

Máster Universitario Ciencias Actuariales y Financieras  
2017-2018

*Trabajo Fin de Máster*

“La proyección causal de la  
longevidad por Lee Carter.  
Escenarios *What if* por *juicio  
experto*”

---

Inés de Castro Pérez

Tutor/es

José Miguel Rodríguez-Pardo del Castillo

Jesús R.S. del Potro

Madrid, 13 de junio de 2018



*[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]*

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons  
**Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

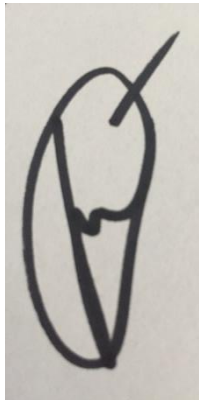


Esta tesis es propiedad del autor. No está permitida la reproducción total o parcial de este documento sin mencionar su fuente. El contenido de este documento es de exclusiva responsabilidad del autor, quien declara que no se ha incurrido en plagio y que la totalidad de referencias a otros autores han sido expresadas en el texto.

En caso de obtener una calificación igual o superior a 8.0 Notable, autorizo la publicación de este trabajo en el centro de Documentación de la Fundación Mapfre.

- Sí, autorizo a su publicación.
- No, desestimo su publicación.

Firmado:

A handwritten signature in black ink on a light-colored background. The signature is stylized, starting with a large, looped letter that resembles a 'V' or 'W', followed by several smaller, connected strokes.



## Contenido

1.	Introducción y objetivos. Planteamiento del problema .....	1
2.	Metodología.....	3
2.1.	Los datos .....	3
2.2.	El modelo.....	6
2.2.1	Tasa específica de mortalidad: $m_{x,t}$ .....	7
2.2.2	Probabilidad de fallecimiento: $q_x$ .....	9
2.3.	El software .....	10
3.	Análisis empírico y cualitativo de los datos .....	11
3.1.	Enfermedades del sistema circulatorio .....	13
3.2.	Tumores .....	15
3.3.	Enfermedades del sistema respiratorio .....	18
3.4.	Enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos .....	19
3.5.	Otras causas de mortalidad .....	21
4.	Modelización Lee-Carter y sus proyecciones.....	23
4.1.	Enfermedades del sistema circulatorio .....	23
4.2.	Tumores .....	26
4.3.	Enfermedades del sistema respiratorio .....	29
4.4.	Enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos .....	32
5.	Comprobación de la desaparición de las enfermedades del sistema circulatorio y tumores .....	35
5.1.	Enfermedades del sistema circulatorio .....	40
5.2.	Tumores .....	42
6.	Análisis juicio experto .....	45
6.1.	Escenario 1 .....	47
6.2.	Escenario 2. <i>Worst Case</i> .....	48

7.	Proyección causal vs proyección total.....	50
8.	Conclusiones.....	52
9.	Anexo: resultados encuesta juicio experto .....	54
10.	Bibliografía.....	60

Gráfico 3.1 Distribución de la mortalidad en España. Periodo 1998-2016. (Elaboración propia a partir de datos del INE) .....	11
Gráfico 3.2 Tasa de mortalidad por años para enfermedades del sistema circulatorio. (Elaboración propia a partir de datos del INE).....	14
Gráfico 3.3 Tasa de mortalidad por edades para enfermedades del sistema circulatorio. (Elaboración propia a partir de datos del INE).....	15
Gráfico 3.4 Tasa de mortalidad por años para tumores. (Elaboración propia a partir de datos del INE).....	17
Gráfico 3.5 Tasa de mortalidad por edades para tumores. (Elaboración propia a partir de datos del INE).....	17
Gráfico 3.6 Tasa de mortalidad por años para enfermedades del sistema respiratorio. (Elaboración propia a partir de datos del INE).....	18
Gráfico 3.7 Tasa de mortalidad por edades para enfermedades del sistema respiratorio. (Elaboración propia a partir de datos del INE).....	19
Gráfico 3.8 Tasa de mortalidad por años para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos. (Elaboración propia a partir de datos del INE).....	20
Gráfico 3.9 Tasa de mortalidad por edades para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos (Elaboración propia a partir de datos del INE).....	21
Gráfico 4.1 Parámetros del Modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema circulatorio.....	23
Gráfico 4.2 Correlación de los residuos para enfermedades del sistema circulatorio....	24
Gráfico 4.3 Estimación de la tasa de mortalidad para enfermedades del sistema circulatorio.....	25
Gráfico 4.4 Histórico y proyección del parámetro $k_t$ para enfermedades del sistema circulatorio.....	25
Gráfico 4.5 Parámetros del Modelo Lee-Carter para tumores.....	26
Gráfico 4.6 Correlación de los residuos para tumores.....	27
Gráfico 4.7 Estimación de la tasa de mortalidad para tumores .....	28
Gráfico 4.8 Histórico y proyección del parámetro $k_t$ para tumores.....	28

Gráfico 4.9 Parámetros del modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema respiratorio.....	29
Gráfico 4.10 Correlación de los residuos para enfermedades del sistema respiratorio..	30
Gráfico 4.11 Estimación de la tasa de mortalidad para enfermedades del sistema respiratorio.....	30
Gráfico 4.12 Histórico y proyección del parámetro $k_t$ para enfermedades del sistema respiratorio.....	31
Gráfico 4.13 Parámetros del modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos .....	32
Gráfico 4.14 Correlación de los residuos para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos .....	33
Gráfico 4.15 Estimación de la tasa de mortalidad para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos.....	33
Gráfico 4.16 Histórico y proyección del parámetro $k_t$ para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos.....	34
Gráfico 5.1 Intervalo de confianza al 99,5% para el Log ( $m_{x,t}$ ) para el año 2026.....	38
Gráfico 5.2 Desaparición de tumores .....	44
Gráfico 6.1 Posibilidad de la desaparición de enfermedades del sistema circulatorio...	45
Gráfico 6.2 Posibilidad de la desaparición de tumores .....	46
Gráfico 6.3 Edades a las que se espera la disminución en enfermedades del sistema circulatorio.....	46
Gráfico 6.4 Edades a las que se espera la disminución en tumores.....	46
Gráfico 6.5 Horizonte temporal de la reducción de la mortalidad para enfermedades del sistema circulatorio.....	47
Gráfico 6.6 Horizonte temporal de la reducción de la mortalidad para tumores.....	47
Gráfico 6.7 Escenario 1. Desaparición del 70% de tumores a la edad 40-49 y de enfermedades del sistema circulatorio a la edad 50-59 .....	48



Gráfico 6.8 WORST CASE. Desaparición del 95% de enfermedades del sistema circulatorio a la edad 50-59 y del 85% de tumores a la edad 50-59..... 49

Tabla 2.1 Principales causas de fallecimiento en España en 2016.....	5
Tabla 2.2 Principales causas de fallecimiento en España en 1998.....	6
Tabla 3.1 Número de defunciones según la causa de muerte más frecuente. Año 2016	12
Tabla 5.1 Parámetros para cada edad del modelo Lee-Carter para la población total ...	37
Tabla 5.2 Parámetros para cada año del modelo Lee-Carter para la población total. Estimación ARIMA (0, 1, 0) .....	37
Tabla 5.3 Intervalo de confianza al 99,5% para el Log ( $m_{x,t}$ ) para el año 2026.....	38
Tabla 5.4 Fallecimientos totales estimados en el año 2026.....	39
Tabla 5.5 Parámetros del modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema circulatorio .....	40
Tabla 5.6 Resultados para enfermedades del sistema circulatorio .....	41
Tabla 5.7 Desaparición de enfermedades del sistema circulatorio.....	42
Tabla 5.8 Parámetros del modelo Lee-Carter para tumores .....	43
Tabla 5.9 Resultados para tumores.....	43
Tabla 7.1 Proyección causal VS Proyección total.....	50

## **1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Al ser humano siempre le ha preocupado la posibilidad de conocer su esperanza de vida, al igual que la calidad de la misma. Por ello, cada vez más, se investigan todas las posibles causas de fallecimiento y se invierte para poder erradicar enfermedades.

La medicina está realizando grandes avances y gracias al descubrimiento de nuevos fármacos se ha podido acabar con enfermedades como el SIDA/VIH o la Hepatitis C, y reducir de forma notoria la mortalidad en las dos principales causas de muerte en España (FarmaIndustria, 2018).

Esta incertidumbre, debida al desconocimiento del momento del fallecimiento, también se ha trasladado a las ciencias actuariales, ya que es de suma importancia para el cálculo del riesgo de longevidad en los seguros de vida. Además, la posibilidad de que la esperanza de vida aumente, adquiere una gran implicación en el sector público, dado que las estimaciones realizadas para el pago de las pensiones pueden resultar insuficientes. Si la tendencia actual prosiguiera indefinidamente llegará un punto en el que las proyecciones realizadas de la esperanza de vida sean menores a las reales y por ello, todos aquellos agentes que deban realizar pagos de forma vitalicia, se encuentren en una situación en la que tienen que realizar pagos durante un periodo notoriamente superior al esperado. Debido a estas implicaciones, es importante conocer y estudiar la tendencia de la mortalidad, no sólo de forma global, sino también de manera desagregada por las causas de la misma.

Zalbidegoitia (2010), nos recuerda que, el hecho de estudiar la mortalidad de la población, no sólo vinculada a la edad y el sexo, sino también a los años del calendario nos permite conseguir unas proyecciones de la mortalidad más reales y exactas. Para este fin se utilizarán tanto modelos demográficos como estocásticos. Si a esto le unimos el estudio de la desagregación de la mortalidad por sus causas, conseguimos entender este fenómeno de forma más precisa.

Sin embargo, tal y como apuntan Lee & Carter (1992) en el artículo en el cual dan a conocer el método de modelización y predicción que lleva su nombre (utilizado en este estudio),

*“no podemos olvidar, que por mucho que analicemos el pasado, nada nos asegura que pueda ocurrir en el futuro un cambio dramático”.*

Los objetivos del presente trabajo son el análisis y estudio de las principales causas de fallecimiento en España, realizando posteriormente una proyección de la mortalidad en un horizonte temporal de 10 años vista, tratando de identificar si existe la posibilidad de que alguna de las actuales causas desaparezca o modifique significativamente la tendencia de la mortalidad total española.

El siguiente trabajo se estructura de la siguiente forma. En el capítulo 2 del trabajo hablaremos de la metodología empleada. En el capítulo 3 analizaremos los datos de forma empírica y cualitativa. Proseguiremos con una estimación del modelo y la realización de las predicciones en el capítulo 4. El capítulo 5 lo dedicaremos a la comprobación de cuál sería el efecto de una desaparición total del fallecimiento por dos de las principales causas de fallecimiento en España. En línea con el apartado anterior, el capítulo 6 está destinado a la realización de un análisis por juicio experto. Finalmente, en el capítulo 7, elaboraremos una comparativa entre los resultados obtenido mediante proyecciones de forma total o por causas de fallecimiento.

## 2. METODOLOGÍA

Dentro de este apartado vamos a explicar tres aspectos relacionados con la metodología empleada en este Trabajo de Fin de Máster:

- Los datos manejados, obtenidos del Instituto Nacional de Estadística.
- El modelo utilizado, siendo el presentado por Lee-Carter en 1992
- El software empleado, RStudio, junto con los paquetes estadísticos “demografy” y “forecast”.

### 2.1. Los datos

Los datos utilizados para la realización del presente estudio, han sido obtenidos a partir de los proporcionados periódicamente por el Instituto Nacional de Estadística Español (INE). La base de datos se compone, principalmente, de dos grupos de datos. En el primero hemos obtenido las defunciones que se produjeron en España, dentro del periodo de estudio, de acuerdo a cada una de las causas de muerte estudiadas, al igual que para el total de defunciones y agrupados según el sexo, ya fueran defunciones de hombre, mujeres y el total de ambas, y en función a la edad, agrupada esta en veintiuna cohortes.

Bajo los mismos criterios hemos obtenido los datos de la población española en el periodo de estudio. Esta base de datos incluye el total de las personas empadronadas en territorio español, tanto aquellos con nacionalidad española como extranjera. Esta información es facilitada al INE por cada uno de los Ayuntamientos del territorio español.

El periodo de análisis comprende desde 1998 hasta 2016, ya que este es el histórico máximo facilitado por el INE para la población. Como ya hemos comentado, los datos están agrupados en veintiuna cohortes de edad, empezando en personas menores a 1 año, de 1 a 4 y, posteriormente, grupos de 5 años (5-9, 10-14...) hasta el grupo máximo, que recoge a todos aquellos individuos con 95 años y en adelante. Una vez analizados los datos tanto para hombre como para mujeres, hemos tomado la decisión de utilizar la base de datos para el total de la población, sin diferenciar por sexo, ya que no hemos encontrado ninguna evidencia que refleje una diferencia significativa entre los ambos.

Las posibles causas de fallecimiento en las que se agrupan las defunciones estudiadas en este trabajo siguen la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-10), propuesta por la Organización Mundial de la Salud (OMS). La versión utilizada es la décima, del año 1990, que se empezó a utilizar en 1994, siendo ésta la última revisión existente desde que se empezó a utilizar esta clasificación en 1850. En la nota de prensa del INE “Defunciones según la Causa de Muerte” para el año 2016, encontramos la siguiente definición de causa básica de la defunción, de acuerdo a la OMS,

*“es la enfermedad o lesión que inició la cadena de acontecimientos patológicos (causas múltiples) que condujeron directamente a la muerte, siendo esta la causa que aparecerá en el Certificado Médico de Defunción”.*

El CIE-10 se utiliza para la elaboración de estadísticos de mortalidad y morbilidad en todo el mundo, posibilitando una homogeneización de los mismos, lo que permite la comparación por países y en distintos años. Esta clasificación se divide en los siguientes capítulos:

- I. Enfermedades infecciosas y parasitarias
- II. Tumores
- III. Enfermedades de la sangre y de los órganos hemotopoyéticos, y ciertos trastornos que afectan al mecanismo de la inmunidad
- IV. Enfermedades endocrinas, nutricionales y metabólicas
- V. Trastornos mentales y del comportamiento
- VI. Enfermedades del sistema nervioso
- VII. Enfermedades del ojo y sus anexos
- VIII. Enfermedades del oído y de la apófisis mastoides
- IX. Enfermedades del sistema circulatorio
- X. Enfermedades del sistema respiratorio
- XI. Enfermedades del sistema digestivo
- XII. Enfermedades de la piel y del tejido subcutáneo
- XIII. Enfermedades del sistema osteomuscular y del tejido conjuntivo
- XIV. Enfermedades del sistema genitourinario
- XV. Embarazo, parto y puerperio
- XVI. Ciertas afecciones originadas en el periodo perinatal
- XVII. Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas

XVIII. Síntomas, signos y hallazgos anormales clínicos y de laboratorio, no clasificados en otra parte

XX. Causas externas de mortalidad

El INE agrupa dentro de su base de datos, las defunciones por las causas de fallecimiento recogidas en los capítulos VI a VII como un único capítulo, denominado “Enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos”.

