los *índices de peligrosidad a largo plazo* correspondientes a los tramos de carretera antes y después de la ejecución de actuaciones de *refuerzo de firmes* se presentan en la tabla 7.24. A la vista de los resultados reflejados en esta tabla se puede dar por bueno el ajuste de dichas funciones.

En las actuaciones de *refuerzo de firmes* la media de los índices de peligrosidad a largo plazo, antes y después de las actuaciones, es 0,4063 y 0,4347 respectivamente. Se

produjo un incremento del *índice de peligrosidad a largo plazo* en el conjunto de actuaciones; es decir, la efectividad evaluada de acuerdo a la fórmula 5.54 es de un -6,99% (anexo 8-B-2). Repitiendo los pasos dados anteriormente, se obtiene una *t de Student* de -0,8737, siendo el *valor crítico* correspondiente igual a -1,67. Por lo tanto, en este caso, se acepta la *hipótesis nula* de la igualdad de los *índices de peligrosidad a largo plazo* y, en consecuencia, a pesar del incremento del índice de peligrosidad a largo plazo medio, se puede concluir que las actuaciones de *refuerzo de firmes*, consideradas en su conjunto, no ocasionaron un incremento *significativo* del *índice de peligrosidad a largo plazo* en los tramos de carretera.

PERÍODO	PARÁMETROS		CONTRASTE CHI-CUADRADO			CONTRASTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	
	κ	ι	Resultado	Grados de libertad	Nivel de significación	DN	Nivel de significación
ANTERIOR	7,6161	18,7450	3,6223	5	0,6049	0,0719	0,8324
POSTERIOR	3,7850	8,7080	8,1350	7	0,3208	0,0617	0,9371

Tabla 7.24. Resultados de la función de densidad *Gamma* ajustada a los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior y posterior a las actuaciones de *refuerzo de firmes*.

Las figuras 7.14 a 7.17 muestran el ajuste de las funciones de distribución *Gamma* a la probabilidad acumulada de los *índices de peligrosidad a largo plazo*.

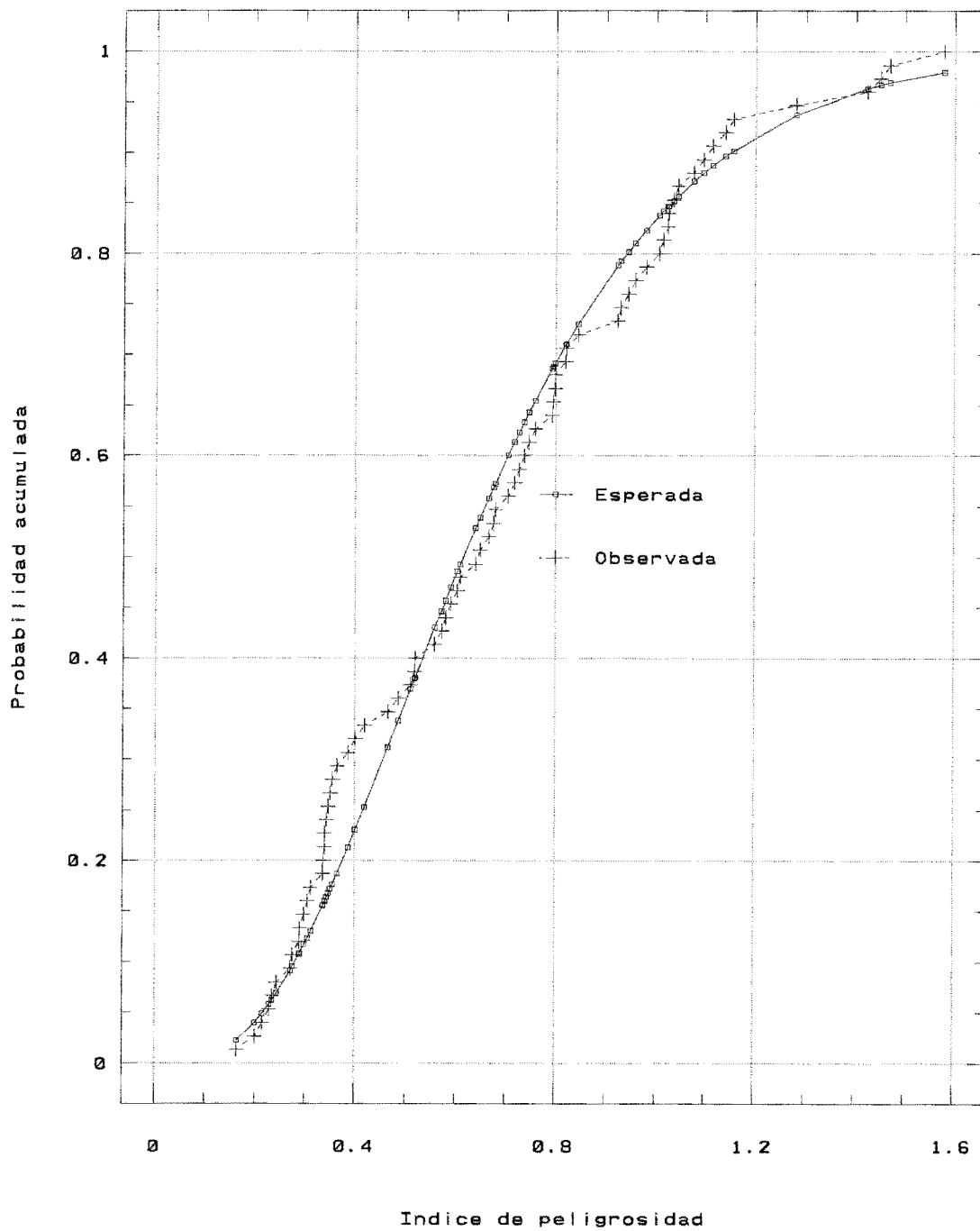


Figura 7.14.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior a las actuaciones de acondicionamiento.

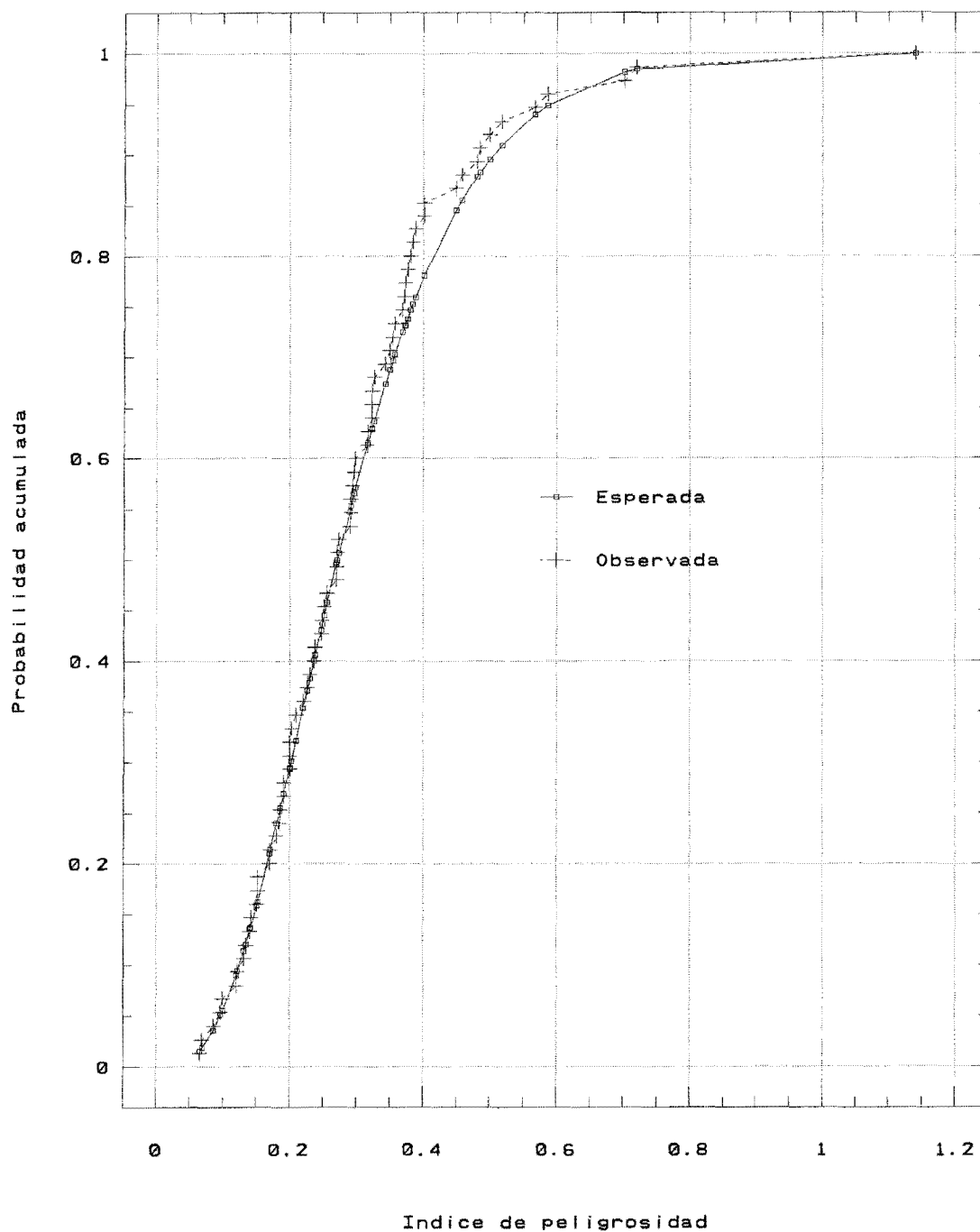


Figura 7.15.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo en el período *posterior* a las actuaciones de *acondicionamiento*.

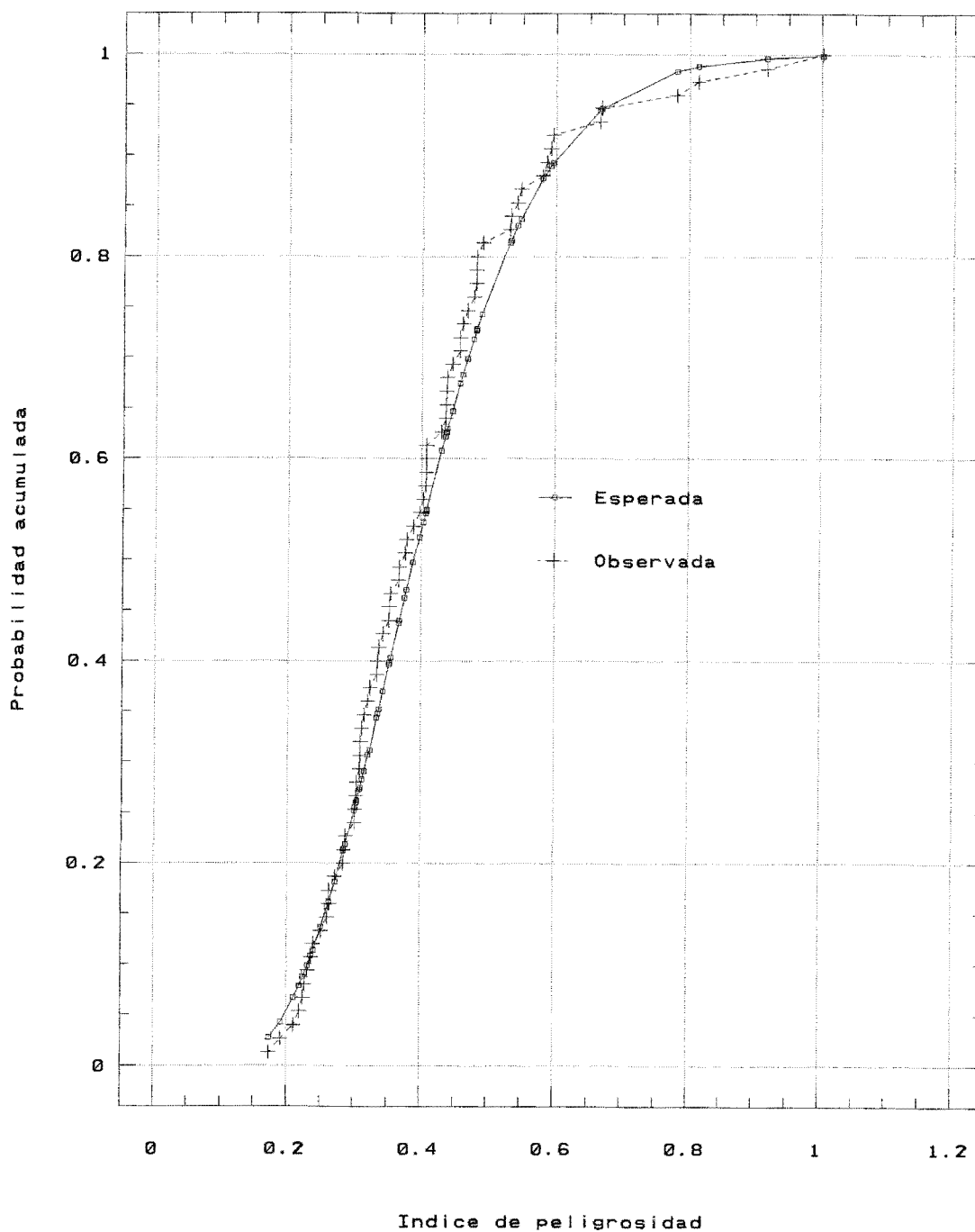


Figura 7.16.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior a las actuaciones de refuerzo.

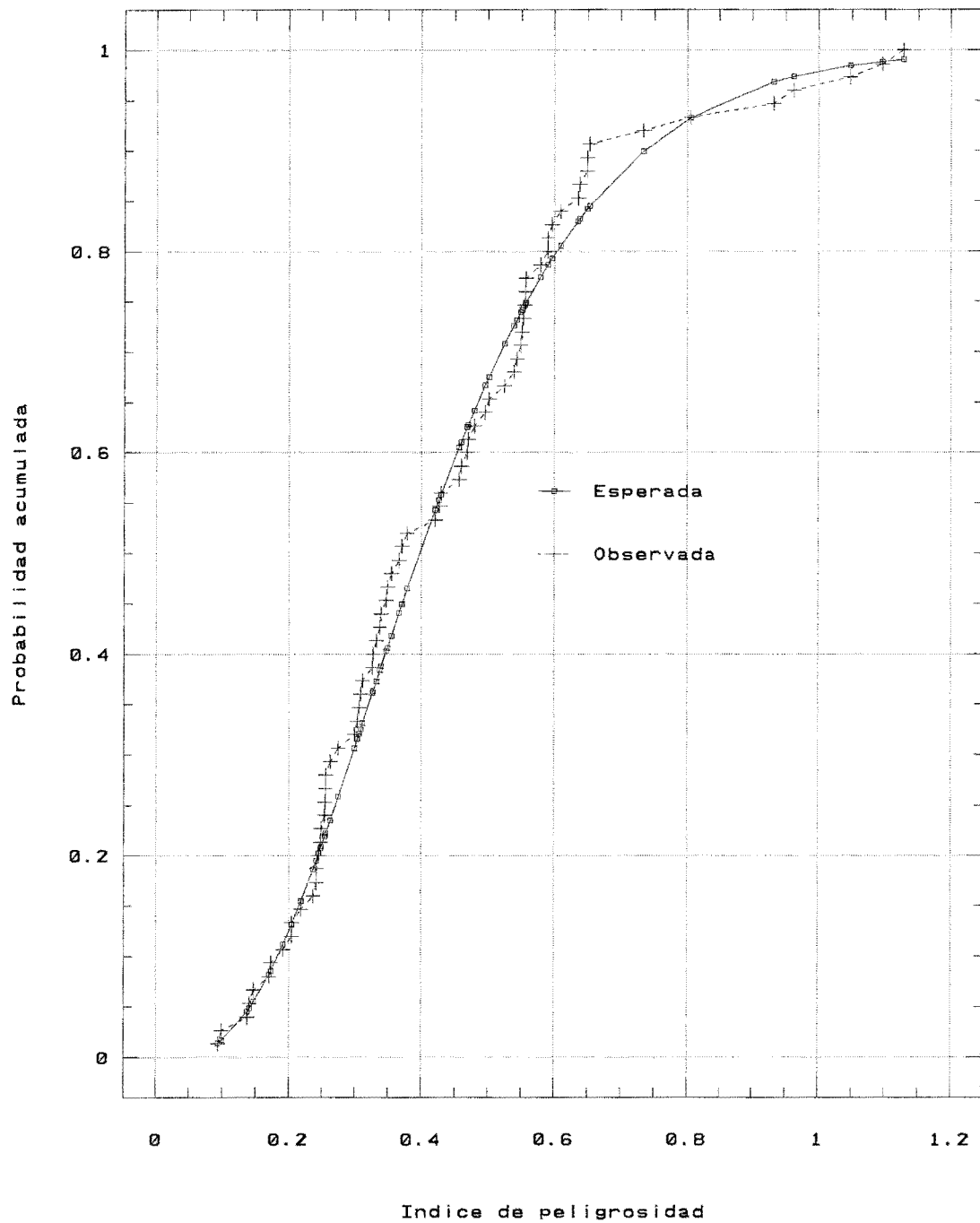


Figura 7.17.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de perigosidade a largo plazo en el período *posterior* a las actuaciones de *refuerzo*.

7.4.3.2.- Evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones con corrección de la tendencia temporal.

En esta ocasión, al igual que en el método clásico, para evaluar la efectividad en el conjunto de actuaciones se deben calcular los *factores* F2 y F4 mediante la fórmula 5.29. A continuación, los dos *factores de ponderación* se multiplican por los *números de accidentes registrados* N2 y N4 para obtener así los *números de accidentes ponderados* N2' y N4'.

Después de haber estimado los parámetros de las dos distribuciones *a priori*, iguales a los de las tablas 7.15 y 7.16, antes y después de la ejecución de las actuaciones (anexos 8-A-1 y 8-B-1), se obtienen los parámetros de las distribuciones *a posteriori* en cada uno de los tramos mediante el empleo de las ecuaciones 5.55 y 5.56. En esta ocasión hay que tener en cuenta que N_{Ai}' y E_{Ai} corresponden a N2' y E2 y, por otra parte, N_{Di}' y E_{Di} corresponden a N4' y E4. A continuación, se estiman los *índices de peligrosidad a largo plazo ponderados* en los períodos anterior y posterior mediante las ecuaciones 5.57 y 5.58 (anexos 8-C-1 y 8-D-1).

Una vez que se conocen los *índices de peligrosidad a largo plazo ponderados* antes y después de las actuaciones hay que comprobar, como siempre, si éstos siguen una distribución *Gamma*, para lo cual hay que realizar el análisis explicado en el apartado 5.3.2. En los siguientes párrafos se ofrecen los resultados de dicho análisis tanto en las actuaciones de *acondicionamiento* como en las de *refuerzo*.

• **Resultado de la evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones de acondicionamiento con corrección de la tendencia temporal.**

En la tabla 7.25 se presentan los resultados de la bondad del ajuste de las funciones de densidad *Gamma* en ambos períodos. En vista de tales resultados se dio por bueno el ajuste de dichas funciones (anexo 8-C-3).

PERÍODO	PARÁMETROS		CONTRASTE CHI-CUADRADO			CONTRASTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	
	κ	ι	Resultado	Grados de libertad	Nivel de significación	DN	Nivel de significación
ANTERIOR	3,7750	5,8820	8,5159	7	0,2893	0,0902	0,5742
POSTERIOR	3,9133	13,1910	5,8834	5	0,3177	0,0787	0,7412

Tabla 7.25. Resultados de la función de densidad *Gamma* ajustada a los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior y posterior a las actuaciones de *acondicionamiento* (con corrección de la *tendencia temporal*).

Empleando la fórmula 5.54 se encontró que la efectividad es de un 53,77% (anexo 8-C-1). La media antes y después de las actuaciones dio 0,6418 y 0,2967 respectivamente. Las varianzas 0,1070 y 0,0272 siendo el *coeficiente de correlación* y la covarianza 0,3595 y 0,0194 respectivamente (anexo 8-C-4). El estadístico *t de Student*, en este caso, fue igual a 8,1434; por lo tanto, se rechaza la *hipótesis nula* y se confirma que existe una diferencia *significativa* entre las medias de los *índices de peligrosidad a largo plazo* antes y después de las actuaciones.

- **Resultado de la evaluación de la efectividad del conjunto de actuaciones de refuerzo de firme con corrección de la tendencia temporal.**

Los resultados de los contrastes de bondad del ajuste de las funciones de densidad *Gamma* a los *índices de peligrosidad a largo plazo* antes y después de las actuaciones de *refuerzo* están reflejados en la siguiente tabla (anexo 8-D-2):

PERÍODO	PARÁMETROS		CONTRASTE CHI-CUADRADO			CONTRASTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	
	κ	t	Resultado	Grados de libertad	Nivel de significación	DN	Nivel de significación
ANTERIOR	7,4273	19,0001	6,4200	5	0,2675	0,0960	0,4936
POSTERIOR	4,2599	9,9450	3,5004	6	0,7439	0,0563	0,9711

Tabla 7.26. Resultados de la función de densidad *Gamma* ajustada a los índices de peligrosidad a largo plazo en el período anterior y posterior a las actuaciones de refuerzo (con corrección de la *tendencia temporal*).

Estas actuaciones tienen una efectividad de un -9,57%. La media y varianza de los *índices de peligrosidad a largo plazo* antes y después de las actuaciones se recogen en el anexo 8-D-1; por otro lado, en el anexo 8-D-3 se recogen también el *coeficiente de correlación* y la covarianza. Al estimar el estadístico t se obtuvo un valor de -1,2172. El *valor crítico* encontrado en las tablas para $n-1 = 74$ y un *nivel de significación* de 0,05 es de -1,67, por lo que se considera aceptable la *hipótesis nula* de la igualdad de los *índices de peligrosidad a largo plazo*.

Las figuras 7.18 a 7.21 muestran el ajuste de las funciones de distribución *Gamma* a la probabilidad acumulada de los *índices de peligrosidad a largo plazo ponderados*.

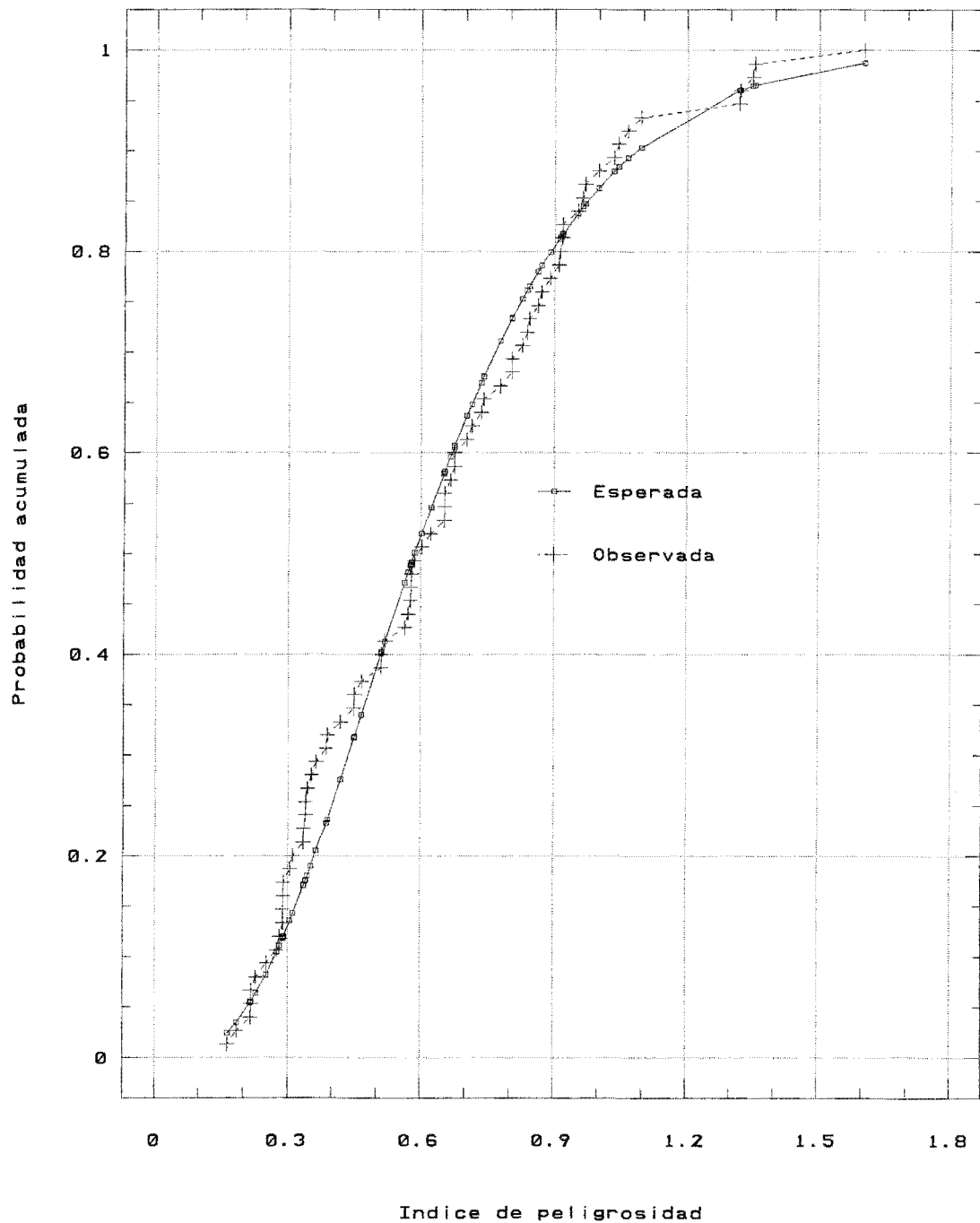


Figura 7.18.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de perigosidade a largo plazo ponderados en el período anterior a las actuaciones de acondicionamiento.