En el presente Trabajo de Fin de Máster estudiaremos las cuatro principales causas de fallecimiento para España en el año 2016, recogidas en la Tabla 2.1, junto con la proporción que suponen sobre el total de causas de fallecimiento. Llama la atención la elevada proporción de las dos primeras causas, siendo, para enfermedades del sistema circulatorio un 29,17% y para tumores un 27,51%. Cabe señalar que, la suma de estas cuatro causas supone un 74,22% de la mortalidad total en España en el 2016.

**Tabla 2.1 Principales causas de fallecimiento en España en 2016**

<b>Principales Causas de Fallecimiento 2016</b>	
IX. Enfermedades del sistema circulatorio	29,17%
II. Tumores	27,51%
X. Enfermedades del sistema respiratorio	11,40%
VI - VIII. Enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos	6,15%
<b>Total</b>	<b>74,22%</b>

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE*

Por otro lado, en la Tabla 2.2 mostramos las principales causas de fallecimiento para España, esta vez en el año 1998, siendo este nuestro primer año de estudio. Al comparar estos datos con los de 2016 encontramos dos diferencias llamativas. La primera de ellas es, para el caso de enfermedades del sistema circulatorio, la reducción de más de 7 puntos porcentuales que, aunque se ha mantenido como la principal causa de fallecimiento durante todo el periodo de estudio, representa un porcentaje menor del total de defunciones, que en el año 1998 se encontraba en el 36, 51%. Esta reducción se debe, en gran medida, a la mejora en el estilo de vida de la población y al uso de nuevos fármacos que ayudan a prevenir la hipertensión arterial y la hipercolesterolemia, entre otros (FarmaIndustria, 2018).

**Tabla 2.2 Principales causas de fallecimiento en España en 1998**

<b>Principales Causas de Fallecimiento 1998</b>	
IX. Enfermedades del sistema circulatorio	36,51%
II. Tumores	25,78%
X. Enfermedades del sistema respiratorio	11,03%
XI. Enfermedades del sistema digestivo	5,25%
<b>Total</b>	<b>78,57%</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE

El segundo aspecto a destacar en esta comparativa, es el cuarto puesto del ranking, ya que en 1998, lo ocupaban las enfermedades del sistema digestivo. Sin embargo, en 2016, este puesto se encuentra ocupado por las enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos. Esta alteración está ligada con el incremento de las enfermedades neurodegenerativas, como son el Parkinson o el Alzheimer. Considerando que se está produciendo un paulatino envejecimiento de la población, este fenómeno no es de extrañar, puesto que éstas son enfermedades propias del aumento de la edad (Rodríguez-Pardo del Castillo & López Farré, 2017). Tal y como mencionan Rodríguez-Pardo y López (2017)

*“el Alzheimer, la hipertensión o las cardiopatías son las tres patologías propias de la vejez”.*

## **2.2. El modelo**

El objetivo planteado en este trabajo, es el de aproximar, mediante una función, las tasas de mortalidad a futuro, concretamente a un horizonte temporal de diez años, comprendido desde el año 2017 hasta el 2026. El modelo que utilizaremos es el modelo Lee-Carter, publicado por Rodald D. Lee y Lawrence R. Carter en 1992 en el artículo “Modelling and Forecasting U.S. Mortality”, fundamentado en la idea de un modelo sencillo que permite, mediante la búsqueda de patrones y tendencias existentes en los datos históricos, capturar la mejora existente por el paso del tiempo (año de calendario) y la edad de los individuos, incluyendo de esta forma los cambios debido a avances técnicos y del comportamiento (Lee & Carter, 1992). Con este modelo obtenemos unos



parámetros que ajustan la mortalidad histórica y, a partir de ahí, se realiza una proyección de uno de ellos para, de este modo obtener la proyección de la mortalidad futura.

Todo esto se realiza mediante la combinación de un modelo demográfico junto con métodos estadísticos de análisis de series temporales.

- La primera parte del modelo está basado en proyecciones demográficas, cuyo fin es el de aproximar las tasas de mortalidad en relación a los datos históricos. De ello se puede obtener tanto las dos variables específicas para cada edad del modelo ( $a_x$  y  $b_x$ ) como la variable dependiente del tiempo ( $k_t$ ).
- El segundo, la aplicación de técnicas de análisis de series temporales, específicamente sobre el estudio de la tendencia para mortalidad futura de cada una de las causas y, de este modo, poder extraer la información dependiente del tiempo debido a la naturaleza estocástica de la mortalidad.

La forma en la que está construido el modelo lo convierte en un modelo bilineal, ya que obtendremos diferentes datos dependiendo de las dos variables principales que son la edad de los individuos (x) y el tiempo (t).

### **2.2.1 Tasa específica de mortalidad: $m_{x,t}$**

A partir de los datos obtenidos del INE obtenemos las tasas específicas de mortalidad  $m_{x,t}$  para cada una de las causas de mortalidad que estudiamos. El INE define la tasa específica de mortalidad como

*“La tasa que mide el acaecimiento relativo de defunción, para una edad x”.*

En otras palabras, se trata del riesgo medio que existe de pasar de la edad x a la edad x+1. Para su obtención realizamos el cociente del número de defunciones de personas con x años ( $d_x$ ) entre la población media de edad x. Este cálculo lo realizamos para cada año de calendario t (Lee & Carter, 1992).

La fórmula utilizada por Lee-Carter para la estimación de la tasa de mortalidad es

$$m_{x,t} = e^{a_x + b_x k_t + e_{x,t}}$$

donde:

- $a_x$ : es una constante única para cada edad, que muestra la conducta de la mortalidad de forma invariante respecto al tiempo.
- $b_x$ : este parámetro, constante para cada edad e invariante respecto al tiempo, nos indica en qué forma se ve impactada la tasa específica de mortalidad ante cambios en el parámetro  $k_t$ . Si toma un valor negativo indicará que, para dicha edad,  $m_{x,t}$  incrementará de forma significativamente mayor que en el resto de los casos.
- $k_t$ : es el parámetro que depende del tiempo, por tanto tendremos un valor de  $k_t$  para cada año del calendario. Se interpreta como el índice del nivel de mortalidad para cada año  $t$ . Dado que este es el único parámetro del modelo dependiente del tiempo, será el que tendremos proyectar para el cálculo de las proyecciones futuras de la mortalidad.
- $e_{x,t}$ : es el término del error y recoge todo aquello que el modelo no puede capturar. Tiene media cero y varianza constante.

Para la estimación del modelo se necesita realizar la siguiente transformación logarítmica y trabajaremos sobre los datos transformados:

$$\ln(m_{x,t}) = a_x + b_x k_t + e_{x,t}$$

La solución de esta ecuación es indeterminada, como mostramos a continuación. Si tenemos como solución los vectores  $a$ ,  $b$  y  $k$ , para cualquier escalar  $c$ , podemos obtener la solución  $a - bc$ ,  $b$ ,  $k + c$ , al igual que  $a$ ,  $bc$ ,  $k/c$  también sería una solución válida. Por tanto, Lee & Carter (1992) proponen dos condiciones para conseguir una solución única:

- ✓  $\sum b_x = 1$
- ✓  $\sum k_t = 0$

Estas dos condiciones implican que, el parámetro  $a_x$  se deba calcular como una media simple del histórico de  $\ln(m_{x,t})$ .

Posteriormente realizamos una estimación en dos etapas para encontrar los valores de  $b_x$  y  $k_t$ .

- En la primera etapa, aplicamos a la matriz  $\ln(m_{x,t}) - \hat{a}_x$ , la Descomposición de Valores Singulares (SVD) de la matriz

$$Z_{x,t} = \ln(m_{x,t}) - \hat{a}_x$$

donde  $Z_{x,t} = b_x k_t$ , con lo que obtenemos una primera estimación de los parámetros  $b_x$  y  $k_t$ .

- Cuando estimamos los valores de  $m_{x,t}$  con los valores obtenidos con esta primera estimación de los parámetros, el número de muertes proyectadas no coincide con el valor real de las defunciones. Debido a esto se procede a la realización de la segunda etapa de la estimación de  $k_t$ , en la que se busca un valor que minimice el error existente entre el número de fallecimientos reales y el ajustado por el modelo, manteniendo los valores obtenidos para  $a_x$  y  $b_x$  en la primera etapa. De este modo

$$D_t = \sum e^{\hat{a}_x + \hat{b}_x k_t} * N_{x,t}$$

donde  $D_t$  representa el número total de defunciones y  $N_{x,t}$  la población total con edad x en el año t.

Una vez estimados los parámetros del modelo, continuamos con la realización de las proyecciones del mismo. Para ello, tal y como hemos mencionado previamente, aplicamos el estudio de análisis de series temporales al parámetro dependiente del tiempo  $k_t$ , buscando el modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) apropiado. El modelo original, y el que usaremos para nuestra proyección, es un modelo ARIMA (0, 1, 0), es decir, un paseo aleatorio con constante (random walk with drift)

$$k_t = k_{t-1} + a + e$$

### 2.2.2 Probabilidad de fallecimiento: $q_x$

Tras la realización de todos estos cálculos, obtenemos las probabilidades de fallecimiento  $q_x$ . De esta forma podemos estudiar si existe algún escenario en el que el descenso de una de las causas de mortalidad, produzca una disminución en la mortalidad total que haga que las predicciones de la misma al 99,5% no sean suficiente, haciendo que las compañías con productos de vida ahorro incurran en pérdidas no esperadas.

La aproximación para obtener la probabilidad de fallecimiento ( $q_x$ ) a partir de  $m_{x,t}$  es la siguiente

$$q_{t,x} = 1 - e^{-m_{x,t}}$$

### 2.3. El software

Para la aplicación de la metodología que hemos expuesto, vamos a utilizar el software estadístico RStudio. Los paquetes del mismo utilizados son “demography Package” y “forecast Package”.

Las funciones utilizadas son:

- Estimación de los parámetro:

```
ModeloLC <- lca(ENFERMEDAD$datos, series="total")
```

- Proyección:

```
proyec_enfermedad <- forecast(ModeloLC, h = 10, level = 99.5)
```

### 3. ANÁLISIS EMPÍRICO Y CUALITATIVO DE LOS DATOS

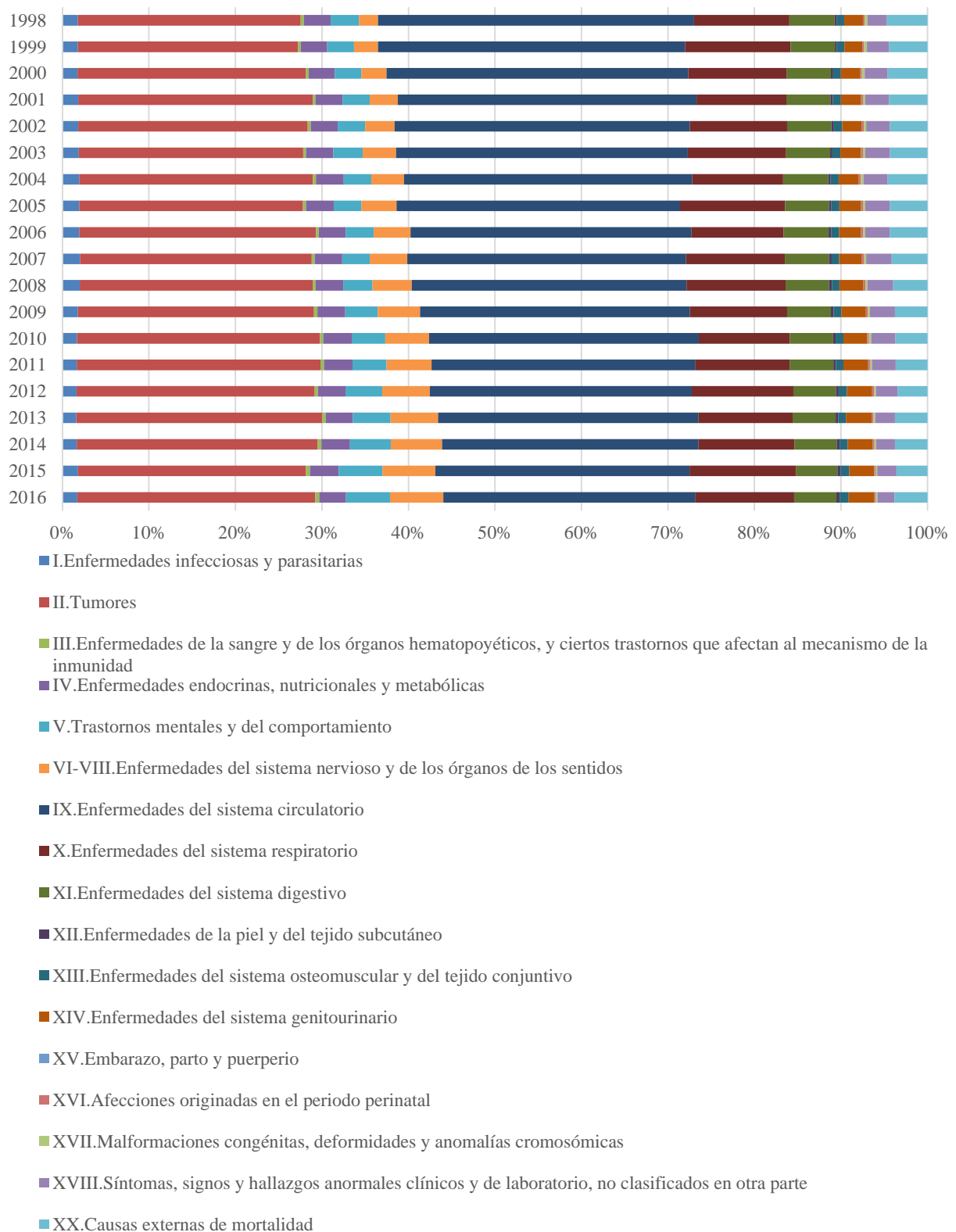


Gráfico 3.1 Distribución de la mortalidad en España. Periodo 1998-2016. (Elaboración propia a partir de datos del INE)

En los últimos años, la distribución de las causas de fallecimiento ha sufrido diversos cambios. Este hecho lo podemos apreciar en el Gráfico 3.1, donde se presentan el total de las causas para España en el horizonte temporal estudiado. Las dos principales causas durante todo el periodo de estudio han sido enfermedades del sistema circulatorio, seguidas de enfermedades del sistema respiratorio.