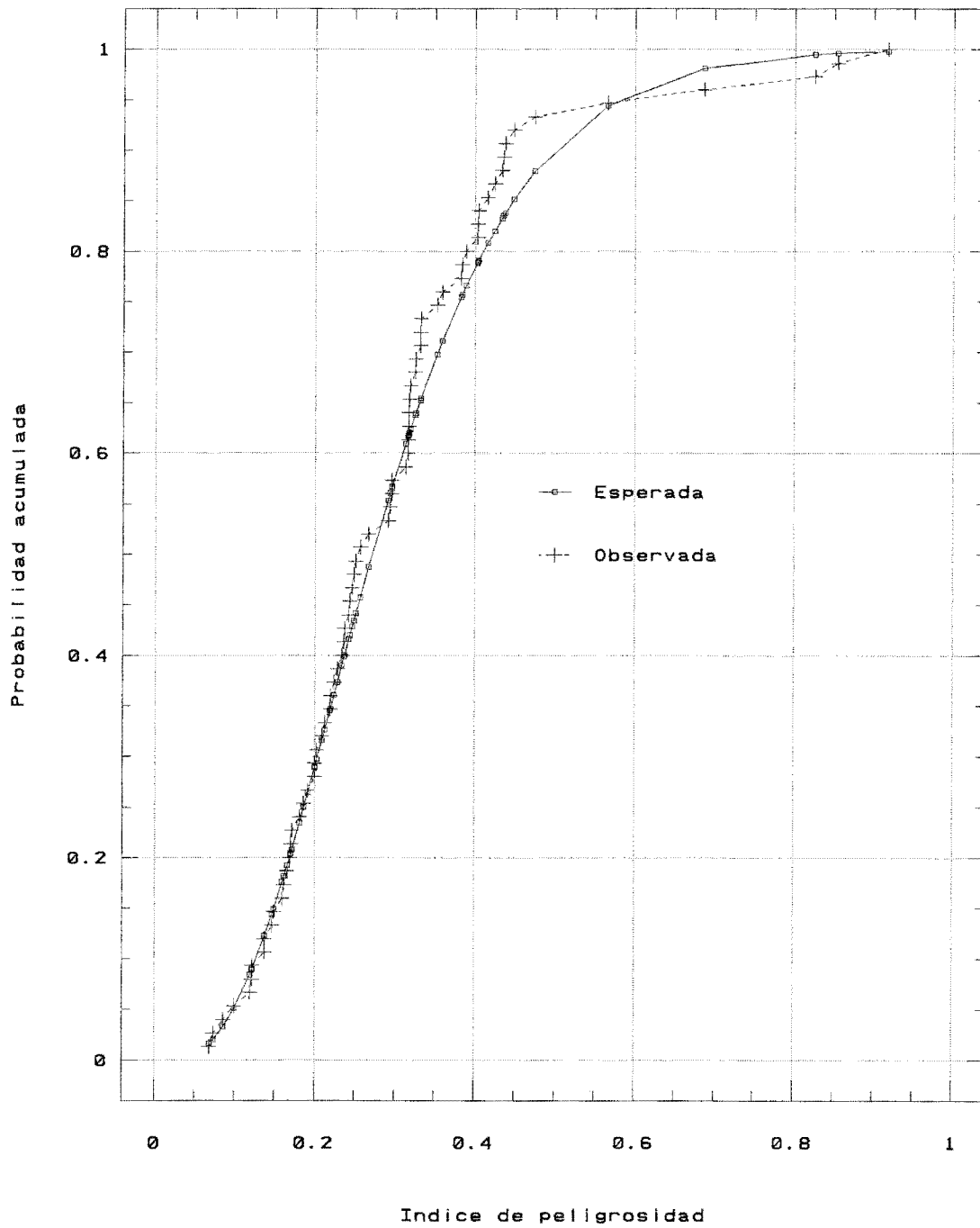


Figura 7.19.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo ponderados en el periodo *posterior* a las actuaciones de *condicionamiento*.

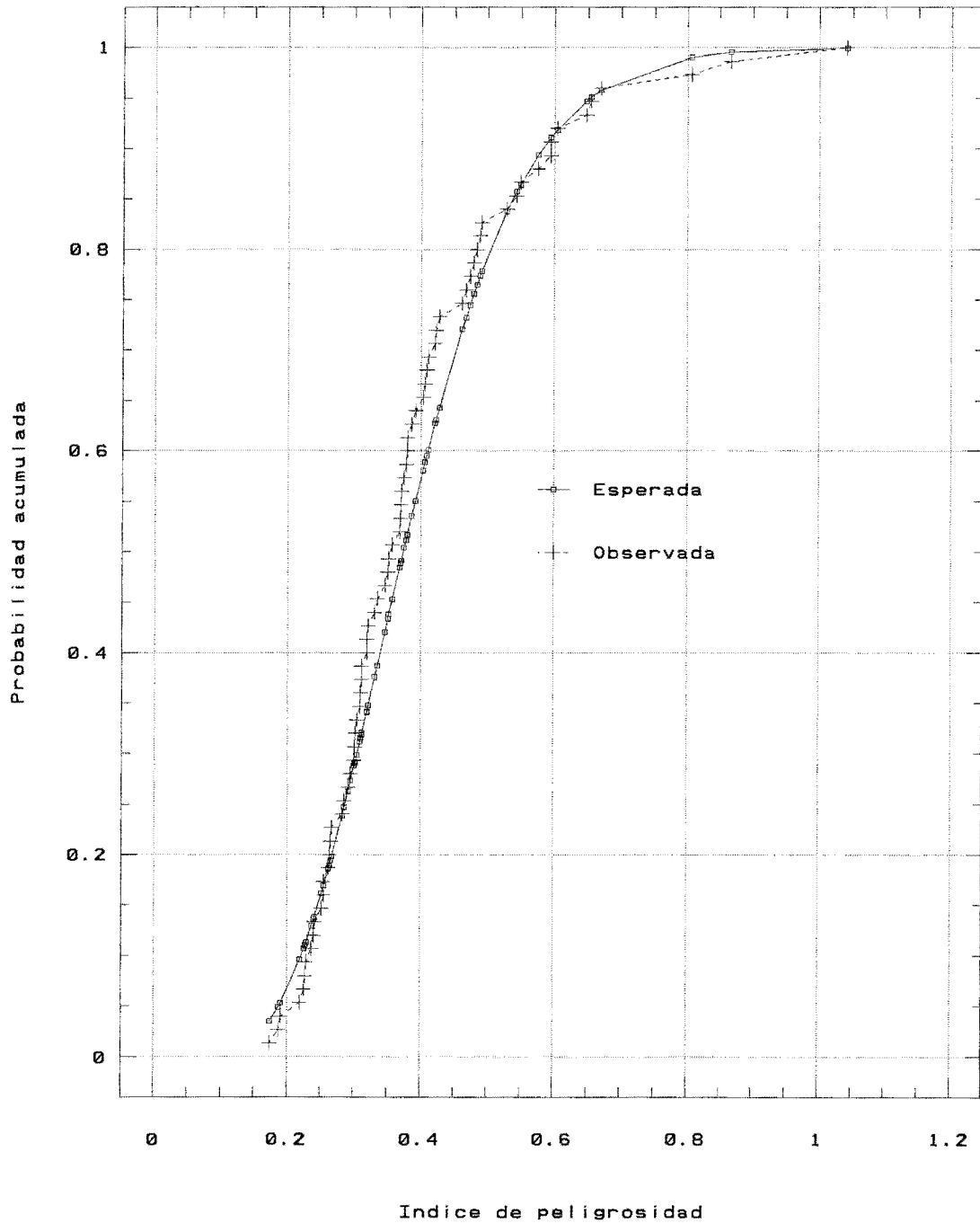


Figura 7.20.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de perigosidade a largo plazo ponderados en el período anterior a las actuaciones de refuerzo.

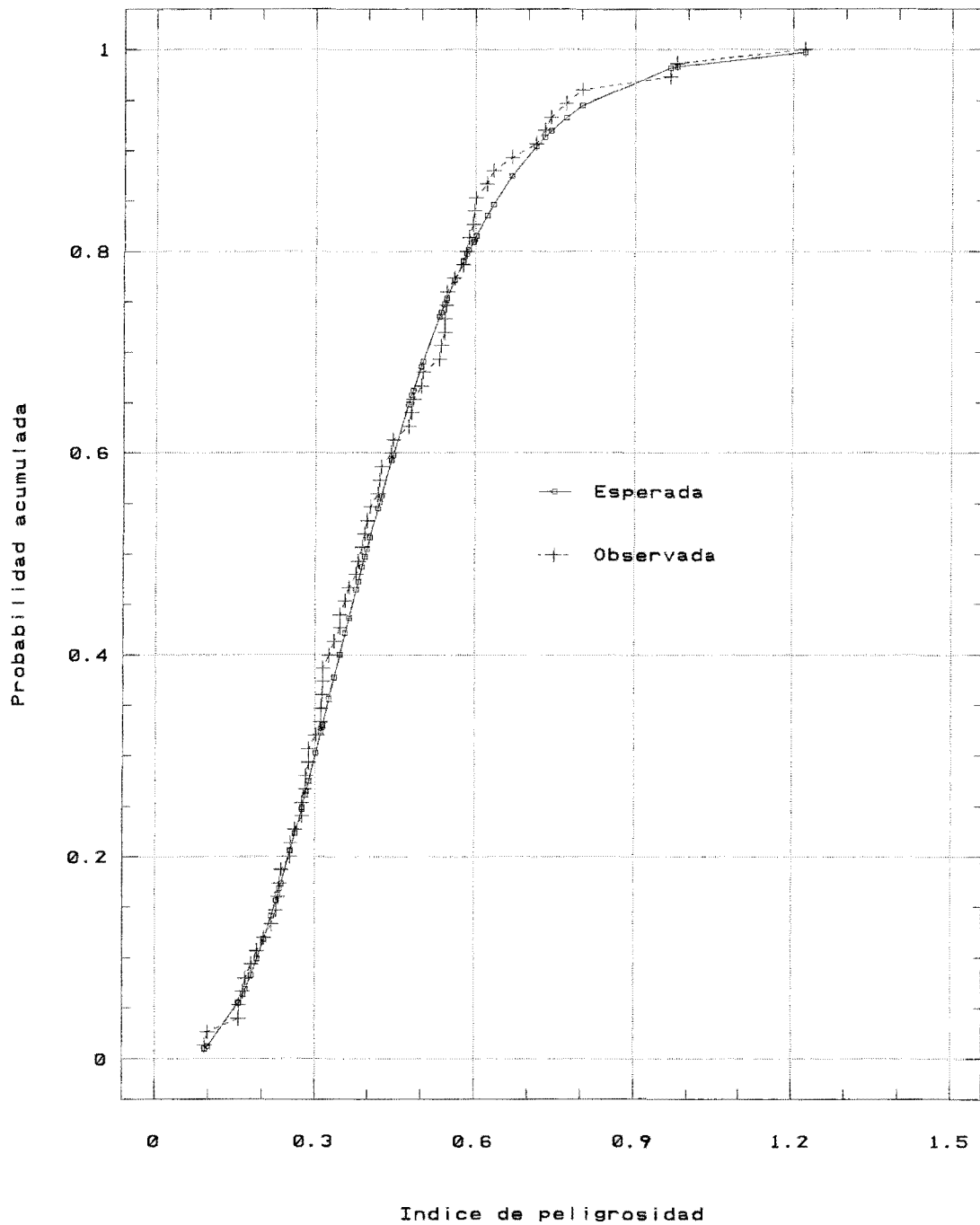


Figura 7.21.- Función de distribución *Gamma* ajustada a la probabilidad acumulada de los índices de peligrosidad a largo plazo ponderados en el período *posterior* a las actuaciones de *refuerzo*.

7.5.- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO CLÁSICO Y EL EMPÍRICO BAYESIANO.

Como se ha visto en apartados anteriores, en las tablas 7.1 a 7.4 se ofrecieron los resultados de la estimación de los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones de *acondicionamiento* y *refuerzo de firme*. A partir de estas estimaciones, aplicando la fórmula 5.1, se evaluó y reflejó en dichas tablas la efectividad de todas y cada una de las actuaciones mencionadas. Después de haber evaluado la efectividad de las actuaciones ejecutadas en cada uno de los tramos de carretera, se emplearon los *contrastos de significación binomial y normal* para verificar que dicha efectividad era estadísticamente *significativa*.

De una manera análoga, en las tablas 7.17 a 7.20 se reflejaron los *índices de peligrosidad a largo plazo* estimados antes y después de las mismas actuaciones mediante el método *empírico bayesiano*. Posteriormente se evaluó la efectividad de las actuaciones ejecutadas en los distintos tramos de carretera a través de la ecuación 5.31 y se reflejaron en las tablas 7.17 y 7.20 dichos resultados conjuntamente con la *significación* del cambio registrado en los *índices de peligrosidad a largo plazo*.

Por otra parte, en las tablas 7.5 y 7.6 se ofrecieron los resúmenes de los *contrastos de significación* realizados al evaluar la efectividad de las actuaciones de *acondicionamiento* y *refuerzo de firme* de carreteras mediante los métodos *clásicos*. A su vez en las tablas 7.21 y 7.22 se reflejaron los valores correspondientes al método *empírico bayesiano*.

En este apartado se procederá a analizar conjuntamente los valores de los resultados obtenidos por ambos métodos y que quedaron reflejados en las tablas mencionadas

anteriormente. Este análisis se realizará con el fin de comparar estos valores resultantes con el objeto de conocer cuál de los dos métodos es más adecuado para la evaluación de la efectividad de las Actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación en función de las características de la información disponible.

Como se ha venido haciendo a lo largo de este capítulo, en primer lugar, se compararán los resultados de las actuaciones de *acondicionamiento* y, en segundo lugar, se compararán los resultados de las actuaciones de *refuerzo de firme*.

• Comparación de los resultados de las actuaciones de acondicionamiento.

Si se comparan las tablas 7.5 y 7.20 se observa que en ambas hay una mayoría de tramos donde se produjo una disminución de la peligrosidad después de ejecutadas las actuaciones de *acondicionamiento*. Aplicando el método *clásico* a estas actuaciones, se obtuvieron 63 tramos donde se observó una reducción del indicador de la peligrosidad; mientras que aplicando el método *bayesiano* esa cifra se elevó a 68 tramos. Análogamente, el número de tramos de carretera donde la probabilidad de que la disminución de la peligrosidad fuese *significativa* se redujo a 46 en el método *clásico* y a 44 en el método *empírico bayesiano* tomando, en ambos casos, un *nivel de confianza* del 90%.

Por otra parte, según sea el método *clásico* o el *bayesiano* el que se aplique, fueron 12 y 7 los tramos de carretera donde se produjo un incremento de la peligrosidad después de las actuaciones de *acondicionamiento*. El número de tramos de carretera donde se confirmó que ese incremento resultaba *significativo* fue de 3, según el método *clásico*, y solamente uno de los tramos, según el método *empírico bayesiano*.

En consecuencia, cualquiera de ambos métodos confirma que la mayor parte de las actuaciones de *acondicionamiento* se produjo una mejora *significativa* de las condiciones de seguridad en la circulación. Al mismo tiempo, ambos métodos ponen también de manifiesto que son muy escasas las actuaciones en las que se produjo un empeoramiento *significativo* de las condiciones de circulación.

A partir de los resultados reflejados, por un lado, en las tablas 7.1 y 7.2 y, por otro, en las tablas 7.17 y 7.18 - conjuntamente con los anexos correspondientes - se confeccionó la tabla 7.27, donde se ofrece un cuadro comparativo con los resultados estimados mediante ambos métodos.

Nótese cómo comparando resultados extremos, el *índice de peligrosidad (I)* más elevado de las 75 actuaciones de *acondicionamiento* analizadas fue, en el período *anterior* , igual a 5,7996; mientras que el mayor valor del *índice de peligrosidad a largo plazo (ILP)* sólo alcanzó 1,5780. Por el contrario al tomar en consideración los valores mínimos, el *índice de peligrosidad* resultó ser de 0,0466, mientras que el *índice de peligrosidad a largo plazo* aumenta hasta 0,1645.

Aplicando el mismo razonamiento en el período posterior también se confirma la existencia de una tendencia similar: el valor máximo del *índice de peligrosidad* fue de 1,8483; mientras que el del *índice de peligrosidad a largo plazo* desciende hasta 1,1407. Por otra parte, si se tienen ahora los valores mínimos, el del *índice de peligrosidad* fue 0,0249 y el del *índice de peligrosidad a largo plazo* fue 0,0653.

Aunque estos últimos resultados siguen confirmando la tendencia observada el período anterior, esta vez el incremento y la reducción de la peligrosidad son mucho

menores a causa de que los valores de los *índices de peligrosidad* son también más uniformes. Esta uniformidad se puede observar en los valores de la varianza de las muestras relativas a los *índices de peligrosidad* antes y después de las actuaciones: si en el período anterior la varianza era igual a 0,8855, en el período posterior ésta se redujo hasta 0,1514.

Por otro lado, en la tabla 7.27 se puede observar que al tomar como estimador el *índice de peligrosidad a largo plazo* se produce una reducción de la varianza en ambos períodos con respecto a la varianza de la muestra de los *índices de peligrosidad*. En el período anterior se pasó de una varianza de la muestra de los *índices de peligrosidad* de 0,8855 a una varianza de los *índices de peligrosidad a largo plazo* de 0,1206 y, en el período posterior, se produjo una reducción de la varianza de los citados estimadores desde 0,1514 a 0,0287.

Siguiendo con el análisis de la tabla 7.27, al estimar, en el conjunto de actuaciones, los *índices* promedio antes y después de la ejecución por ambos métodos se puede observar que se produce una variación en los resultados. Antes de la ejecución de las actuaciones el promedio del *índice de peligrosidad* desciende de un valor de 0,8908 a un valor de 0,6759 en el promedio del *índice de peligrosidad a largo plazo*, pasando ambos valores de 0,3976 a 0,2979 después de la ejecución de las actuaciones.

La disminución de la estimación de la peligrosidad media a largo plazo en ambos períodos, hace que al evaluar la efectividad del conjunto de actuaciones de acondicionamiento, se obtenga según el método *clásico* una efectividad promedio de un 55,36% y según el método *empírico bayesiano* una efectividad promedio de un 55,92%. Es decir, los resultados obtenidos mediante uno u otro procedimiento son casi idénticos para el conjunto de las actuaciones.

Estos fenómenos de reducción se puede ver más claramente en las figuras 7.22 y 7.23 donde están representados en el eje de ordenadas los *índices de peligrosidad*, los *índices de peligrosidad a largo plazo* y el promedio del primero de dichos índices. El eje de abscisas representa los tramos de carretera donde se ejecutaron las actuaciones. En este eje los tramos de carretera aparecen ordenados en función del valor de los *índices de peligrosidad*. Siendo el emplazamiento nº 1 aquel tramo de carretera con un *índice de peligrosidad* menor y el emplazamiento nº 75 corresponde al tramo de carretera con un *índice de peligrosidad* mayor.

En ambas figuras se puede observar como tiende a disminuir la estimación a largo plazo de la peligrosidad en aquellos tramos donde el *índice de peligrosidad* es elevado con respecto a la media. En contraposición, se tiene que en los tramos donde el *índice de peligrosidad* es menor que la media, la estimación del *índice de peligrosidad a largo plazo* tiende a ser mayor. Pero básicamente se observa un drástico descenso de la estimación de la peligrosidad en aquellos tramos con los valores más elevados.

Si se analizan los resultados de la efectividad estimada en los distintos tramos de carretera, puede verse que la efectividad individual *mínima* evaluada mediante el método *clásico* fue de un -807,41%, mientras que con el *método empírico bayesiano* fue de -120,11%. Por otra parte, la estimación de la efectividad *máxima* fue, a través del método *clásico*, de un 94,20% y con el *empírico bayesiano* de un 85,13%.

En la figura 7.24 se presentan los resultados de la efectividad obtenida en cada tramo tanto por el método *clásico* (EC) como por el método *empírico bayesiano* (EB). Tal y como se puede observar en dicha figura, los valores extremos obtenidos por el método *clásico* son, de nuevo, llevados hacia la media al emplear el método *empírico bayesiano*.

En el mismo cuadro comparativo están reflejados también los resultados obtenidos tanto para el *límite superior del índice de peligrosidad (IS)* como para el del *índice de peligrosidad a largo plazo (ILPS)*. Los límites superiores dan una idea de cual puede ser la peligrosidad en las condiciones más adversas en un determinado tramo. Como puede observarse, también aquí los resultados están en concordancia con lo explicado anteriormente; pero, como es lógico, en este caso se observa una mayor variabilidad de los valores.

Por otra parte, en las condiciones más desfavorables, la efectividad obtenida mediante el método *clásico* fue de un 44,68%, mientras que el valor de la misma estimado mediante el método *empírico bayesiano* ascendió a un 51,86%.

• **Comparación de los resultados de las actuaciones de refuerzos de firme.**

En el caso de los *refuerzos de firme*, al comparar las tablas 7.6 y 7.22 se puede observar que, en el conjunto de actuaciones, son una minoría las que produjeron una mejora o empeoramiento *significativo* de las condiciones de seguridad en la circulación. Mediante el método *clásico* se estimó una disminución del *índice de peligrosidad* en 37 tramos y un incremento en 35. Por otra parte, al utilizar el método *empírico bayesiano* se estimó una reducción del *índice de peligrosidad a largo plazo* en 32 tramos y un incremento de dicho índice en otros 43. Las 3 actuaciones de diferencia entre ambos métodos corresponde a aquellos tramos donde no se habían registrado accidentes ni antes y ni después de las mismas y, por lo tanto, no pueden ser evaluadas por el método *clásico*; sin embargo, tales actuaciones si pueden ser evaluadas con el método *empírico bayesiano* debido a que éste último estima en ellas el *índice de peligrosidad a largo plazo*.

	ÍNDICE ANTERIOR		ÍNDICE POSTERIOR		ÍNDICE PROMEDIO			VARIANZA ÍNDICES		EFECTIVIDAD MÍNIMA			EFECTIVIDAD MÁXIMA		
	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Antes	Después	E(%)	Antes	Después	Antes	Después	E(%)	Antes	Después	E(%)
<i>I</i>	5,7996	0,0466	1,8483	0,0249	0,8908	0,3976	55,36	0,8855	0,1514	0,1341	1,2172	-807,41	0,4302	0,0249	94,20
<i>IS</i>	8,8429	0,1536	3,5447	0,0822	1,3645	0,7548	44,68	1,8894	0,5072	0,4422	1,6271	-267,94	0,4419	0,0822	83,29
<i>ILP</i>	1,5780	0,1645	1,1407	0,0653	0,6759	0,2979	55,92	0,1206	0,0287	0,5183	1,1407	-120,11	0,4659	0,0693	85,13
<i>ILPS</i>	2,5260	0,3092	1,7135	0,1208	1,1426	0,5501	51,86	0,2757	0,0688	0,9741	1,7135	-75,91	0,7146	0,1558	78,20

Tabla 7.27.- Comparación entre el Método Clásico y Bayesiano en acondicionamientos.

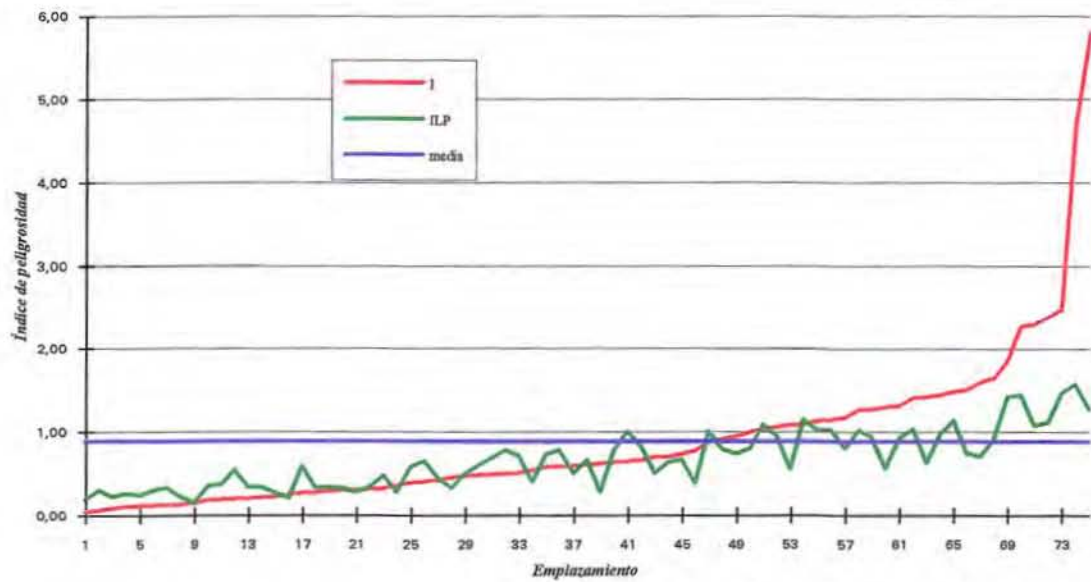


Figura 7.22.- Comparación entre el índice de peligrosidad y el índice de peligrosidad a largo plazo en el período anterior en acondicionamientos.

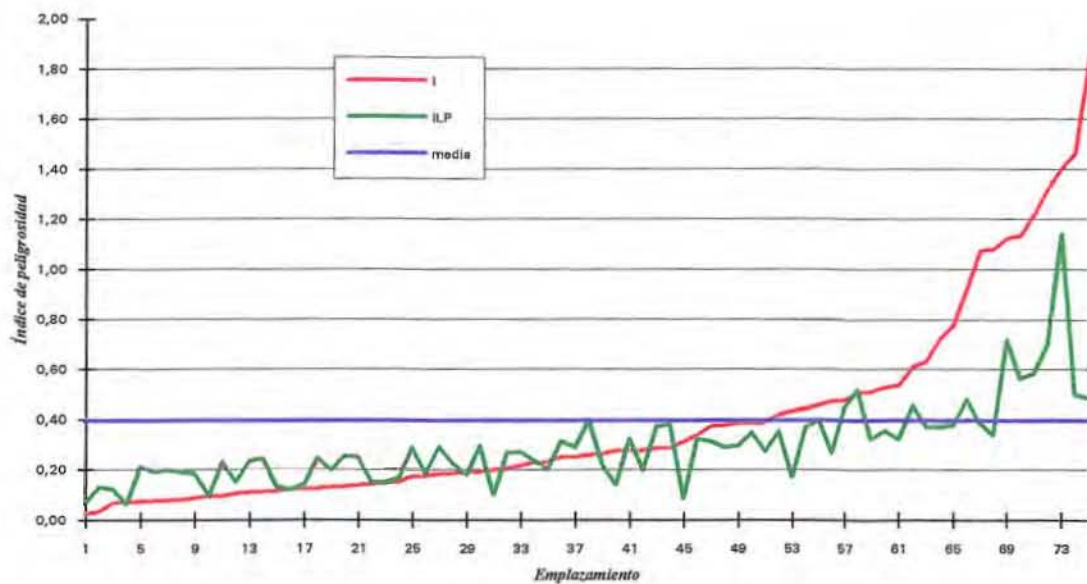


Figura 7.23.- Comparación entre el índice de peligrosidad y el índice de peligrosidad a largo plazo en el período posterior en acondicionamientos.