En el caso de enfermedades del sistema circulatorio se puede comprobar como esta causa de fallecimiento ha ido perdiendo peso de forma gradual. Sin embargo, el caso contrario se aprecia para las enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos. Estas deducciones están acorde con la bibliografía estudiada, que explicaremos más adelante.

A continuación, estudiaremos más en profundidad las cuatro principales causas de fallecimiento en España en el año 2016: enfermedades del sistema circulatorio, tumores, enfermedades del sistema respiratorio y enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos. En cada una de estas secciones comentaremos los datos presentados en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Número de defunciones según la causa de muerte más frecuente. Año 2016**

	<b>Total</b>	<b>Hombres</b>	<b>Mujeres</b>	<b>Total</b>	<b>Hombres</b>	<b>Mujeres</b>
<b>Total</b>	410.611	208.993	201.618			
Enfermedades isquémicas del corazón	32.056	19.071	12.985	7,81%	9,13%	6,44%
Enfermedades cerebrovasculares	27.122	11.556	15.566	6,61%	5,53%	7,72%
Cáncer de bronquios y pulmón	22.155	17.598	4.557	5,40%	8,42%	2,26%
Demencia	20.150	6.668	13.482	4,91%	3,19%	6,69%
Insuficiencia Cardíaca	17.931	6.652	11.279	4,37%	3,18%	5,59%
Enf. Crónica de las vías respiratorias inferiores (ECVRI)	15.071	11.011	4.060	3,67%	5,27%	2,01%
Enfermedad de Alzheimer	14.793	4.370	10.423	3,60%	2,09%	5,17%
Enfermedad hipertensiva	12.153	3.908	8.245	2,96%	1,87%	4,09%
Cáncer de colon	11.781	6.892	4.889	2,87%	3,30%	2,42%
Neumonía	9.310	4.090	5.220	2,27%	1,96%	2,59%
Diabetes mellitus	9.160	4.767	4.393	2,23%	2,28%	2,18%
Cáncer de páncreas	6.789	3.434	3.355	1,65%	1,64%	1,66%
Cáncer de mama	6.477	92	6.385	1,58%	0,04%	3,17%
Insuficiencia renal	6.273	2.903	3.370	1,53%	1,39%	1,67%
Cáncer de próstata	5.752	5.752	0	1,40%	2,75%	0,00%

Fuente: Instituto Nacional de Estadística

### 3.1. Enfermedades del sistema circulatorio

Las enfermedades del sistema circulatorio forman parte del capítulo IX de la clasificación CIE-10 de la OMS. Dentro de este capítulo se encuentran: enfermedades hipertensivas, infarto subsecuente del miocardio, aneurismas, hemorroides, síndrome postflebítico, etc. Las enfermedades del sistema circulatorio son la causa principal de defunciones en España, suponiendo, en el año 2016, el 26,46% de los fallecimientos en los hombres, y en las mujeres el 31,98%.

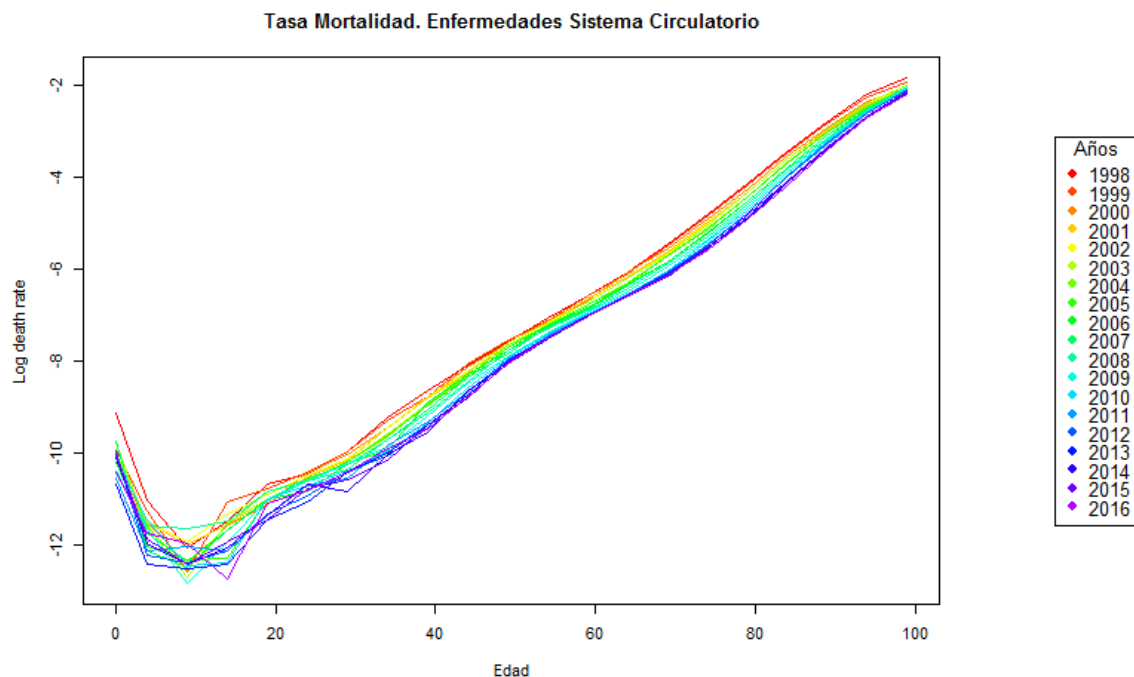
En este mismo año, dentro de las 15 enfermedades que causaron una mayor mortalidad en España, cuatro están clasificadas como enfermedades del sistema circulatorio. Se trata de enfermedades isquémicas del corazón, enfermedades cerebrovasculares, insuficiencia cardíaca y enfermedades hipertensivas, sumando el 21,74% de la mortalidad total española.

En nuestro país, las enfermedades cerebrovasculares afectan más a mujeres que a hombres, siendo la primera causa para ellas (7,72%) y la segunda para ellos (5,53%). Entre las enfermedades cerebrovasculares se encuentra el accidente cerebrovascular (ACV), también conocido como ictus. No solo se trata de una enfermedad con una altísima mortalidad, sino que también se derivan de ella numerosos casos de discapacidad en pacientes que la han padecido y han sobrevivido a ella. Esta enfermedad afecta en su mayoría a personas mayores de 65 años, algo a tener en cuenta en el caso de España, ya que cuenta con una población envejecida y unas previsiones de longevidad de las más altas del mundo.

En contraste con lo anterior encontramos el caso de enfermedades isquémicas de corazón, que supone la primera causa de fallecimiento entre los hombres (9,13%) y la segunda para las mujeres (6,44%). Dentro de este grupo de enfermedades se encuentra el infarto agudo de miocardio. Múltiples estudios han demostrado que un tratamiento precoz y conveniente es de vital importancia para prevenir una mortalidad precoz y para evitar una recaída en los pacientes que han sobrevivido (Grupo Bioactuarial de Investigación, 2016).

A pesar de que las enfermedades del sistema circulatorio son la principal causa de fallecimiento en España, se ha observado una clara disminución de la mortalidad en los últimos años. En el Gráfico 3.2 se muestra la tasa de mortalidad en logaritmos para esta

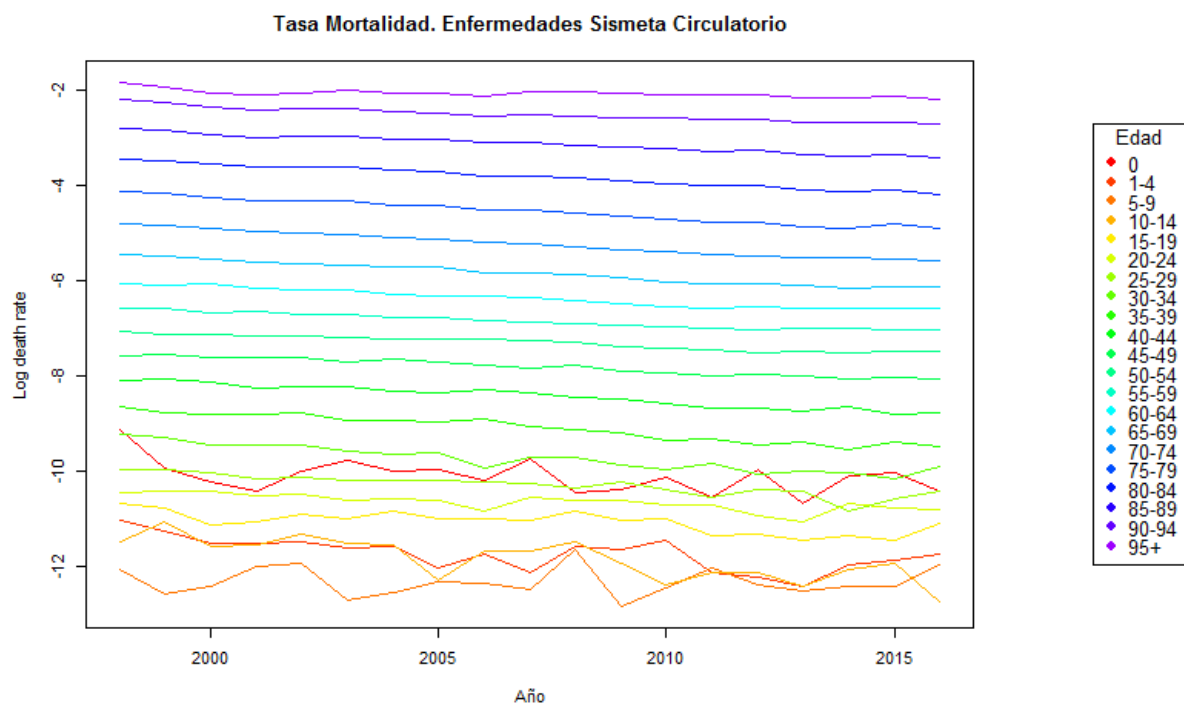
causa, donde podemos comprobar la disminución que se ha producido en los 19 años de estudio, manteniendo el patrón de comportamiento.



**Gráfico 3.2 Tasa de mortalidad por años para enfermedades del sistema circulatorio. (Elaboración propia a partir de datos del INE)**

Cuando representamos dichas tasas en función a todas las edades en el Gráfico 3.3 observamos el mismo decrecimiento en las tasas para los años del calendario.





**Gráfico 3.3 Tasa de mortalidad por edades para enfermedades del sistema circulatorio. (Elaboración propia a partir de datos del INE)**

Los motivos de esta disminución son los ya comentados, entre ellos una mejora en el estilo de vida de la población y el avance en la investigación y el uso de fármacos que previenen estas patologías.

### 3.2. Tumores

Los tumores forman parte del capítulo II de la clasificación CIE-10 de la OMS. Dentro de este capítulo se encuentran: tumores malignos, melanomas, mesotelioma, Sarcoma de Kaposi, enfermedad de Hodgkin o linfoma, entre otros. Los tumores son la segunda causa por la que fallece la población española, representando un 32,83% para los hombres y un 21,98% para las mujeres en el año 2016.

Entre las 15 enfermedades que más defunciones causaron en el año 2016, encontramos cinco enfermedades debidas a tumores, que suman un 12,9% de la mortalidad. Se trata de:

- cáncer de bronquios y pulmón (5,40%),
- cáncer de colon (2,87%),
- cáncer de páncreas (1,65%),

- cáncer de mama (1,58%) y
- cáncer de próstata (1,40%).

Las enfermedades englobadas como tumores han presentado una incidencia mayor en los países desarrollados, en gran parte producida por el diagnóstico precoz y el aumento de factores de riesgo como son el envejecimiento de la población. Sin embargo, no se ha producido un aumento en las tasas de fallecimiento, sino una disminución (Weber, 2018). Esto se ha conseguido gracias a la detección precoz, ligada con los avances en la eficacia de los tratamientos (Grupo Bioactuarial de Investigación, 2016). Dichos avances han sido posibles gracias, no solo a los avances científicos en el campo de la biomedicina, sino también al propio conocimiento de la enfermedad, consiguiendo una mayor eficacia en los métodos empleados para prevenir, detectar y combatir la enfermedad (FarmaIndustria, 2018).

El Gráfico 3.4 muestra la evolución de la enfermedad desde 1998 hasta 2016. En él se puede comprobar el descenso en la mortalidad mencionado previamente. Observamos como la tasa de mortalidad ha descendido para todas las edades salvo para las edades últimas. Esto no es de extrañar, puesto que el envejecimiento de la población es uno de los factores de riesgo. La detección precoz y los nuevos tratamientos, mencionados previamente, son los causantes de la disminución que podemos observar en este gráfico, siendo más notoria hasta los 60 años. De igual manera, en el Gráfico 3.5 se puede apreciar este fenómeno por edades de la población.

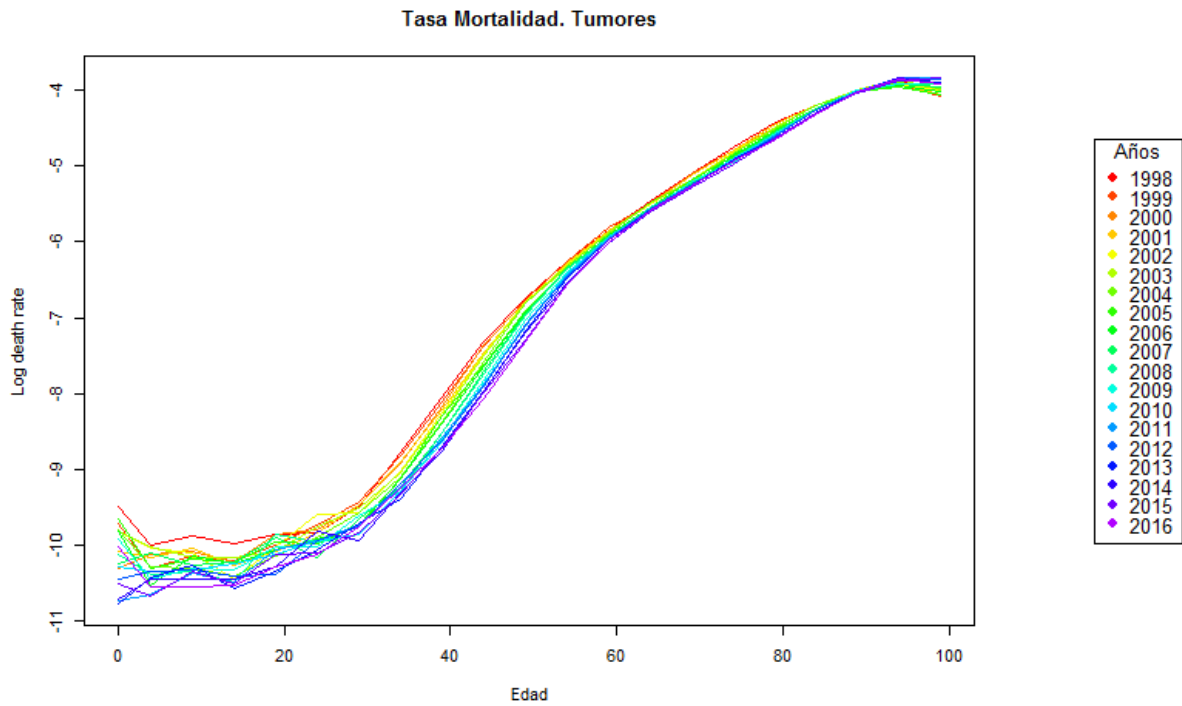


Gráfico 3.4 Tasa de mortalidad por años para tumores. (Elaboración propia a partir de datos del INE)