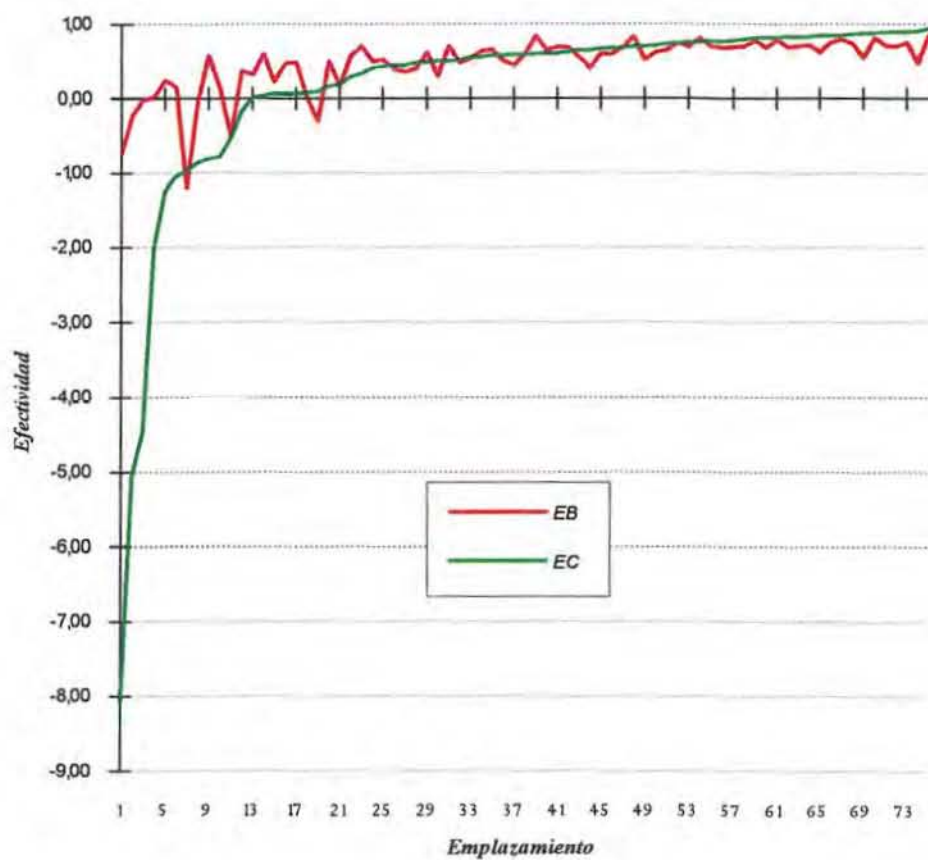


Figura 7.24.- Comparación entre las efectividades obtenidas mediante el método clásico y el empírico bayesiano en actuaciones de acondicionamiento.

Por otro lado, al utilizar el método *clásico*, concretamente el contraste *binomial*, de los 37 tramos donde se estimó una disminución, ésta resultó ser *significativa* solamente en 6 de ellos, y de los 35 tramos donde se estimó un incremento, éste solamente fue *significativo* en 7 de ellos.

Al utilizar el método *empírico bayesiano*, de los 32 tramos donde disminuyó la peligrosidad, dicha reducción es *significativa* en 12 y de los 43 tramos donde se incrementó la peligrosidad es *significativo* el incremento en 13.

Como puede observarse, ninguno de los dos métodos ofrece como resultado el hecho de que en una mayoría *significativa* de actuaciones se produzcan un incremento o reducción de la peligrosidad después de la ejecución de las mismas. Si bien en ambos casos, al utilizar el método *empírico bayesiano*, éste estima un mayor número de actuaciones *significativas*.

A partir de los resultados reflejados, por un lado, en las tablas 7.3 y 7.4 y, por otro, en las tablas 7.19 y 7.20 (conjuntamente con los anexos correspondientes) se confeccionó la tabla 7.28, donde puede observarse un cuadro comparativo de los resultados estimados por ambos métodos y que se explican a continuación.

En la tabla 7.28 puede verse cómo el *índice de peligrosidad* mayor, antes de las actuaciones de *refuerzo* era igual a 1,7626; mientras que el máximo *índice de peligrosidad a largo plazo* era 1,0011. Por otro lado, el *índice de peligrosidad* menor era, en este caso, igual a cero mientras que el *índice de peligrosidad a largo plazo* era 0,1746.

En la misma tabla puede observarse como, en el período posterior, el índice máximo pasa de un valor de 3,9865 a 1,1276 y el índice mínimo de 0,0000 a 0,0941.

Al analizar en la tabla 7.28 la media de los índices antes y después de las actuaciones, se observa que en el período anterior se produce una reducción de la peligrosidad de 0,4733 a 0,4063 y, a su vez, en el período posterior disminuye de 0,5726 a 0,4347. Ello hace que al evaluar la efectividad de las actuaciones en su conjunto, se produzca un resultado con el método *clásico* igual a -20,98%; siendo, en cambio, el resultado -6,99% con el método *empírico bayesiano*.

Por otra parte, la varianza de la muestra de los *índices de peligrosidad* en el período anterior a las actuaciones pasa de un valor de 0,1274 a 0,0258. En el período posterior la varianza pasa de 0,4173 a 0,0530.

En las figuras 7.25 y 7.26 pueden observarse gráficamente estos fenómenos de reducción. Nótese que cuando los valores del *índice de peligrosidad* están por debajo de la media, el *índice de peligrosidad a largo plazo* tiende a ser superior; mientras que cuando los valores del *índice de peligrosidad* están por encima de la media, el *índice de peligrosidad a largo plazo* tiende a ser menor. Comparando ambas figuras se puede ver con claridad que este comportamiento es más acusado en el período posterior a la ejecución de dichas actuaciones.

Por otro lado, el análisis de la efectividad de los *refuerzos de firme* muestra como la efectividad mínima estimada con el método *clásico* (EC) era igual a -828,72%; mientras que la estimación de la efectividad mínima con el método *empírico bayesiano* (EB) era de -139,70%. La efectividad máxima resultó ser de 86,85% con el método *clásico* y de 80,47% con el *bayesiano*. En la figura 7.27 se puede observar este comportamiento; en ella se ve este traslado de los valores extremos de la efectividad negativa.

	ÍNDICE ANTERIOR		ÍNDICE POSTERIOR		ÍNDICE PROMEDIO			VARIANZA ÍNDICES		EFECTIVIDAD MÍNIMA			EFECTIVIDAD MÁXIMA		
	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Antes	Después	E(%)	Antes	Después	Antes	Después	E(%)	Antes	Después	E(%)
<i>I</i>	1,7626	0,0000	3,9865	0,0000	0,4733	0,5726	-20,98	0,1274	0,4173	0,0771	0,7160	-828,72	0,5257	0,0691	86,85
<i>IS</i>	5,0841	0,1391	5,1114	0,1197	0,8251	0,8595	-4,18	0,7244	1,0049	0,1624	0,7877	-384,89	0,6750	0,2279	66,25
<i>ILP</i>	1,0011	0,1746	1,1276	0,0941	0,4063	0,4347	-6,99	0,0258	0,0530	0,4572	1,0958	-139,70	0,4818	0,0941	80,47
<i>ILPS</i>	1,4448	0,3448	1,8256	0,2008	0,6822	0,7549	-10,66	0,0508	0,1308	0,5241	1,1533	-120,05	0,7660	0,2008	73,38

Tabla 7.28.- Comparación entre el Método Clásico y Bayesiano en refuerzos.

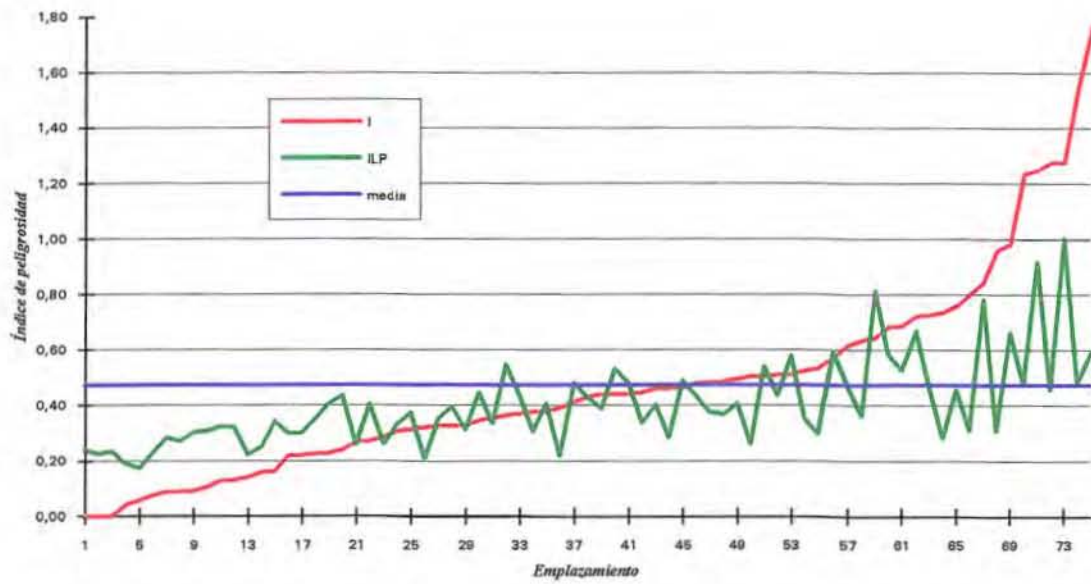


Figura 7.25.- Comparación entre el índice de peligrosidad y el índice de peligrosidad a largo plazo en el período anterior en refuerzos.

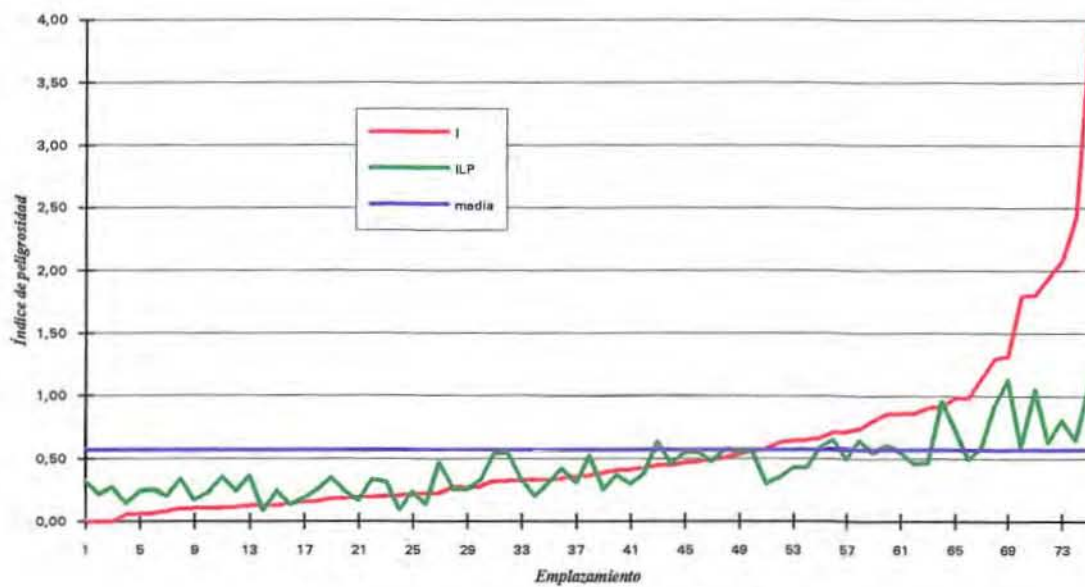


Figura 7.26.- Comparación entre el índice de peligrosidad y el índice de peligrosidad a largo plazo en el período posterior en refuerzos.

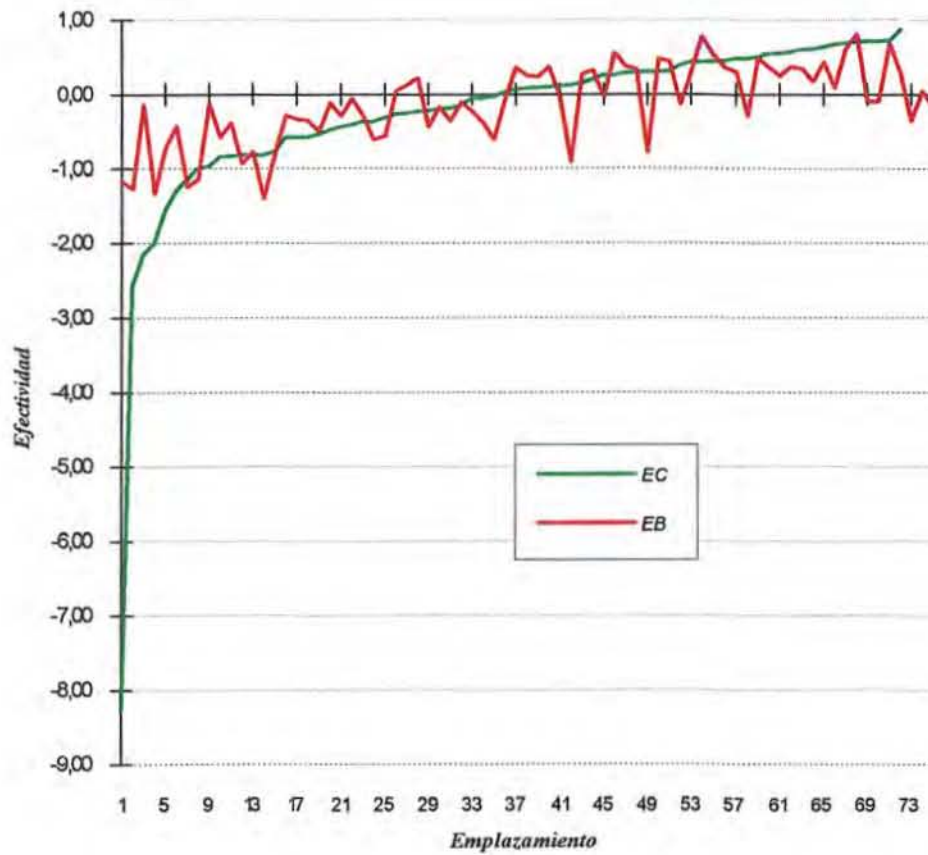


Figura 7.27.- Comparación entre las efectividades obtenidas mediante el método *clásico* y el *empírico bayesiano* en actuaciones de *refuerzo de firmas*.

• **Consideraciones derivadas de la comparación de los resultados estimados por ambos métodos.**

Como ya se sabe y se ha explicado en esta tesis, las *actuaciones puntuales de mejora de seguridad en la circulación* suelen ser llevadas a cabo en aquellos emplazamientos que arrojan un *número de accidentes registrados* o un *índice de peligrosidad* elevado con respecto a la media de un conjunto de emplazamientos similares. Estos emplazamientos se denominaron *puntos negros* o *emplazamientos peligrosos*.

También se había dicho que existen otro tipo de actuaciones que sin estar puntualmente localizadas incrementan la seguridad en la circulación. Estas actuaciones se consideraron como *preventivas*; es decir, se ejecutan para mejorar las condiciones de seguridad en la circulación en los tramos donde están los emplazamientos, sin esperar a que la acumulación de accidentes fuerce la decisión de actuar sobre los mismos.

Asimismo, se ha visto que, debido al fenómeno de *regresión hacia la media*, aunque no se hubieran producido las actuaciones puntuales de mejora de seguridad en la circulación en dichos *emplazamientos peligrosos*, el *índice de peligrosidad* probablemente hubiera disminuido de valor después de que se hubieran ejecutado las mismas. Por el contrario, con independencia de que se haya llevado a cabo o no una actuación preventiva, en aquellos emplazamientos donde el *índice de peligrosidad* es bajo, se espera que, después de ejecutada la actuación, se incremente el valor de dicho *índice*.

Todo ello genera, cuando se realizan estudios *antes y después convencionales*, una sobrestimación de la efectividad de las *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación* y una infraestimación de la efectividad de las actuaciones *preventivas*.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que los tramos de carretera de la Comunidad de Madrid donde se ejecutaron tanto actuaciones de *acondicionamiento* como de *refuerzo de firmes* y donde se han observado valores altos del *índice de peligrosidad* se pueden considerar como *emplazamientos peligrosos*; cosa que ocurre aunque no hayan sido identificados expresamente como *puntos negros* susceptibles de ser objeto de actuaciones específicas de mejora de la seguridad en la circulación. En contraposición, el resto de emplazamientos que registraron valores poco elevados del *índice de peligrosidad* y donde se ejecutaron también actuaciones de *acondicionamiento* y de *refuerzo de firmes*, se pueden considerar como emplazamientos en los que se han ejecutado actuaciones *preventivas*.

Retomando los resultados descritos anteriormente, se puede decir que la diferencia numérica entre los resultados obtenidos por uno u otro método, tanto en el caso de los *acondicionamientos* como en el de los *refuerzos de firme*, se explica por la circunstancia de que el método *empírico bayesiano* evalúa la efectividad de las actuaciones mediante el *índice de peligrosidad a largo plazo* en vez de hacerlo, como en el análisis clásico, a partir del *índice de peligrosidad*.

Estos resultados permiten afirmar que *el método empírico bayesiano tiende a amortiguar los valores extremos llevándolos hacia la media*. Es decir, el empleo de dicho método produce una mayor uniformidad en la muestra, reduciendo los valores extremos de los índices.

Resumiendo, el método *empírico bayesiano*, al tener en cuenta el fenómeno de *regresión a la media* en la estimación del *índice de peligrosidad a largo plazo*, elimina la sobrevaloración de la efectividad de las *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación* y la infraevaluación de la efectividad de las *actuaciones preventivas*.

7.6.- COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN FINAL DE LOS RESULTADOS EN EL CONJUNTO DE ACTUACIONES.

A modo introducción, cabe recordar que las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo de firmes no son, en sí mismas, actuaciones específicas de mejora de la seguridad en la circulación. Su ejecución, en la mayoría de los casos, se debe a otros objetivos diferentes a los de seguridad, tales como los de accesibilidad, ordenación del territorio, etc. Hubiera sido mucho más ilustrativo haber podido evaluar la efectividad de *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación*. Pero, como ya se advirtió al comienzo de este capítulo, la elección de tales actuaciones de acondicionamiento y refuerzo viene forzada por la carencia de datos sobre *actuaciones puntuales de mejora de la seguridad en la circulación* en el actual sistema de información de la CAM. Esta limitación que afecta al corpus de datos no invalida, ni mucho menos, las conclusiones y alcance operativo de un análisis comparativo de herramientas estadísticas que constituye el objeto fundamental de esta investigación doctoral.

Dicho esto, sólo resta hacer, en este último apartado, unas consideraciones finales acerca de los resultados de la efectividad promedio obtenida por ambos métodos y comprobar si estos resultados están en concordancia con los de otros estudios realizados anteriormente por otros investigadores.

En la tabla 7.29 queda reflejada la efectividad promedio de las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo de firmes tomadas en su conjunto, tanto por el método *clásico* como por el empírico *bayesiano*, en ambos casos con y sin corrección de la *tendencia temporal*.

EFECTIVIDAD	SIN CORRECCIÓN DE LA TENDENCIA		CON CORRECCIÓN DE LA TENDENCIA	
	Método Clásico	Método Empírico Bayesiano	Método Clásico	Método Empírico Bayesiano
<i>Acondicionamiento de carreteras</i>	55,36%	55,92%	54,51%	53,77%
<i>Refuerzos de firme</i>	-20,98%	-6,99%	-21,70%	-9,57%

Tabla 7.29.- Efectividad promedio de las actuaciones de acondicionamiento y refuerzo.

Estos resultados expresan una efectividad promedio, ya que, como se ha indicado a lo largo de este capítulo, la efectividad de cada actuación a nivel individual es una variable aleatoria y, por lo tanto, los valores de la efectividad en los diferentes tramos de carretera son diferentes.

Los valores de la efectividad de las actuaciones de *acondicionamiento* obtenidos por ambos métodos son muy similares, tanto si se toma o no en cuenta la corrección de la *tendencia temporal*. La efectividad promedio es del orden de un 55%, cifra que resulta *significativa* a un *nivel de confianza* del 95%. Esto confirma la hipótesis tantas veces enunciada, pero rara vez verificada empíricamente, de que la mejora de las condiciones (geométricas, de señalización, etc.) de la carretera favorece significativamente y en términos generales la mejora de la seguridad en la circulación.

Volviendo a la efectividad de las actuaciones de *acondicionamiento* ejecutadas en la Comunidad de Madrid, hay que aclarar que este tipo de actuaciones engloba en realidad la combinación de varias actuaciones de naturaleza muy dispar: *ensanche de calzada*, *mejora*

de curvas, mejora de la señalización vertical y horizontal, refuerzo del firme, mejora de las barreras de seguridad, etc. En esta investigación, no se pretendió analizar por separado dichas actuaciones, sino que se intentó evaluar la utilidad de una metodología que, por extensión, pudiera ser aplicada, si la información disponible lo permite, también en el caso de que tales actuaciones se hubieran ejecutado separadamente.

Con respecto a la efectividad promedio estimada en el conjunto de actuaciones, el resultado concuerda con lo que cabría esperar, ya que aquí se confirma en líneas generales el resultado al que llegaron otras investigaciones precedentes (Transportation Research Board, 1987; Sinha, 1985; Federal Highway Administration, 1982a y 1982b). Si bien algunos estudios se basan en herramientas de análisis diferentes (Zeeger et al, 1987), todos ellos confirman que los distintos elementos del diseño de la carretera son factores que pueden ser controlados por los ingenieros de caminos. Por lo tanto, un buen diseño geométrico proporciona a los conductores unas condiciones de circulación e información que les permite detectar y evaluar conflictos, así como tomar las decisiones más oportunas para evitar peligros potenciales, con la consiguiente mejora de la seguridad en la circulación.

En lo que concierne a la evaluación de la efectividad promedio de los *refuerzos de firmes*, ésta es diferente según se utilice el método *clásico* o el *bayesiano*. Las diferencias observadas entre el método *clásico* y el método *empírico bayesiano* son atribuibles a que al aplicar este último se consigue eliminar las disparidades asociadas al fenómeno de *regresión a la media*.

En ambos métodos, el hecho de que se utilice la corrección de la *tendencia temporal* no tiene una gran influencia en el resultado que se obtiene. Como ya se dijo anteriormente, la *tendencia temporal* de la accidentalidad en la Comunidad de Madrid desde 1989 a 1995

hace que los *factores de ponderación* compensen entre sí el número de accidentes antes y después de las actuaciones.

La efectividad promedio en las actuaciones de *refuerzo* en los cuatro casos expuestos en la tabla 7.29 resulta poco satisfactoria, dando en promedio como resultado un incremento de la peligrosidad en el conjunto de los tramos donde se realizan dichas actuaciones. Sin embargo, hay que puntualizar que este incremento de la peligrosidad no es *significativo* (al 95% del nivel de confianza) desde el punto de vista estadístico y, por lo tanto, puede ser atribuible al azar u otras causas diferentes al hecho de la ejecución de las actuaciones.

Como se sabe, existe una gran controversia sobre la efectividad de los *refuerzos de firme*, ya que mientras algunos autores opinan que mejoran la seguridad en la circulación, otros afirman lo contrario. La influencia del *refuerzo de firmes* sobre las condiciones de la seguridad en la circulación es el resultado de dos efectos contrapuestos: por un lado se mejora la calidad de la conducción al eliminar la rugosidad del firme, lo cual provoca que el conductor incremente la velocidad aumentando con ello el riesgo de accidentes; por otro, aumenta la resistencia del pavimento al deslizamiento, lo cual hace disminuir la distancia de parada a la vez que mejora la maniobrabilidad del vehículo cuando el pavimento está húmedo con lo cual cabría esperar una disminución del riesgo de accidentes (Transportation Research Board, 1987).

En el caso de los *refuerzos de firme* en las carreteras de la CAM, hay que considerar que estas actuaciones han sido realizadas en carreteras rurales, y no han ido acompañadas de ningún tipo de mejora geométrica. Por lo tanto, es posible que cuando las condiciones geométricas previas sean buenas, la actuación de *refuerzo* favorezca la seguridad en la

circulación, debido a las razones expuestas anteriormente. Sin embargo, cuando las condiciones geométricas de partida son deficientes, posiblemente se disminuya la seguridad, ya que el conductor percibe un riesgo menor que el real y tiende a incrementar la velocidad de conducción aconsejable produciéndose con ello un mayor número de accidentes.

Por último, para llegar a conclusiones más sólidas sobre estas hipótesis que se acaban de enunciar, se necesitaría una muestra de actuaciones mucho mayor de la que se ha utilizado para esta investigación, ya que como se ha visto con anterioridad, la evaluación de la efectividad no resulta *significativa* con la muestra empleada a los niveles de confianza con los que se ha venido operando.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES.

Las conclusiones más importantes de esta tesis son las siguientes:

1. El *método clásico*, basado en la comparación del *índice de peligrosidad* en los períodos anterior y posterior a la ejecución de las actuaciones, es fácilmente aplicable a la evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación. Sin embargo, este método posee el inconveniente de proporcionar evaluaciones sesgadas de la efectividad de las actuaciones; ello es debido a que en su aplicación no se tienen en cuenta los efectos derivados del fenómeno de *regresión a la media*. En este caso, el sesgo que este fenómeno introduce en la estimación de la efectividad de las actuaciones se incrementa en la medida en que los índices de peligrosidad de cada uno de los emplazamientos adoptan valores que se distancian de la media correspondiente al conjunto de emplazamientos evaluados.

2. En esta tesis se demuestra la viabilidad de la aplicación del *método empírico bayesiano* a la evaluación de la efectividad de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación. En este caso, la evaluación de la efectividad se basa en la comparación del *índice de peligrosidad a largo plazo* antes y después de la actuaciones. La estimación de este *índice de peligrosidad a largo plazo* resulta matemáticamente siempre más compleja que la estimación del *índice de peligrosidad* utilizado en el método clásico. Sin embargo, dicha complejidad presenta como contrapartida la ventaja de neutralizar los efectos negativos inherentes al fenómeno de *regresión a la media*.

3. El procedimiento de evaluación de la efectividad basado en el *método empírico bayesiano* se adapta mejor a la naturaleza estocástica de los accidentes que el procedimiento evaluatorio basado en el *método clásico*. Esto es debido a que el primero de los métodos citados tiende a eliminar los errores de sobreestimación o infraestimación que se producen al evaluar la efectividad de las actuaciones a través del *método clásico*. Por lo tanto, la ganancia de *precisión* que se obtiene como resultado de la aplicación del *método empírico bayesiano* cuando la muestra de los *índices de peligrosidad* es muy heterogénea lo hace más recomendable para la evaluación de la efectividad de las *actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación*.