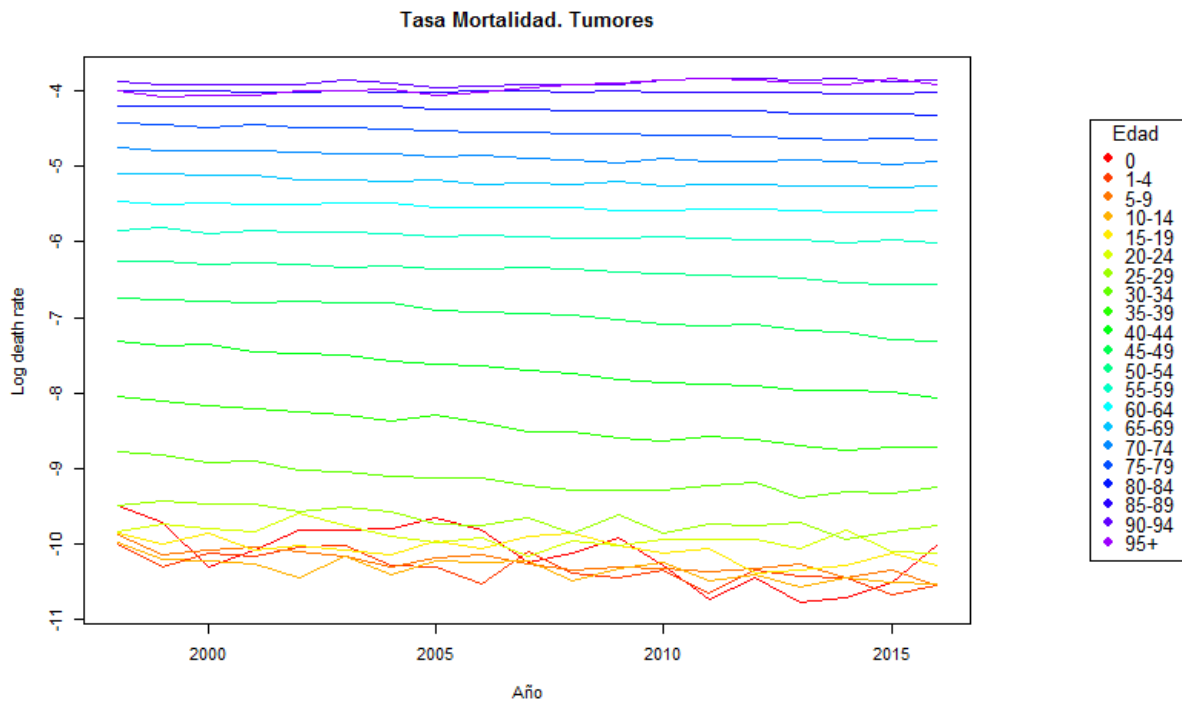


Gráfico 3.5 Tasa de mortalidad por edades para tumores. (Elaboración propia a partir de datos del INE)

### 3.3. Enfermedades del sistema respiratorio

Dentro del capítulo X de la clasificación CIE-10 de la OMS encontramos las enfermedades del sistema respiratorio, formando parte del mismo, enfermedades como faringitis, amigdalitis, influenza (gripe) y neumonía o edema pulmonar agudo. En el histórico analizado, las enfermedades del sistema respiratorio han representado un porcentaje constante dentro de las causas de fallecimiento, representando un 11,03% en 1998 y un 11,40% en 2016. La incidencia en mujeres de esta causa de defunción es de un 10,22%, siendo ligeramente superior en los hombres, con un 12,53%.

En el año 2016, el 5,94% de las defunciones fueron causadas por las dos enfermedades que se encuentran dentro de las 15 de mayor mortalidad en España, siendo las enfermedades crónicas de las vías respiratorias (3,67%) y la neumonía (2,27%).

El Gráfico 3.6 muestra la tasa de mortalidad debido a las enfermedades del sistema respiratorio. Comprobamos que han sufrido un descenso en la mortalidad, más notorio en las primeras edades, ya que en la edad máxima, este descenso es muy leve.

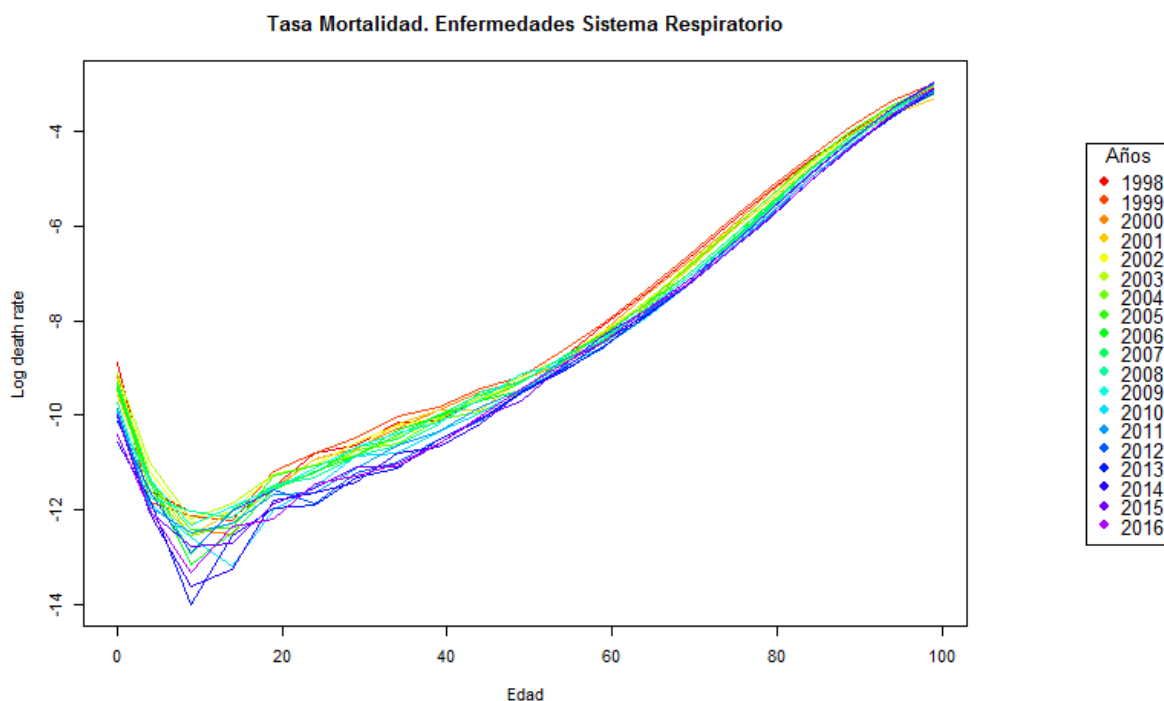
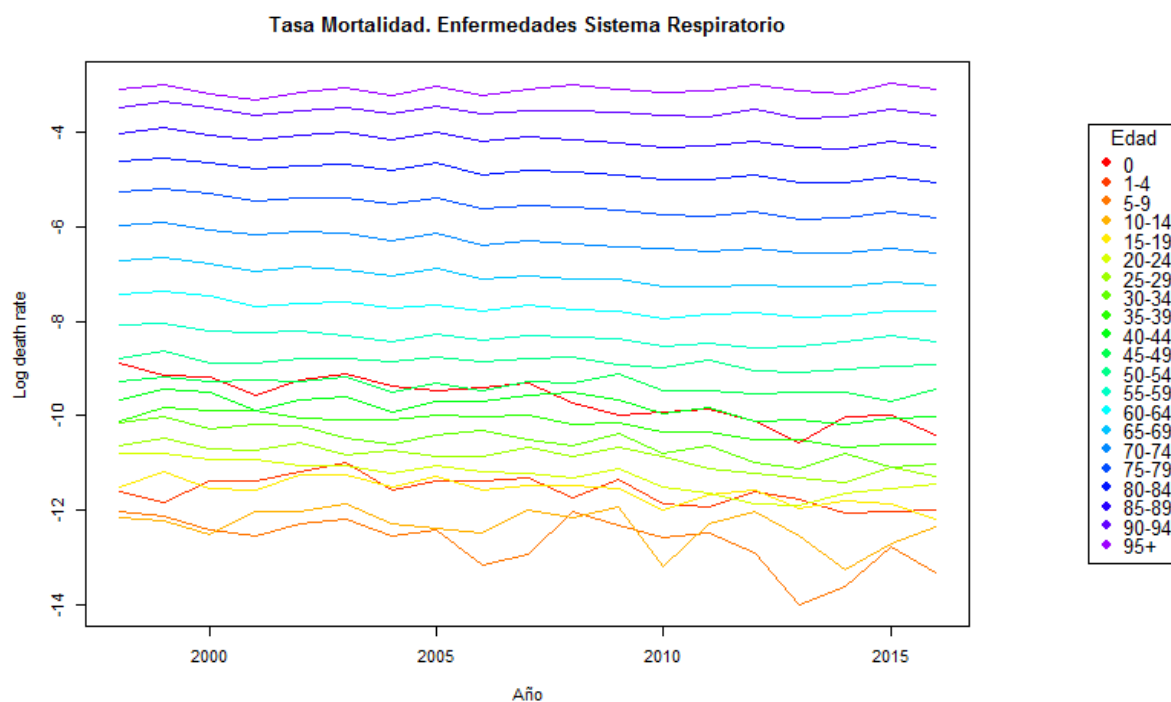


Gráfico 3.6 Tasa de mortalidad por años para enfermedades del sistema respiratorio. (Elaboración propia a partir de datos del INE)



**Gráfico 3.7 Tasa de mortalidad por edades para enfermedades del sistema respiratorio.**  
(Elaboración propia a partir de datos del INE)

En línea con lo mencionado, el Gráfico 3.7 muestra que la mortalidad en los últimos 19 años por enfermedades del sistema respiratorio ha sufrido una disminución pero muy ligera, sobre todo en los últimos años de vida.

### 3.4. Enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos

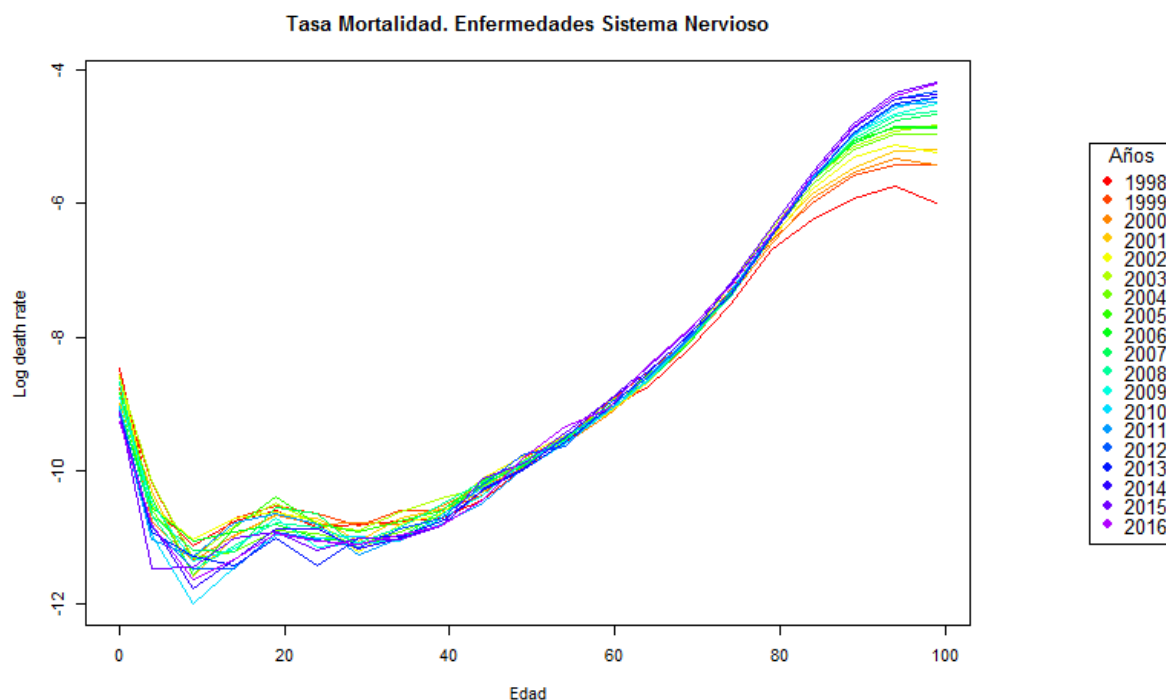
Las enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos se encuentran recogidas en los capítulos VI, VII y VIII de la clasificación CIE-10 de la OMS. El capítulo VI engloba las enfermedades del sistema nervioso como son todas aquellas atrofias sistémicas que afectan principalmente al sistema nervioso central (como el Parkinson), Alzheimer, epilepsias o parálisis cerebral. El capítulo VII lo forman todas aquellas enfermedades agrupadas como enfermedades del ojo y sus anexos, mientras que en el capítulo VIII se encuentran recogidas las enfermedades del oído y de la apófisis mastoides.

Las enfermedades del sistema nervioso han presentado un comportamiento más peculiar, ya que han pasado de ser la novena causa de fallecimiento en España,

representando un 2,20% de la mortalidad total en el año 1998, a ser la cuarta en tan solo 19 años, con un 6,15% del total de la mortalidad española. Esta causa de defunción, representó, en 2016, el 4,68% de la mortalidad de los varones españoles y el 7,67% de la mortalidad de las mujeres.