4. Esta tesis constata también que la gran mayoría de las *actuaciones de acondicionamiento* realizadas en la Comunidad de Madrid en el período 1985 a 1993 resultaron realmente *efectivas*, desde el punto de vista estadístico, como medidas que contribuyeron a la reducción de la peligrosidad de los tramos de carretera donde fueron ejecutadas.

5. La aplicación de estos métodos a la evaluación de la efectividad en la reducción de la peligrosidad en las *actuaciones de refuerzo de firme* realizadas en la Comunidad de Madrid en el período 1985 a 1993 dio como resultado que, en la mayoría de los casos, la efectividad o no efectividad de dichas actuaciones, consideradas éstas individualmente, no era significativa. Por lo tanto, desde un punto de vista estadístico, se puede concluir que estas *actuaciones de refuerzo de firme* apenas tuvieron incidencia en la mejora o empeoramiento de la seguridad en la circulación. Aunque, consideradas en su conjunto, se observa una tendencia que, sin ser significativa, parece indicar que tales actuaciones suelen incrementar la peligrosidad.

6. En el caso de que la reducción de la peligrosidad de una red de carreteras de características similares a la estudiada en esta tesis sea considerada como objetivo preferencial de las actuaciones, las dos conclusiones precedentes aconsejan dar prioridad a las inversiones en acondicionamiento de carreteras sobre las inversiones destinadas a refuerzo de firmes.

Las principales recomendaciones que se derivan de esta tesis son las siguientes:

1. Para lograr una mayor precisión en la localización de los accidentes de tráfico, sería conveniente realizar un esfuerzo en el sentido de dotar con hitos hectométricos y kilométricos a las carreteras de la Comunidad de Madrid que hasta ahora carecen de ellos, modificando lo menos posible los orígenes y extremos de las mismas.

2. Para evitar errores en la identificación de *puntos negros*, el método empleado a tal fin en la Comunidad de Madrid debería ser revisado, ya que este procedimiento no tiene en cuenta que, debido a la naturaleza aleatoria de los accidentes de tráfico, el *número de accidentes registrados* en un emplazamiento durante un determinado número de años fluctúa en torno a la media. Es más, dicho procedimiento tampoco considera la variable de *exposición al riesgo* ni agrupa, para su correcta identificación, los emplazamientos en categorías homogéneas.

3. La disminución de accidentalidad en las carreteras de la Comunidad de Madrid, pasa por incrementar la dotación de recursos tanto técnicos como económicos específicamente dedicados a la seguridad vial en la Dirección General de Carreteras de la Consejería de Transportes. En este sentido, sería interesante que se creará un departamento autónomo que se ocupara de centralizar todas las investigaciones, estudios y análisis

sistemáticos sobre seguridad vial y de indicar las pautas a seguir por el resto de los servicios en esta materia.

4. Es necesario crear un banco de datos que recopile e integre las informaciones relativas a las características geométricas y actuaciones ejecutadas en las carreteras de la Comunidad con los datos procedentes de los accidentes acaecidos en las mismas. La recogida sistemática y la automatización de estas informaciones permitiría realizar análisis rigurosos de seguridad vial. Ello facilitaría, la localización de *puntos negros*, la identificación de los *factores motivantes* de los accidentes y el proceso de evaluación de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación vial. A partir de este banco de datos se podrían también desarrollar *modelos predictivos* que relacionaran los diferentes parámetros o variables explicativas de las características de las carreteras con el *número de accidentes* o el *índice de peligrosidad*.

5. Por último, los resultados de la evaluación de la efectividad las actuaciones de *acondicionamiento y refuerzos de firme* pueden ser utilizados como un factor a tener en cuenta en el análisis económico de aquéllos proyectos destinados a la mejora de infraestructura de carreras rurales con intensidades de tráfico superiores a 1.000 v/d.

Por otra parte, en cuanto a las investigaciones que pueden ser desarrolladas en el futuro cabe mencionar la realización de un estudio sobre la *falta de registro e inexactitud* de la información relativa a los accidentes de tráfico. Estas *deficiencias* dificultan, entre otras cosas, la evaluación de las actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación. Asimismo, este estudio permitiría valorar con mayor exactitud y el alcance de las pérdidas económicas y perjuicios sociales derivados de los accidentes de tráfico.

Otra futura investigación sería el diseño de un *modelo de análisis* que tome en consideración la *tendencia temporal* de la accidentalidad durante el período de la toma de datos. Dicho modelo se emplearía para mejorar la estimación del *índice de peligrosidad a largo plazo* inherente a la aplicación de los modelos bayesianos a la evaluación de la efectividad.

Por otra parte, se puede realizar la evaluación de las actuaciones al mismo tiempo que se estudia la posible *migración de accidentes* hacia los emplazamientos adyacentes. Aunque, como es sabido, este tipo de investigación está condicionada a la disponibilidad del banco de datos sobre accidentes, actuaciones y características de las carreteras cuya necesidad se mencionó en la recomendación correspondiente.

También se puede ampliar la evaluación para un número mayor de actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación, aunque para ello resulta imprescindible el registro sistemático de la información correspondiente. El análisis se puede subdividir según los *tipos y gravedad de los accidentes*. Asimismo, se pueden desagregar las actuaciones en un mayor número de *categorías*, dependiendo de las variables geométricas y del tráfico de las carreteras. En concreto, se podría realizar, entre otras, una evaluación sobre la efectividad de las *intersecciones giratorias* sobre la accidentalidad, ejecutadas en carreteras urbanas, suburbanas y rurales de la Comunidad de Madrid.

Otra futura línea de investigación corresponde a la evaluación mediante un *diseño experimental clásico*, comparando después los resultados obtenidos mediante este tipo de análisis con los que se obtengan con el *método bayesiano*.

BIBLIOGRAFÍA.

- ABBESS, C. (1984). *Assessment of remedial treatment*. Proceedings of the Seminar on Traffic Operation and Management, PTRC Summer Annual Meeting, University of Sussex, Brighton.
- ABBESS, C., JARRETT, D., y WRIGHT, C. C. (1981). *Accidents at blackspots: estimating the effectiveness of remedial treatment, with special reference to the 'regression-to-mean' effect*. Traffic Engineering and Control, Vol. 22, nº 10.
- (1983). *Bayesian Methods Applied to Road Accident Blackspot Studies*. The Statistician, Vol. 32, nº 1-2.
- AGENT, K. R., y DEEN, R. C. (1975). *Relationships between roadway geometrics and accidents*. Transportation Research Record, nº 541.
- AHLQUIST, G. (1973). *Black-spot*. Diskussionsprommemria, Linköping, Statens Vä-Och Trafikinstitut.
- ANDREASSEN, D. C., y HOQUE, M. M. (1986). *Intersection accident frequencies*. Traffic Engineering and Control, Vol. 27, nº 10.
- ANTONA, L., (1993). *Estudio sobre actuaciones preventivas en seguridad vial*. XII Congreso Mundial IRF, Tomo I. La Seguridad Vial cara al Siglo XXI, pp. 1043-1057. Madrid.
- ARNAIZ VELLANDO, G. (1986). *Introducción a la Estadística Teórica*. 4ª edición, Editorial Lex Nova.
- BARBARESSO, J. C., BAIR, B. O., MANN, C. R. y SMITH, G. (1982). *Selection Process for Local Highway Safety Projects*. Transportation Research Record, nº 847.
- BERGER, J. O. (1985). *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. 2ª edición, Springer-Verlag, New York.

- BALAGUER, C. E., KRAEMER, H. C., PUENTE, A., y SÁNCHEZ, V. B. (1989). *Elementos de Ingeniería de Tráfico*. Cátedra de Caminos y Aeropuertos, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
- BOYLE, A. J., y WRIGHT, C. C. (1984). *Accident migration after remedial treatment at accidents blackspots*. Traffic Engineering and Control, Vol. 25, nº 5.
- BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. (1993). *Orden de 18 de Febrero de 1993 por la que se modifica la estadística de accidentes de circulación*. BOE nº 47. Ministerio de Relaciones con las Cortes y de la Secretaría del Gobierno.
- BOWMAN, B. L., y BRINKMAN, P. (1988). *Effect of Low-Cost Accident Countermeasures on Vehicle Speed and Lateral Placement at Narrow Bridges*. Transportation Research Record, nº 1185.
- BRÜDE, U., y LARSSON, J. (1988). *The Use of Prediction Models for Eliminating Effects Due to Regression-to-the-Mean in Road Accident Data*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 20, nº 4.
- CHIRA-CHAVALA, T., y MAK, K. K. (1986). *Identification of Accident Factors on Highway Segments: A Method and Applications*. Transportation Research Record, nº 1068.
- COMUNIDAD DE MADRID. (1985). *Plan de Carreteras 1986-1993*. Consejería de Transportes, Dirección General de Carreteras.
- (1992) *Accidentalidad en las carreteras de la Comunidad de Madrid*. Consejería de Transportes, Dirección General de Carreteras.
- (1993a) *Accidentalidad en las carreteras de la Comunidad de Madrid*. Consejería de Transportes, Dirección General de Carreteras.
- (1993b). *Avance del Plan de Carreteras 1994-2001*. Consejería de Transportes, Dirección General de Carreteras.

-
- (1994a). *Plan de Carreteras 1994-2001*. Consejería de Transportes, Dirección General de Carreteras.
 - (1994b) *Accidentalidad en las carreteras de la Comunidad de Madrid*. Consejería de Transportes, Dirección General de Carreteras.
- COUNCIL, F. M., et al. (1980). *Accident Research Manual*. Federal Highway Administration, Report nº FHWA/RD-80/016.
- COX, D. R. (1954). *Some Simple Approximate Test for Poisson Variates*. Biometrics, Vol. 40.
- COX, D. R., y LEWIS, P. A. W. (1966). *The Statistical Analysis of Series of Events*. London: Methnen.
- DANIELSSON, S. (1986). *A Comparison of Two Methods for Estimating the Effect of a Countermeasure in the Presence of Regression Effects*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 18.
- DART, O. K., y McKENZIE, L. S. (1982). *Study of Ran-Off- Roadway Fatal Accidents in Louisiana*. Transportation Research Record, nº 847.
- DATTA, T. K., BOWMAN, B. L., y OPIELA, K. S. (1978). *Evaluation of Highway Safety Projects Using Quality-Control Technique*. Transportation Research Record, nº 672.
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS. (1994). *Nota de servicio del programa de seguridad vial 1994*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid.
- DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO. (1993). *Normas para cumplimentar el Cuestionario Estadístico de Accidentes de Circulación con Víctimas*. Madrid.

- ELVIK, R. (1988). *Ambiguities in the Definition and Identification of Accident Blackspots*. Traffic Safety Theory and Research Methods, Session 1: Context and Scope of Traffic Safety Theory, SWOV, Amsterdam.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. (1982a). *Synthesis of Safety Research Related to Traffic Control and Roadway Elements - Volume 1*. Report nº FHWA-TS-82-232.
- (1982b). *Synthesis of Safety Research Related to Traffic Control and Roadway Elements - Volume 2*. Report nº FHWA-TS-82-233.
- GAVER, D. P., y O'MUIRCHEARTAIGH, I. G. (1987). *Robust Empirical Bayes Analysis of Events Rates*. Technometrics, Vol. 29, nº 1.
- GLAUZ, W. D., BAUER, K. M., y MIGLETZ, D. J. (1985). *Expected Traffic Conflict Rates and Their Use in Predicting Accidents*. Transportation Research Record nº 1026.
- GOH, P. C. (1993). *Traffic accident analysis using geoprocessing techniques*. Road and Transport Research, Vol. 2, nº 2.
- GULLÓN, M. (1994). *Actuaciones para Mejora de la Circulación*. X Curso Internacional de Carreteras, Universidad Politécnica de Madrid. E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- HALL, J. W. (1987). *Evaluation of Wide Edgelines*. Transportation Research Record, nº 1114.
- HAKKERT, A. S. y MAHALEL, D. (1978). *Estimating the no. of accidents at intersections from a knowledge of the traffic flows on approaches*, Accident Analysis and Prevention, Vol. 10.

- HARKEY, D. L., y RUIZ, R. (1989). *HISAM: An Accident Data Base Manager*. Transportation Research Record, n° 1238.
- HAUER, E. (1980a). *Selection for Treatment as a Source of Bias in Before-and After Studies*. Traffic Engineering and Control, Vol. 21, n° 8/9.
- (1980b). *Bias-By Selection: Overestimation of the Effectiveness of Safety Countermeasures Caused By the Process of Selection for Treatment*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 12, n° 2.
- (1983a). *An Application of the Likelihood/Bayes Approach to the Estimation of Safety Countermeasure Effectiveness*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 15, n° 4.
- (1983b). *Reflections on Methods of Statistical Inference in Research on the Effect of Safety Countermeasures*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 15, n° 4.
- (1986). *On the Estimation of the Expected Number of Accidents*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 18, n° 1.
- (1992). *Empirical Bayes Approach to the Estimation of 'Unsafety': The Multivariate Regression Method*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 24, n° 5.
- HAUER, E. y HAKKERT, S. S. (1988). *Extent and Some Implications of Incomplete Accident Reporting*. Transportation Research Record, n° 1185.
- HAUER, E., y GARDER, P. (1986). *Research into the Validity of the Traffic Conflicts Technique*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 18, n° 6.
- HAUER, E., JERRY, C. N., y LOVELL, J. (1988). *Estimation of Safety at Sinalized Intersections*. Transportation Research Record, n° 1185.
- HAUER, E., y LOVELL, J. (1986). *New Directions for Learning About the Safety Effect Measures*. Transportation Research Record, n° 1068.
- HAUER, E., LOVELL, J., y PERSAUD, B. N. (1986). *New Directions for Learning About Effectiveness*. Reporte n° FHWA/RD/-86-015, Federal Highway Administration.