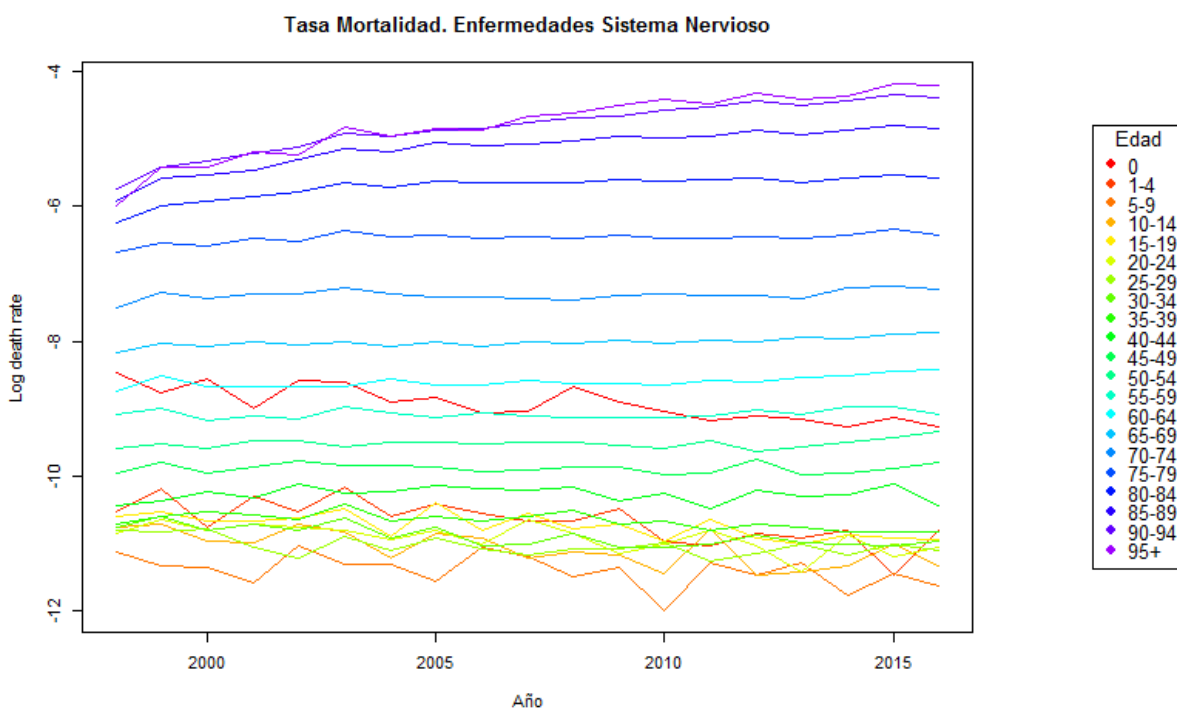
Cabe destacar que en el año 2016, el Alzheimer supuso el 60% de las defunciones agrupadas dentro de esta categoría. En este mismo año, el 3,6% de las defunciones fueron debido al Alzheimer, situando esta enfermedad en el séptimo puesto dentro de las causas de muerte más frecuentes del país. Para las mujeres supuso un 5,17% de las defunciones, mientras que para los hombres solo un 2,09%.

Llama la atención la mayor incidencia en las mujeres que en los hombres. Como ya hemos mencionado, el Alzheimer es una de las enfermedades asociadas a la vejez y, en el caso de las mujeres, su esperanza de vida es mayor que para los hombres, es decir, ellas viven más años, por lo que se encuentran mayormente expuestas a sufrir esta enfermedad. A pesar de ello, el comportamiento en los hombres y en las mujeres no presenta diferencias significativas, por lo que estudiaremos las tasas de mortalidad para el conjunto de la población, como hemos dispuesto en el resto de causas.



**Gráfico 3.8 Tasa de mortalidad por años para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos. (Elaboración propia a partir de datos del INE)**

El agravamiento de la mortalidad por esta causa se puede observar claramente en el Gráfico 3.8, en el que se observa cómo ha aumentado la tasa de mortalidad en los últimos años, especialmente para la población de mayor edad. En el Gráfico 3.9 se observa con claridad este fenómeno, donde las últimas tres cohortes de edad (de 85 a 89 años, de 90 a 94 años y mayores de 95 años) presentan un incremento en la tasa de específica de mortalidad notoriamente superior al resto de las edades.



**Gráfico 3.9 Tasa de mortalidad por edades para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos (Elaboración propia a partir de datos del INE)**

### 3.5. Otras causas de mortalidad

Aunque no entren dentro de ninguna de las cuatro principales causas de fallecimiento estudiadas en este trabajo no podemos dejar de hablar de la demencia y la diabetes mellitus, pues tiene un peso significativo dentro de las causas más frecuentes de mortalidad en España.

La demencia se encuentra dentro de los trastornos mentales y del comportamiento y afectó a un 4,91% de la población española en el año 2016, posicionándose como la cuarta causa de muerte más frecuente. Al igual que con la enfermedad de Alzheimer, la incidencia de esta enfermedad es mayor en mujeres (6,69%) que en hombres (3,19%),

siendo la segunda causa de defunción para ellas, solo por detrás de las enfermedades cerebrovasculares, otra de las enfermedades asociadas con la edad, y por encima del Alzheimer.

Por otro lado, la diabetes mellitus supuso un 2,23% de las defunciones en el año 2016. Esta enfermedad supone, en las economías desarrolladas, un gran problema sanitario, ya que se encuentra ligada con malos hábitos alimentarios característicos muchas veces de la sociedad occidental (Grupo Bioactuarial de Investigación, 2016). La diabetes se encuentra estrechamente relacionada con la obesidad, ya que la obesidad explica un 80% de los casos. Sin embargo, la diabetes no es la única enfermedad relacionada con la obesidad, también está estrechamente relacionada con enfermedades cardíacas, distintos tipos de cáncer o ictus (Rodríguez-Pardo del Castillo & López Farré, 2017).



## 4. MODELIZACIÓN LEE-CARTER Y SUS PROYECCIONES

Una vez estudiada la evolución de las causas de fallecimiento estudiadas procedemos a comentar en este apartado los resultados obtenidos por el modelo Lee – Carter y las posteriores proyecciones que hemos obtenido, para las cuatro causas de defunción analizadas.

Como ya hemos comentado en el apartado 2, el modelo Lee-Carter es un modelo del cual obtenemos tres variables, dos de ellas dependientes de la edad ( $a_x$  y  $b_x$ ) y una tercera dependiente del tiempo ( $k_t$ ). A partir de estos datos podemos proyectar a futuro la variable  $k_t$  y así obtener las tasas específicas de mortalidad de los años deseados. Debido al histórico de datos solo vamos a realizar una proyección a 10 años, ya que con 19 años de estudio, proyectar más no sería coherente. En cada apartado vamos a exponer en primer lugar tres gráficos con los valores de los parámetros del modelo, junto con un gráfico en el que se muestra la correlación de los residuos entre las edades y los años de calendario de cada enfermedad. Posteriormente presentaremos dos gráficos con las proyecciones. El primero con la estimación para cada año, presentado en el eje x las edades. El segundo gráfico representa de forma conjunta el histórico junto la proyección y un intervalo de confianza del 99,5%.

### 4.1. Enfermedades del sistema circulatorio

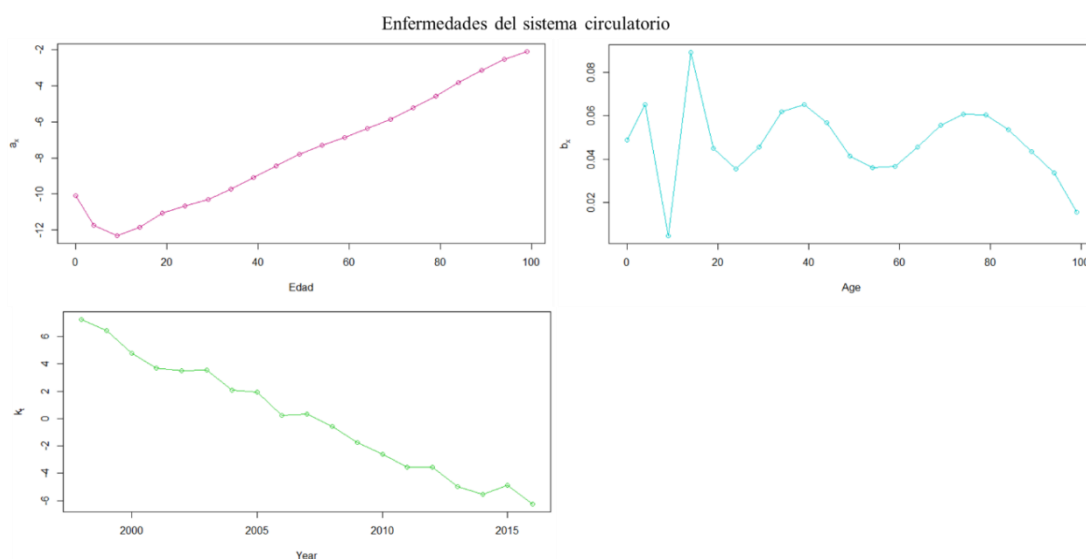
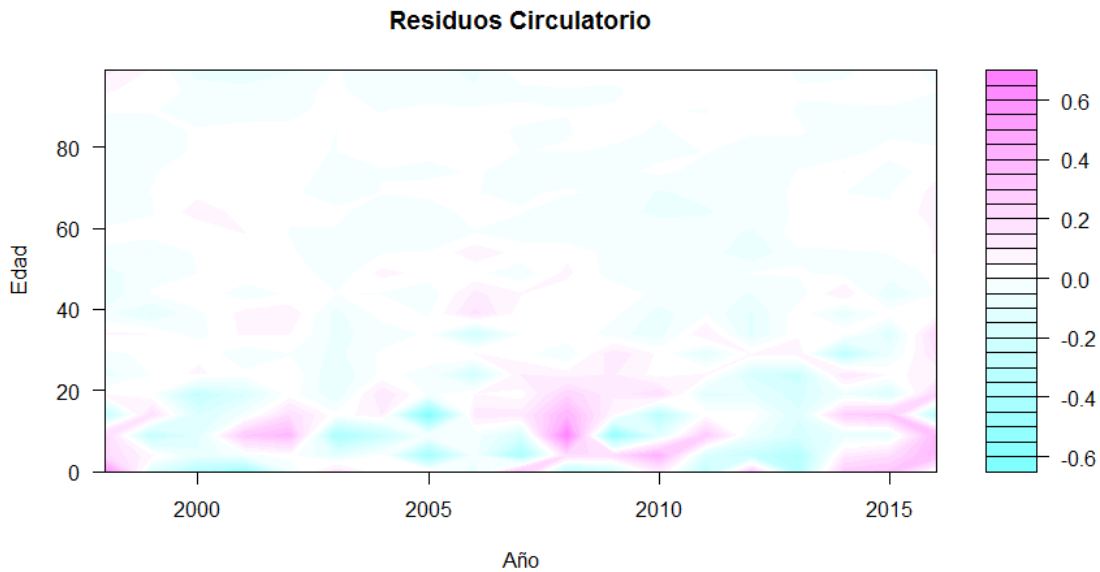


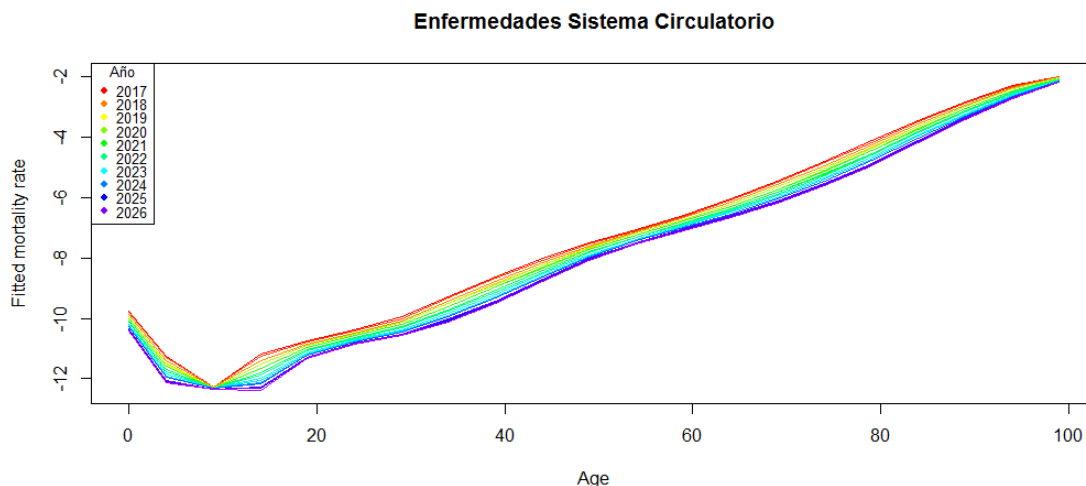
Gráfico 4.1 Parámetros del Modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema circulatorio

En el Gráfico 4.1 se muestran los parámetros obtenidos del modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema circulatorio. Cabe destacar que los valores que toma el parámetro  $a_x$  son mayores que para el resto de las enfermedades analizadas. Este parámetro indica un aumento de la tasa de mortalidad con la edad, exceptuando las primeras edades. El parámetro  $k_t$  muestra la tendencia esperada, un descenso de la enfermedad.



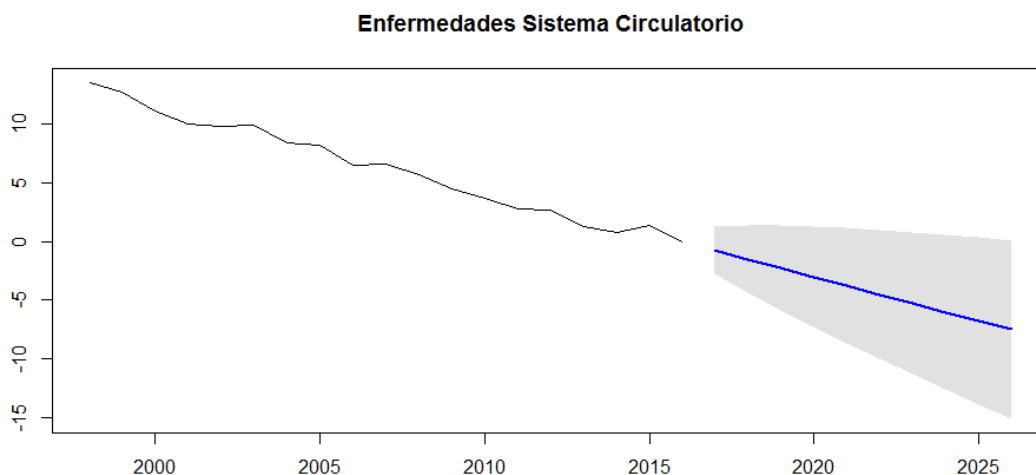
**Gráfico 4.2 Correlación de los residuos para enfermedades del sistema circulatorio**

El Gráfico 4.2 evidencia la baja correlación existente en los residuos, ya que los valores se encuentran muy próximos a 0. Por otro lado, la variación explicada por el modelo es un 72,9%. Estos dos aspectos indican que el modelo es bueno para poder predecir la mortalidad futura debido a enfermedades del sistema circulatorio.



**Gráfico 4.3 Estimación de la tasa de mortalidad para enfermedades del sistema circulatorio**

En el Gráfico 4.3 observamos la estimación de la tasa de mortalidad de las enfermedades del sistema circulatorio para los próximos 10 años. Llama la atención el gran descenso de la mortalidad estimado en el año 2017 para la edad de 10 años aproximadamente. Todos los años proyectados presentan un descenso en la mortalidad por esta causa, aunque al llegar a las edades máximas esta disminución se minimiza significativamente.



**Gráfico 4.4 Histórico y proyección del parámetro  $k_t$  para enfermedades del sistema circulatorio**

En el gráfico anterior, Gráfico 4.4, se presenta el histórico del parámetro  $k_t$  junto con el intervalo de confianza de la predicción. Una vez más, observamos como la tendencia de

esta causa de defunción se mantiene negativa, acorde con todo lo mencionado anteriormente.

## 4.2. Tumores

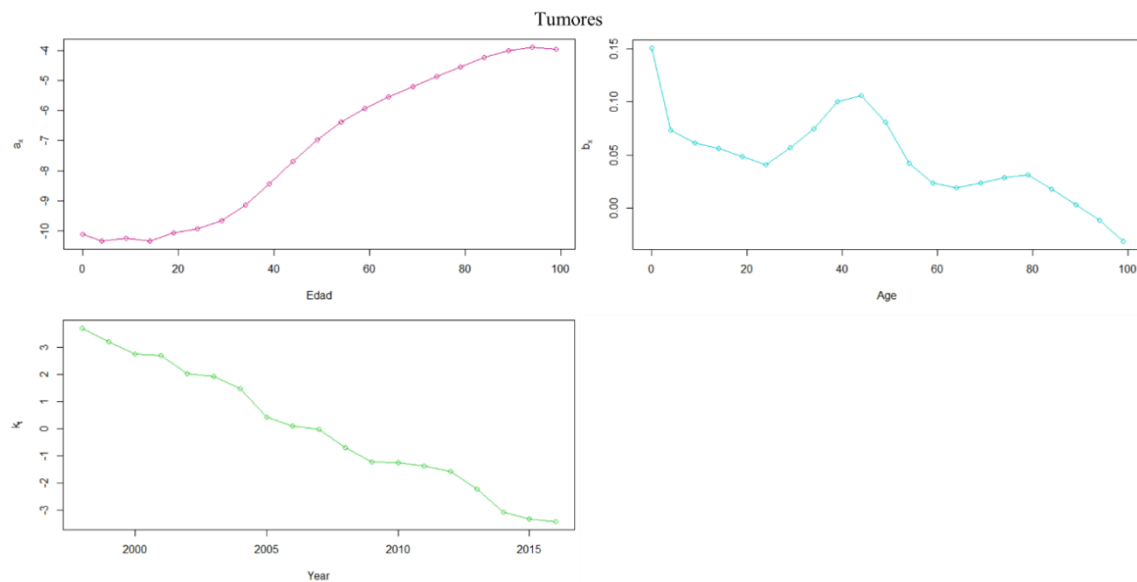
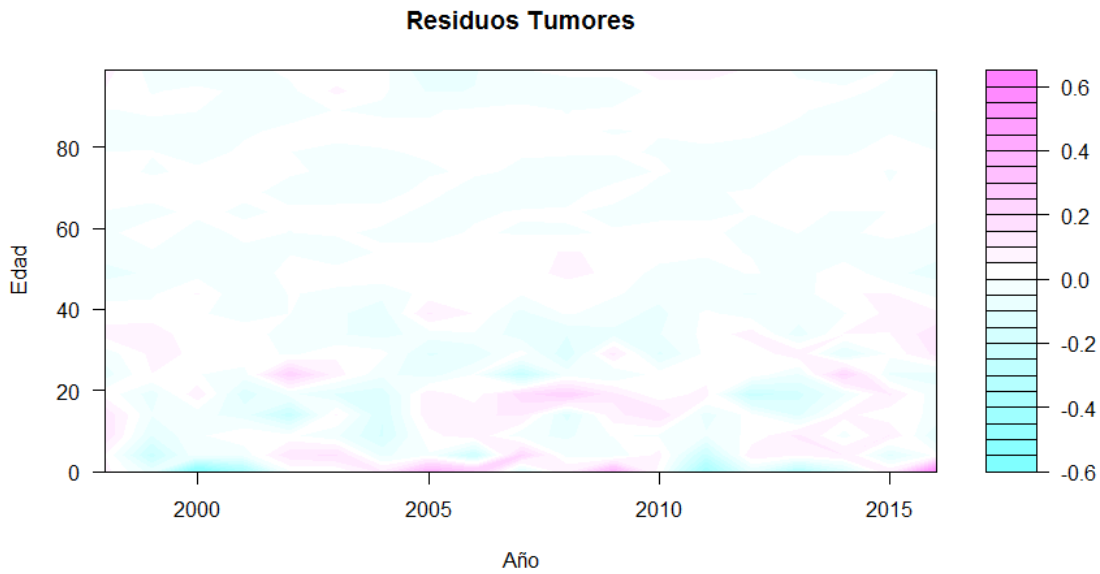


Gráfico 4.5 Parámetros del Modelo Lee-Carter para tumores

Al igual que para enfermedades del sistema circulatorio, en el Gráfico 4.5 el parámetro  $k_t$  en el caso de tumores, muestra una tendencia descendente en el horizonte temporal estudiado. Del parámetro  $a_x$  deducimos una relación positiva entre la mortalidad por tumores y la edad.



**Gráfico 4.6 Correlación de los residuos para tumores**

El Gráfico 4.6 recoge la correlación de los residuos, indicando que no existe correlación en los mismos. La variación explicada por el modelo es del 74,1%.

En el siguiente Gráfico 4.7 se muestran las proyecciones obtenidas con el modelo Lee-Carter para los próximos 10 años. El patrón observado en la proyección coincide con lo que esperamos a partir de los datos históricos que hemos observado en el apartado 3. La mortalidad por tumores se reduce en todas las edades salvo cuando nos aproximamos a la edad máxima, donde la mortalidad aumenta con los años del calendario.

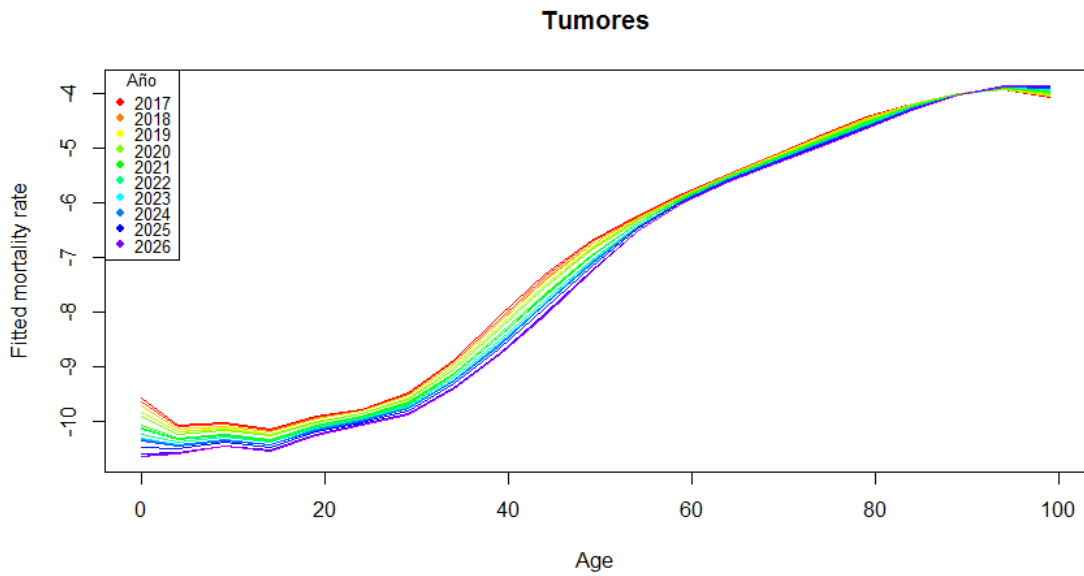


Gráfico 4.7 Estimación de la tasa de mortalidad para tumores

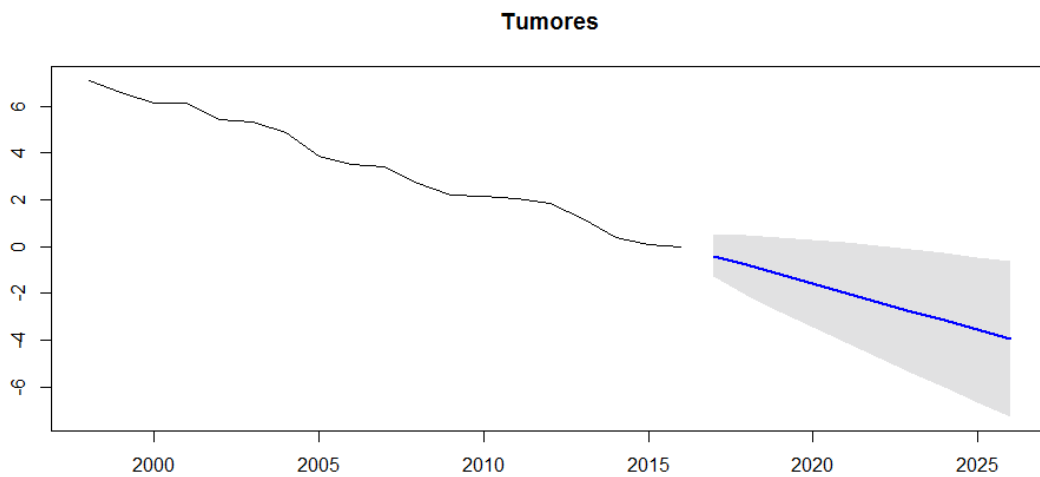


Gráfico 4.8 Histórico y proyección del parámetro  $k_t$  para tumores

En el Gráfico 4.8, se presenta el histórico del parámetro  $k_t$  junto con el intervalo de confianza de la predicción. De nuevo, observamos como la tendencia de esta causa de defunción se mantiene negativa, acorde a todo lo mencionado anteriormente.

### 4.3. Enfermedades del sistema respiratorio

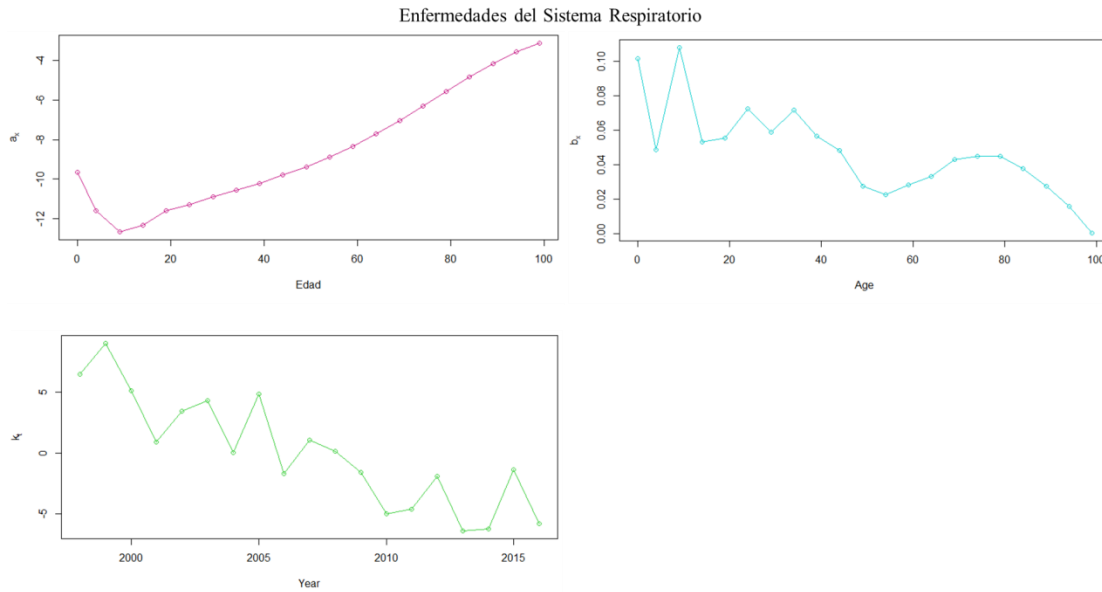
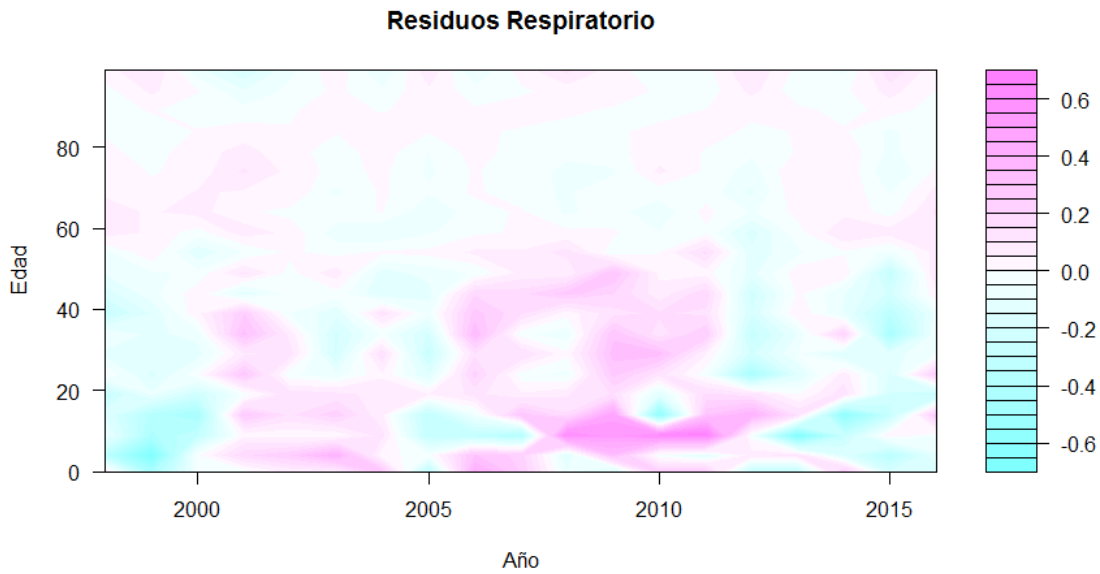


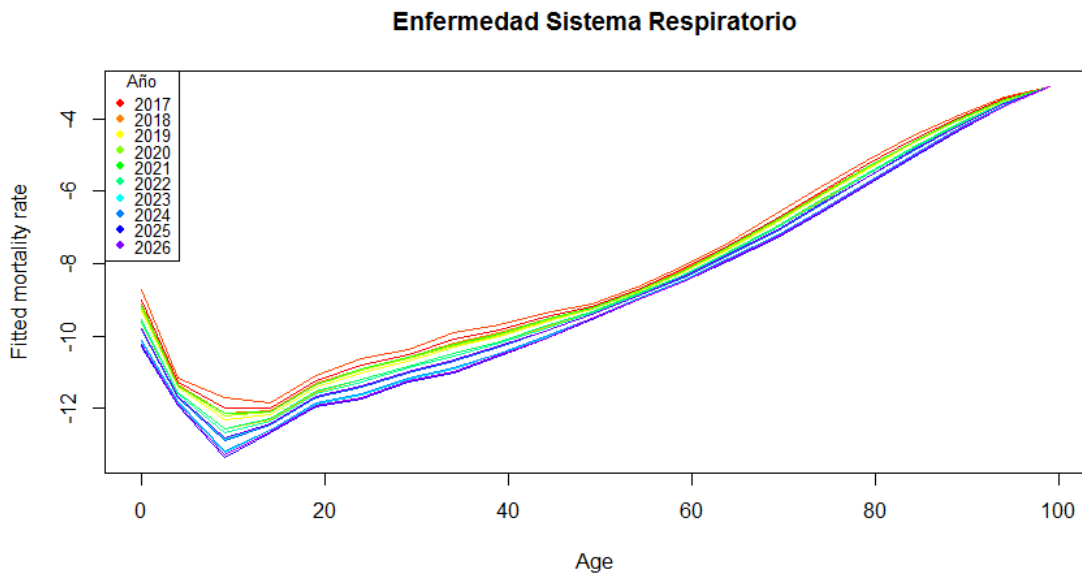
Gráfico 4.9 Parámetros del modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema respiratorio

Los parámetros del modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema respiratorio se encuentran recogidos en el Gráfico 4.9. En este caso no se muestra que el parámetro  $k_t$  para el caso de enfermedades del sistema respiratorio tenga una tendencia negativa de forma tan clara como en los casos anteriores. Esto coincide con lo que hemos analizado con el histórico de esta causa de fallecimiento, ya que no ha variado el comportamiento de esta causa significativamente. La pendiente del parámetro  $a_x$  es positiva, indicando una relación del mismo signo entre la mortalidad por enfermedades del sistema respiratorio y la edad.