- HAUER, E., y PERSAUD, B. (1982). *Common Bias in Before-and-After Accident Comparisons and Its Elimination*. Transportation Research Record, nº 905.
- (1984). *Problem of Identifying Hazardous Locations Using Accident Data*. Transportation Research Record, nº 975.
- (1987). *How to Estimate the Safety of Rail-Highway Grade Crossings and the Safety Effects of Warning Devices*. Transportation Research Record, nº 1114
- HIGLE, J. L., y WITKOWSKI, J. M. (1988). *Bayesian Identification of Hazardous Locations*. Transportation Research Record, nº 1185.
- HIGLE, J. L., y HECHT, M. B. (1989). *A Comparison of Techniques for the Identification of Hazardous Locations*. Transportation Research Record, nº 1238.
- IBRAHIM, K., y SILCOCK, D. T. (1992). *The Accuracy of Accident Data*. Traffic Engineering and Control, Vol. 33, nº. 9.
- INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS. (1992). *Traffic Engineering Handbook*. 4ª Edición, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- IZQUIERDO, R. (1994). *Transportes un enfoque integral*. Servicio de Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- JAMES, H. F. (1991). *Under-Reporting of Road Traffic Accidents*. Traffic Engineering and Control, Vol. 32, nº 12.
- JARRET, D. F., ABBESS C., y WRIGHT, C. C. (1982). *Bayesian Methods Applied to Road accident Blackspot Studies: Some Recent Progress*. Seminar on Short-term and Area-wide Evaluation of Safety Measures, Institute for Road Safety Research, SWOV, Amsterdam.
- (1988). *Empirical Estimation of the Regression-to-mean Effect Associated with Road Accident Remedial Treatment*. Traffic Safety Theory & Research Methods, Session 2: Models for Evaluation, Institute for Road Safety Research, SWOV, Amsterdam.

- JORGENSEN, N. O. (1971). *The Statistical detection of accidents "Black Spots"*. XI Semana Internacional de Estudio en Ingeniería de Tráfico y Seguridad.
- KHISTIN, C. J. (1990). *Transportation Engineering: An Introduction*. Prentice Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey.
- LARSEN, G. E. (1986). *Non-Freeway Programwide 3R Accident Analysis New York*. Proceedings of the Conference Effectiveness of Highway Safety Improvements. ASCE.
- LITVIN, D. M, y DATTA, T. K. (1979). *Automated Collision Diagrams*. Transportation Research Record, nº 706.
- LYLES, R. W., LIGHTHIZER, D. R., DRAKOPOULOS, A., y WOODS, S. (1986). *Efficacy of Jurisdiction-Wide Traffic Control Device Upgradings*. Transportation Research Record, nº 1068.
- MAHER, M. J. (1987). *Accident migration-a statistical explanation?*. Traffic Engineering and Control, Vol. 28, nº 9.
- (1987). *Fitting Probability Distributions to accident Frequency Datta*. Traffic Engineering and Control, Vol. 28, nº 6.
- (1991). *A New Bivariate Negative Binomial Model for Accident Frequencies*. Traffic Engineering and Control, Vol. 32, nº 9.
- MAHER, M. J., y MOUNTAIN, L. J. (1988). *The Identification of Accident Blackspots: A Comparison of Current Methods*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 20, nº 2.
- MAK, K. K., CHIRA-CHAVALA, T., y HILGER, B. (1986). *Automated Analysis of High-Accident Locations*. Transportation Research Record, nº 1068.
- MAK, K. K., VINER, J. G., y GRIFFIN III, L. I. (1988). *Assessment of Existing General Purpose Data Bases for Highway Safety Analysis*. Transportation Research Record, nº 1172.

- MARITZ, J. S., y LWIN, T. (1989). *Empirical Bayes Methods*. Segunda Edición, Chapman y Hall.
- McGUIGAN, R. D. (1981). *The Use of Relationships Between Road accidents and Traffic Flow in Black-Spot Identification*. Traffic Engineering and Control, Agosto/Septiembre, nº 8/9.
- (1985). *Accident "migration"- or a flight of fancy?*. Traffic Engineering and Control, Vol.26, nº 4.
- McSHANE, W. R., y ROESS, R. P. (1990). *Traffic Engineering*. Prentice Hall Polytechnic Series in Transportation.
- MORRIS, C. N. (1983). *Parametric Empirical Bayes Inference: Theory and Applications*. Journal of the American Statistical Association, Vol. 78, nº 381.
- MORRIS, C. N. (1988). *Discusión del artículo "Bayesian Identification of Hazardous Locations" de Hagle y Witkoswski*. Transportation Research Record, nº 1185.
- MOUNTAIN, L., y FAWAZ, B. (1989). *The Area-Wide Effects of Engineering Measures on Road Accident Occurrence*. Traffic Engineering and Control, Vol. 30, nº 7/8.
- (1991). *The Accuracy of Estimates of Expected Accident Frequencies Obtained Using an Empirical Bayes Approach*. Traffic Engineering and Control, Vol. 32, nº 5.
- (1992). *The effects of Engineering Measures on Safety at Adjacent Sites*. Traffic Engineering and Control, Vol. 32, nº 5.
- MOUNTAIN, L., FAWAZ, B., y SINENG, L. (1991). *The Assessment of Changes in Accident Frequencies on Link Segments: A Comparison of Four Methods*. Traffic Engineering and Control, Vol. 32, nº 5.
- (1992). *The Assessment of Changes in Accident Frequencies at Treated Intersections: A Comparison of Four Methods*. Traffic Engineering and Control, Vol. 32, nº 2.

- MOUNTAIN, L., JARRETT, D. y FAWAZ, B.. (1995). *The safety effects of highway engineering schemes*. Proceedings of the Institution of the Civil Engineers, Transport, Vol. 111, Issue 4.
- NICHOLSON, A. J. (1987). *The Estimation of Accident Rates and Countermeasure Effectiveness*. Traffic Engineering and Control, Vol. 28, nº 10.
- (1988). *Accident Count Analysis: The Classical and Alternative Approaches*. Traffic Safety Theory & Research Methods, Session 2: Models for Evaluation, Institute for Road Safety Research, SWOV, Amsterdam.
- (1989). *Accident Clustering: Some Simple Measures*. Traffic Engineering and Control, Vol. 30, nº 5.
- (1990). *Measures of Accident Clustering*. Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the Eleventh International Symposium on Transportation and Traffic Theory, held July 18-20, Yokohama, Japan.
- O'FLAHERTY, C. A. (1986). *Higways*. Vol. 1, Traffic Planning and Engineering, 3ª Edición.
- PAPOULIS, A. (1991). *Probability Random Variables, and Stochastic Processes*. 3ª Edición, MacGraw-Hill, Inc.
- PARDILLO MAYORA, J. M. (1995a). *Desarrollo de una Metodología de Planificación y Evaluación de Actuaciones de Mejora de la Seguridad en la Circulación con aplicación de las Técnicas de Análisis Estadístico Bayesiano*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- (1995b). *Experiencia internacional en planificación de actuaciones de seguridad vial*. Carreteras, 4ª época, nº 80, Noviembre-Diciembre, Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera.
- PEÑA SÁNCHEZ DE RIVERA, D. (1992a). *Estadística. Modelos y métodos. 1. Fundamentos*. 5ª Edición, Alianza Editorial, S. A. Madrid.

-
- (1992b). *Estadística. Modelos y métodos. 2. Modelos lineales y series temporales*. 5ª Edición, Alianza Editorial, S. A. Madrid.
- PERSAUD, B. (1986a). *Safety Migration, the Influence of Traffic Volumes, and Other Issues in Evaluating Safety Effectiveness - Some Findings on Conversion of Intersections to Multiway Stop Control*. Transportation Research Record, nº 1068.
- (1986b). *Relating the Effect of Safety Measures to Expected Number of Accidents*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 18, nº 1.
- (1988). *Do Traffic Signals Affect Safety? Some Methodological Issues*. Transportation Research Record, nº 1185.
- PERSAUD, B. N., y HAUER, E. (1984). *Comparison of Two Methods for Debiasing Before-and-After Accident Studies*. Transportation Research Record, nº 975.
- RAIFFA, H., y SCHLAIFER, R. (1961). *Applied Statistical Decision Theory*. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University, Boston.
- RENSHA, W., y CARTER, E. C. (1980). *Identification of High-Hazard Locations in the Baltimore County Road-Rating Project*. Transportation Research Record, nº 753.
- RICKER, W. (1937). *The Concept of Confidence or Fiducial Limits Applied to the Poisson Frequency Distribution*. Journal of the American Statistical Association, Vol. 32.
- ROBBINS, H. (1956). *An Empirical Bayes Approach to Statistics*. Proceedings Third Berkley Symposium on Math, Statistics and Probability, 131, University of California Press.
- ROBBINS, H. (1980). *An Empirical estimation problem*. Proceedings of the National Academy of Science.

- ROBERTSON, H. D., y OPIELA, K. S. (1985). *Feasibility of Determining the Incremental Effectiveness of Accident Countermeasures*. Reporte nº FHWA-RD-85/043. Federal Highway Administration.
- ROSS, A., et al. (1991). *Towards Safer Roads in Developing Countries: A Guide for Planners and Engineers*. Transportation and Road Research Laboratory, Overseas Development Administration.
- SABEY, B. E. (1980). *The Know Risks We Run: The Highway*. TRRL Report SR 567, Crowthorne, Berks., The Transport and Road Research Laboratory.
- SAYED, T., ABDELWAHAB, W., y NAVIN, F. (1995). *Identifying Accident-Prone Locations Using Fuzzy Pattern Recognition*. Journal of Transportation Engineering, Julio/Agosto.
- SCHMITTEIN, D., y MORRISON, D. G. (1983). *Prediction of Future Random Events With the Condensed Negative Binomial Distribution*. Journal of American Statistical Association, Vol nº 78, nº 382.
- SERRANO RODRIGUEZ, A. (1978). *Análisis y Evaluación de las Desventajas Sociales de los Accidentes en Carretera*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- SERRET IZQUIERDO, L., y MOSQUERA JIMENA, R. (1995). *Eficacia de las Medidas de Seguridad Vial en Infraestructura de Carreteras*. Carreteras, nº 76, Marzo/Abril.
- SILCOCK, D. y SMYTH, A.W. (1984). *The Methods used by British Highway Authorities to Identify Accident Blackspots*. Traffic Engineering and Control, Vol. 25, nº 11.
- SNEDECOR, G. W., y COCHRAN, W. G. (1989). *Statistical Methods*. 8ª Edición, Iowa State University Press/Ames.

- SPRING, G. S., COLLURA, J., y SHULDINER, P. W. (1987). *Analysis of High-Hazard Locations: Is an Expert Systems Approach Feasible?*. Transportation Research Record, nº 1111.
- TANNER, J. C. (1958). *A Problem in the Combination of Accident Frequencies*. Biometrika, Vol. 45.
- THEOBALD, M. y HEYDECKER, B. (1988). *Analysis of accident data: two expert system approaches*. Seminar on traffic safety theory & research methods, Institute for Road Safety Research, SWOV, Amsterdam.
- THAKKAR, J. A. (1986). *Enhancing Highway Safety Through 3R Construction*. Proceedings of the Conference Effectiveness of Highway Safety Improvements. ASCE.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. (1987). *STATE OF THE ART REPORT 6. Relationship Between Safety and Key Highway Features. A Synthesis of Prior Research*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.
- TSOHOS, G., y KOKKALIS, A. (1988). *Determination of Black Spots. A Comparative and Correlation Study of Existing Methods*. Traffic Safety Theory & Research Methods, Session 4: Statistical Analysis and Models, Institute for Road Safety Research, SWOV, Amsterdam.
- TURNER, D. S. y COLSON, C. W. (1988). *Accident Data as a Tool for Highway Risk Management*. Transportation Research Record, nº 1172
- VALDES GONZÁLEZ-ROLDÁN, A. (1988). *Ingeniería de Tráfico*. Librería Editorial Bellisco, 3ª edición, Madrid.
- WATTLEWORTH, J. A. et al. (1988). *Accident Reduction Factors for Use in Calculating Benefit/Cost - Volume 2. Florida Manual of Identification, Analysis and Correction*

-
- of High Accident Locations*. Reporte n° FL/DOT/MO/335/88, Department of Civil Engineering, College of Engineering, University of Florida.
- WEED, R. M. (1986). *Revised Decision Criteria For Before-and After Analyses*. Transportation Research Record, n° 1068.
- WRIGHT, C. C. y BOYLE, A. J. (1987). *Road accident causation and engineering treatment: a review of some current issues*. Traffic Engineering and Control, Vol. 28, n° 9.
- WRIGHT, C. C., ABBESS, C. R., y JARRET, D. T. (1987). *Estimating the Regression-to-Mean Effect Associated With Road Accident Black Spot Treatment: Towards a More Realistic Approach*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 20, n° 3.
- ZEGEER, C. V., HUMMER, J., REINFURT, D., HERF, L., y HUNTER, W. (1987). *Safety Effects of Cross-section Design for Two-Lane Roads. Volume I. Final Report*. Federal Highway Administration, Report n° FHWA-RD-87/008.