**Gráfico 4.10 Correlación de los residuos para enfermedades del sistema respiratorio**

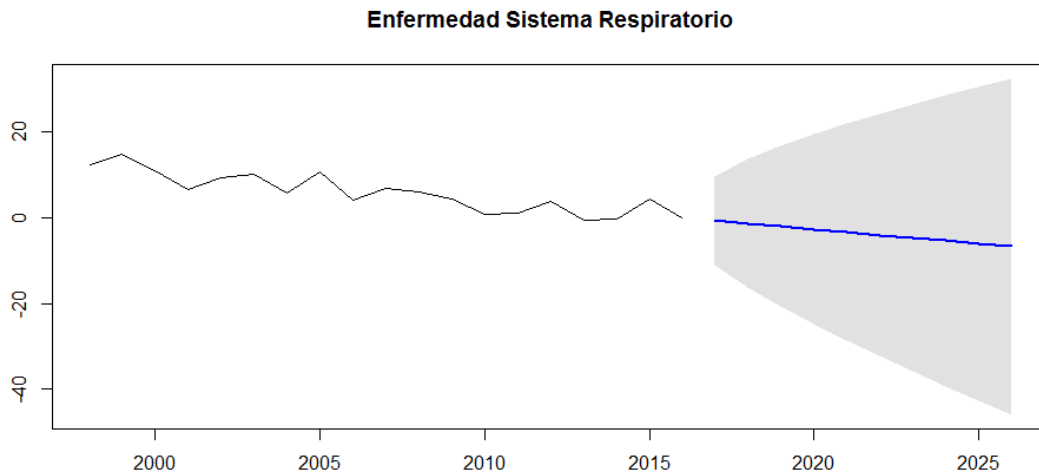
El Gráfico 4.10 recoge la correlación de los residuos. Existe una correlación baja para las edades de 0 a 20 años. La variación explicada por el modelo es del 71,1%.



**Gráfico 4.11 Estimación de la tasa de mortalidad para enfermedades del sistema respiratorio**

La tasa de mortalidad proyectada para enfermedades del sistema respiratorio muestra, en el Gráfico 4.11, una disminución en la primera mitad de las edades. Sin embargo, este descenso de la mortalidad se va reduciendo hasta que, en la edad máxima no se aprecia ninguna variación en los próximos diez años.

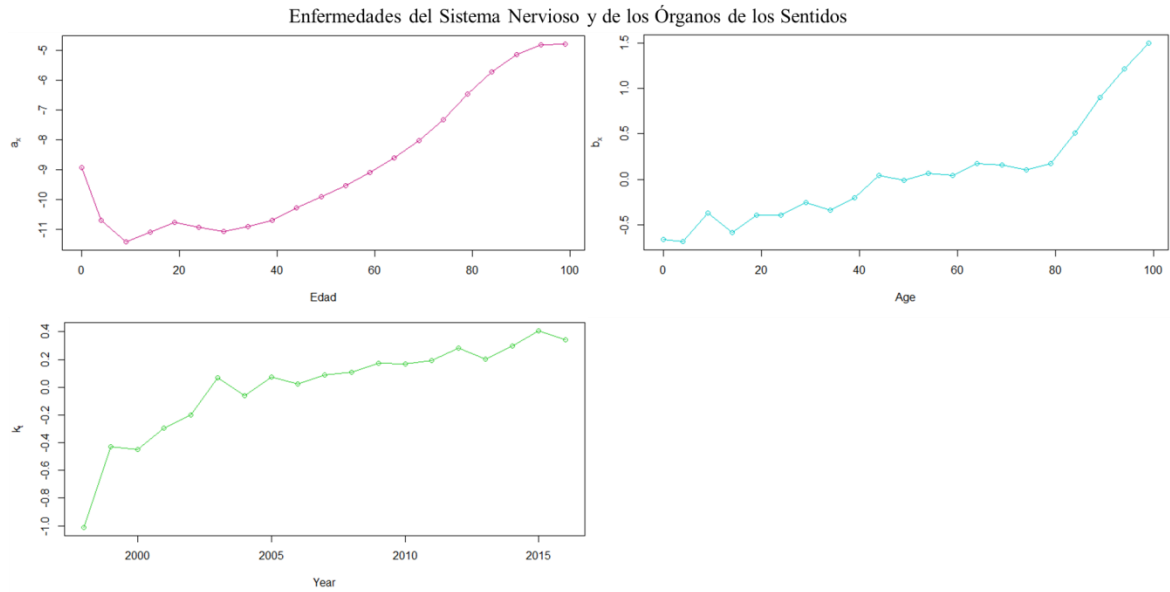




**Gráfico 4.12** Histórico y proyección del parámetro  $k_t$  para enfermedades del sistema respiratorio

Si observamos el histórico del parámetro  $k_t$  en el Gráfico 4.12, lo que esperamos de la proyección es que no presente una gran variación, siendo el intervalo de confianza al 99,5% llamativamente amplio, mayormente para los últimos años de la proyección. Esto se debe a que en el periodo de 1998 a 2016, la tasa de mortalidad por esta causa se ha mantenido constante.

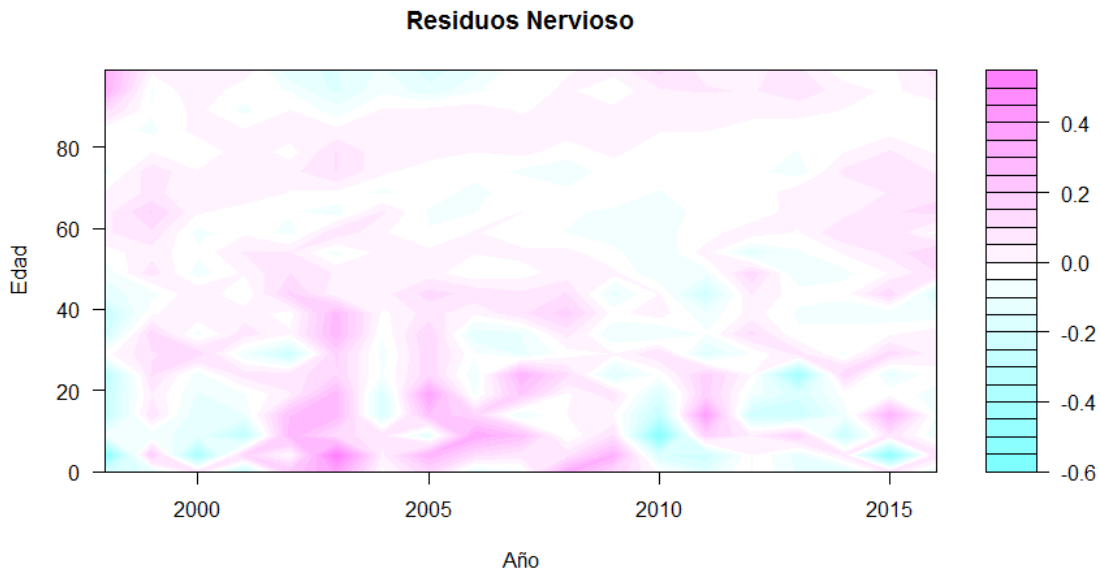
#### 4.4. Enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos



**Gráfico 4.13** Parámetros del modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos

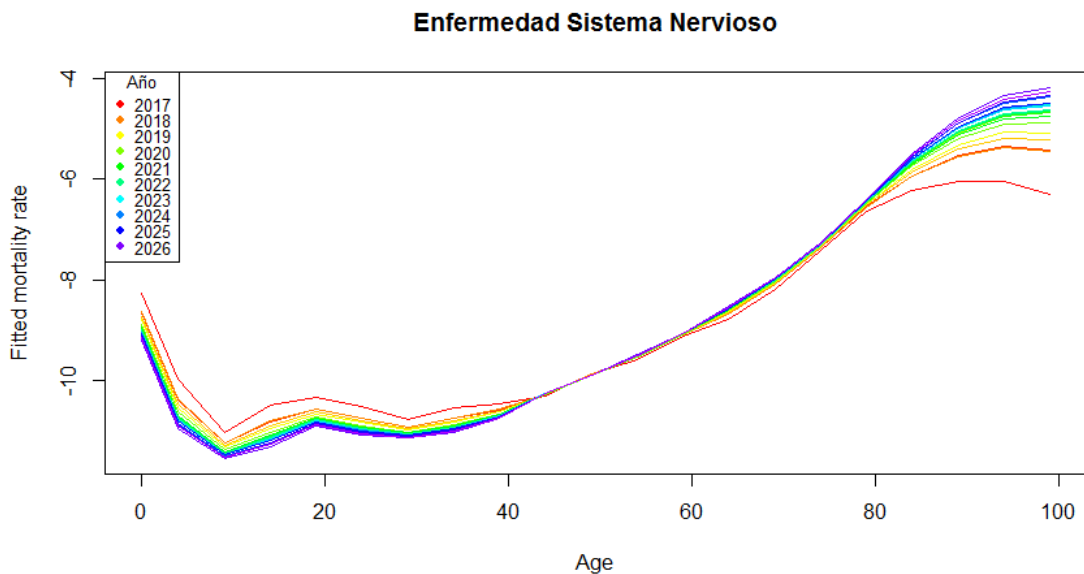
En el Gráfico 4.13 podemos observar los parámetros obtenidos por el modelo Lee-Carter. El parámetro  $b_x$  muestra que, para las edades más avanzadas, la tasa de mortalidad se ve más afectada ante cambios en los valores del parámetro  $k_t$ . Para esta causa el parámetro  $k_t$  muestra un comportamiento diferente al resto, ya que la tendencia temporal es un aumento de la tasa.

Los residuos del modelo obtenido para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos no presentan en el Gráfico 4.14 una correlación significativa, por lo que podemos decir que el modelo captura bien la información. La variación explicada por el modelo es del 71,1%.



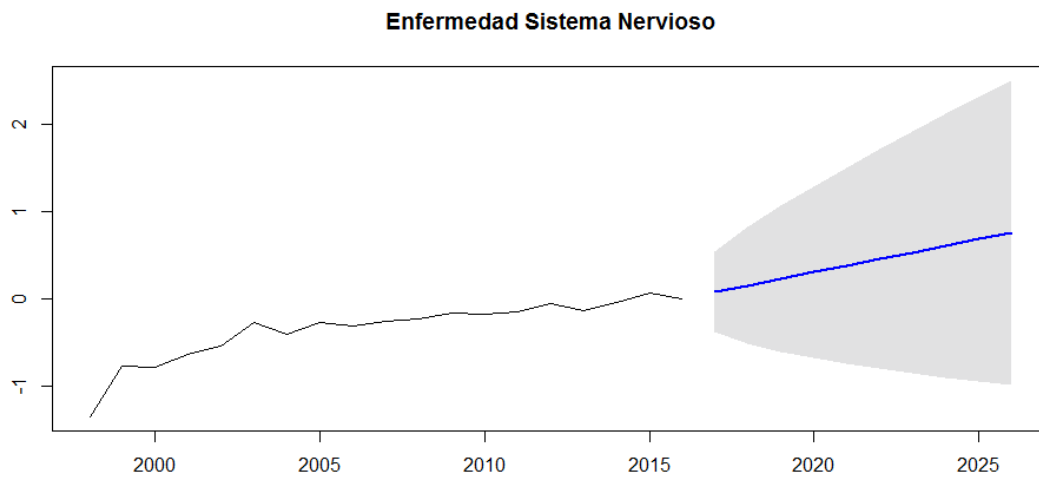
**Gráfico 4.14** Correlación de los residuos para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos

Las proyecciones obtenidas con el modelo para los próximos 10 años se exponen en el Gráfico 4.15. Tal y como esperábamos, podemos verificar, el descenso de la mortalidad para las edades inferiores a 40 años, pero un gran aumento a partir de los 80 años de edad. Entre las edades 40 y 80 no se espera ningún cambio significativo. Todo esto concuerda con la bibliografía expuesta.



**Gráfico 4.15** Estimación de la tasa de mortalidad para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos

Del mismo modo, en el Gráfico 4.16, se revela que el intervalo de confianza al 99,5% de la estimación del parámetro  $k_t$  para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos, aumentará en los años proyectados con una tendencia positiva. Esto se traduce en una mayor tasa de mortalidad esperada por esta causa.



**Gráfico 4.16 Histórico y proyección del parámetro  $k_t$  para enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos**

## **5. COMPROBACIÓN DE LA DESAPARICIÓN DE LAS ENFERMEDADES DEL SISTEMA CIRCULATORIO Y TUMORES**

La esperanza de vida se encuentra en aumento en los países desarrollados y España posee unos registros mejores que el resto de los países europeos. De acuerdo a Goerlich Gisbert (2007), nuestro país es uno de los que cuenta con una mayor esperanza de vida del planeta, siendo por ello razonable que presente un estancamiento de la longevidad en los últimos años. Sin embargo, apunta que aunque el ritmo en el aumento de la esperanza descienda, esta proseguirá revelando una tendencia positiva.

Existen múltiples factores que explican este fenómeno, entre ellos los expuestos por Rodríguez-Pardo y López en su libro “Lonjevidad y envejecimiento en el tercer milenio: nuevas perspectivas”:

- Condiciones y estilo de vida
- Sanidad pública universal
- Dieta mediterránea
- Avances en la tecnología médica
- Clima benigno
- Sistema de pensiones universal

Estos factores han contribuido a un aumento de diez años en la esperanza de vida desde el año 1970. Este hecho, siendo algo beneficioso para la sociedad en su conjunto, representa un reto en el sector asegurador, así como al sector público, debido al riesgo de longevidad.

El riesgo de longevidad se define como la posibilidad de que las reservas constituidas para el hacer frente a los productos de vida ahorro (pensiones), no sean suficientes para hacer frente a los pagos, debido a una mortalidad inferior a la esperada por las Tablas de Mortalidad utilizadas (Rodríguez-Pardo, Albarrán Lozano, Ariza Rodríguez, Cóbreces Juárez, & Durbán Reguera, 2014). Este riesgo afecta a toda la población, ya sean personas particulares, empresas aseguradoras o el Estado, ya que todos ellos se ven afectados por las pensiones, de una forma u otra.

En vista a la importancia en la gestión de este riesgo, la Autoridad Europea de Seguros y Pensiones de Jubilación (European Insurance and Occupational Pensions Authority,

EIOPA), y bajo la normativa de Solvencia II, obliga a las compañías de seguro y reaseguro a hacer frente a este y otros riesgos mediante la tenencia de un Capital de Solvencia Obligatorio (Solvency Capital Requirement, SCR), con el cual podrán superar una desviación negativa de la realidad respecto a las estimaciones realizadas. Bajo la directiva de Solvencia II, el SCR

*“será igual al valor en riesgo de los fondos propios básicos de una empresa de seguros o de reaseguros, con un nivel de confianza del 99,5%, a un horizonte de un año”.*

Este cálculo se puede realizar mediante un modelo interno de la compañía, en el que analice con precisión cómo es el riesgo de la cartera que posee. Debido a la complejidad de cálculos que implica la aplicación de un modelo interno, EIOPA propone una fórmula estándar para cada uno de los subriesgos, cuya aplicación es mucho más sencilla. Para el caso del submódulo de riesgo de longevidad, el artículo 138 del reglamento estipula que

*“el capital obligatorio frente al riesgo de longevidad a que se refiere el artículo 105, apartado 3, letra b), de la Directiva 2009/138/CE será igual a la pérdida de fondos propios básicos de las empresas de seguros y reaseguros que resultaría de una disminución instantánea permanente en un 20 % de las tasas de mortalidad utilizadas para calcular las provisiones técnicas”.*

Debido a todo esto, es interesante analizar, si existe algún escenario en el que la disminución de una de las causas de mortalidad ocasione que el capital provisionado para las desviaciones de la mortalidad al 99,5% no sea suficiente. Esta comprobación la llevaremos a cabo para enfermedades del sistema nervioso y tumores, ya que son las principales causas de fallecimiento, sumando el 56,68% de las defunciones en el año 2016 y ambas están sufriendo un proceso de disminución paulatino.

Para llevar a cabo este estudio, partimos de los parámetros obtenido por el modelo Lee-Carter. A partir de estos datos, y mediante unas simples transformaciones, obtendremos las probabilidades de fallecimiento  $q_x$ , tanto para la población total como para cada una de las dos causas a estudiar, con las que realizaremos el análisis.

Los parámetros obtenidos para el modelo de población total se encuentran recogidos en la Tabla 5.1 y la Tabla 5.2.

**Tabla 5.1 Parámetros para cada edad del modelo Lee-Carter para la población total**

<b>Edades</b>	<b>a<sub>x</sub></b>	<b>b<sub>x</sub></b>
<b>0</b>	-5,53198	0,0643792
<b>1-4</b>	-8,50251	0,0692283
<b>5-9</b>	-9,13297	0,0586972
<b>10-14</b>	-9,0173	0,0607263
<b>15-19</b>	-8,13477	0,0885009
<b>20-24</b>	-7,84102	0,0831415
<b>25-29</b>	-7,73104	0,0840034
<b>30-34</b>	-7,45488	0,0876491
<b>35-39</b>	-7,06576	0,080884
<b>40-44</b>	-6,59819	0,0578378
<b>45-49</b>	-6,11139	0,0368157
<b>50-54</b>	-5,66238	0,022632
<b>55-59</b>	-5,25613	0,0196442
<b>60-64</b>	-4,85935	0,0226629
<b>65-69</b>	-4,43898	0,0291381
<b>70-74</b>	-3,95372	0,0348175
<b>45-79</b>	-3,39584	0,0362266
<b>80-84</b>	-2,7882	0,0306662
<b>85-89</b>	-2,18622	0,0215273
<b>90-94</b>	-1,64314	0,0131073
<b>95 +</b>	-1,24284	-0,0022856

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE*

**Tabla 5.2 Parámetros para cada año del modelo Lee-Carter para la población total. Estimación ARIMA (0, 1, 0)**

<b>k<sub>t</sub></b>	<b>upper</b>	<b>media</b>	<b>lower</b>
<b>2017</b>	2,679708	-0,70982	-4,099356
<b>2018</b>	3,491908	-1,41965	-6,331204
<b>2019</b>	4,027098	-2,12947	-8,286042
<b>2020</b>	4,42905	-2,8393	-10,10764
<b>2021</b>	4,751474	-3,54912	-11,84971
<b>2022</b>	5,020949	-4,25894	-13,53884
<b>2023</b>	5,252703	-4,96877	-15,19024
<b>2024</b>	5,456311	-5,67859	-16,81349
<b>2025</b>	5,638187	-6,38842	-18,41502
<b>2026</b>	5,802838	-7,09824	-19,99932

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE*

A partir de estos valores y aplicando la fórmula explicada en el apartado 2.2, y obtenemos los valores de  $\ln(m_{x,t})$  para la población total, Tabla 5.3. En el Gráfico 5.1 podemos observar estos resultados de manera más visual.

Tabla 5.3 Intervalo de confianza al 99,5% para el Log ( $m_{x,t}$ ) para el año 2026

Edades	upper	media	lower
0	-5,1584	-5,98896	-6,81952
1-4	-8,10079	-8,99391	-9,88703
5-9	-8,79236	-9,54961	-10,3069
10-14	-8,66492	-9,44835	-10,2318
15-19	-7,62121	-8,76297	-9,90473
20-24	-7,35856	-8,43117	-9,50379
25-29	-7,24358	-8,32732	-9,41105
30-34	-6,94626	-8,07703	-9,2078
35-39	-6,59641	-7,6399	-8,68339
40-44	-6,26257	-7,00874	-7,75491
45-49	-5,89775	-6,37272	-6,84768
50-54	-5,53105	-5,82302	-6,115
55-59	-5,14214	-5,39557	-5,649
60-64	-4,72784	-5,02021	-5,31259
65-69	-4,2699	-4,64581	-5,02173
70-74	-3,75168	-4,20087	-4,65005
45-79	-3,18563	-3,65299	-4,12035
80-84	-2,61025	-3,00588	-3,40151
85-89	-2,0613	-2,33903	-2,61676
90-94	-1,56708	-1,73618	-1,90528
95 +	-1,2561	-1,22662	-1,19713

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE

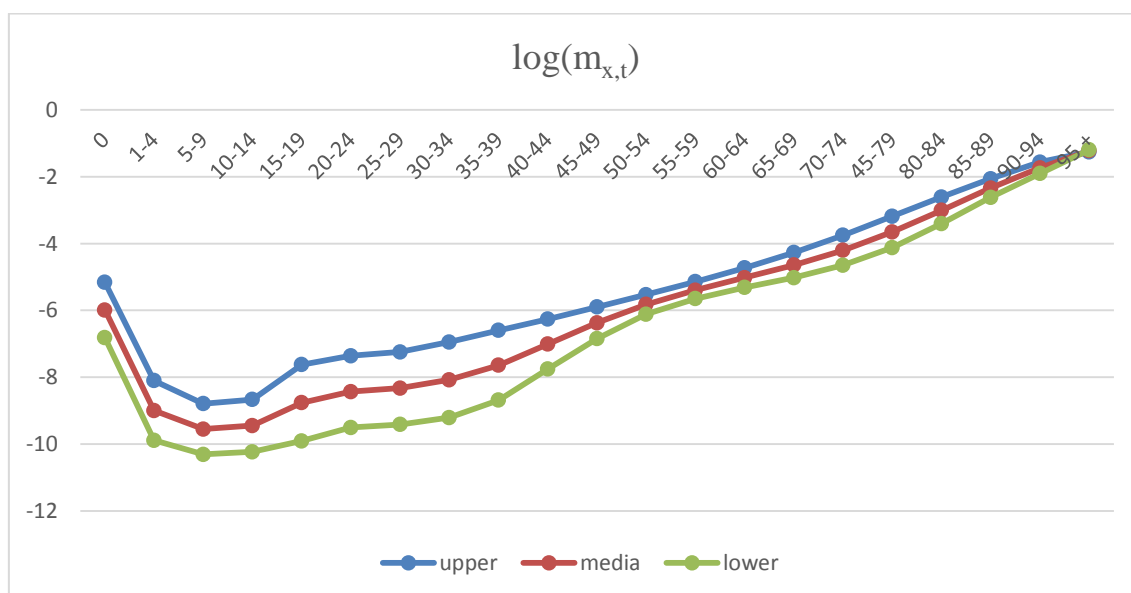


Gráfico 5.1 Intervalo de confianza al 99,5% para el Log ( $m_{x,t}$ ) para el año 2026

Tras aplicar la transformación exponencial obtenemos los valores de  $m_{x,t}$ . Posteriormente convertimos las tasas de mortalidad en probabilidades  $q_x$  y las



multiplicamos por 100.000 para obtener las defunciones que se producirían en el año 2026 en esta población ficticia. Los resultados vienen recogidos en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4 Fallecimientos totales estimados en el año 2026**

<b>Edad</b>	<b>Media</b>	<b>Upper</b>	<b>Lower</b>
<b>0</b>	2.503	5.734	1.092
<b>1-4</b>	124	303	51
<b>5-9</b>	71	152	33
<b>10-14</b>	79	173	36
<b>15-19</b>	156	490	50
<b>20-24</b>	218	637	75
<b>25-29</b>	242	714	82
<b>30-34</b>	311	962	100
<b>35-39</b>	481	1.364	169
<b>40-44</b>	904	1.905	429
<b>45-49</b>	1.706	2.742	1.061
<b>50-54</b>	2.954	3.954	2.207
<b>55-59</b>	4.526	5.828	3.515
<b>60-64</b>	6.581	8.807	4.917
<b>65-69</b>	9.556	13.886	6.571
<b>70-74</b>	14.871	23.205	9.516
<b>45-79</b>	25.581	40.509	16.108
<b>80-84</b>	48.290	70.879	32.774
<b>85-89</b>	91.919	119.520	70.436
<b>90-94</b>	161.543	188.323	138.242
<b>95 +</b>	254.189	247.807	260.707

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE*

Si nos fijamos en el resultado de la Tabla 5.4 para el caso de 95 años en adelante, observamos que el número media de fallecidos (254.189), queda por debajo del límite inferior del intervalo (260.707). Este resultado no debe extrañarnos, puesto que se encuentra en línea con la bibliografía que hallamos a cerca de la modelización de las edades extremas. Esta nos indique que para dicha cohorte de edad encontramos pocos datos, haciendo que los resultado no sean estadísticamente significativos (Rodríguez-Pardo, 2011). Por otro lado, diferentes estudios han llegado a la conclusión de que se está produciendo una desaceleración en las tasas de mortalidad a partir de los 95 años, lo que os confirma que las edades extremas tienden a una mortalidad constante, situación que se acentúa desde los 105 años de edad hasta los 120. Debido a esto, Rodríguez-Pardo afirma que

*“los modelos actuariales deben ser corregidos y ajustados a esta tendencia, que empieza a ser cuantificable en la medida en que los registros de longevidad de esas edades empiezan a aportar datos*

*consistentes y pueden sustituir a meras estimaciones de proyección generadas sobre tasas de mortalidad de edades inferiores”.*

Por este motivo vamos a eliminar esta cohorte de edad de nuestro estudio, ya que necesita de una modelización específica.

### 5.1. Enfermedades del sistema circulatorio

En este apartado vamos a comprobar si la desaparición de las enfermedades del sistema circulatorio como causa de defunción, manteniéndose todo lo demás constante, significaría que las predicciones de la mortalidad al 99,5% no sean suficientes. Para ello, hemos obtenido los valores de los parámetros del modelo Lee-Carter, a partir de los cuales hemos obtenido el número de fallecidos esperados para el año 2026 por esta causa. Todos estos datos se encuentran recogidos en las Tabla 5.5 y Tabla 5.6.

**Tabla 5.5 Parámetros del modelo Lee-Carter para enfermedades del sistema circulatorio**

Edades	$a_x$	$b_x$	Años	$k_t$
<b>0</b>	-10,106177	0,048652418	<b>2017</b>	-0,7507912
<b>1-4</b>	-11,726205	0,065196676	<b>2018</b>	-1,5015825
<b>5-9</b>	-12,31746	0,004431952	<b>2019</b>	-2,2523737
<b>10-14</b>	-11,834686	0,089345819	<b>2020</b>	-3,003165
<b>15-19</b>	-11,064324	0,044803104	<b>2021</b>	-3,7539562
<b>20-24</b>	-10,649314	0,035383562	<b>2022</b>	-4,5047474
<b>25-29</b>	-10,290305	0,045444343	<b>2023</b>	-5,2555387
<b>30-34</b>	-9,728788	0,062012256	<b>2024</b>	-6,0063299
<b>35-39</b>	-9,099141	0,065132041	<b>2025</b>	-6,7571212
<b>40-44</b>	-8,433056	0,056779526	<b>2026</b>	-7,5079124
<b>45-49</b>	-7,811641	0,041227971		
<b>50-54</b>	-7,310411	0,036043073		
<b>55-59</b>	-6,850083	0,036736076		
<b>60-64</b>	-6,373022	0,045458265		
<b>65-69</b>	-5,846163	0,055779905		
<b>70-74</b>	-5,23359	0,060686021		
<b>45-79</b>	-4,557848	0,060393463		
<b>80-84</b>	-3,830784	0,0536375		
<b>85-89</b>	-3,135438	0,043560379		
<b>90-94</b>	-2,521938	0,033756311		

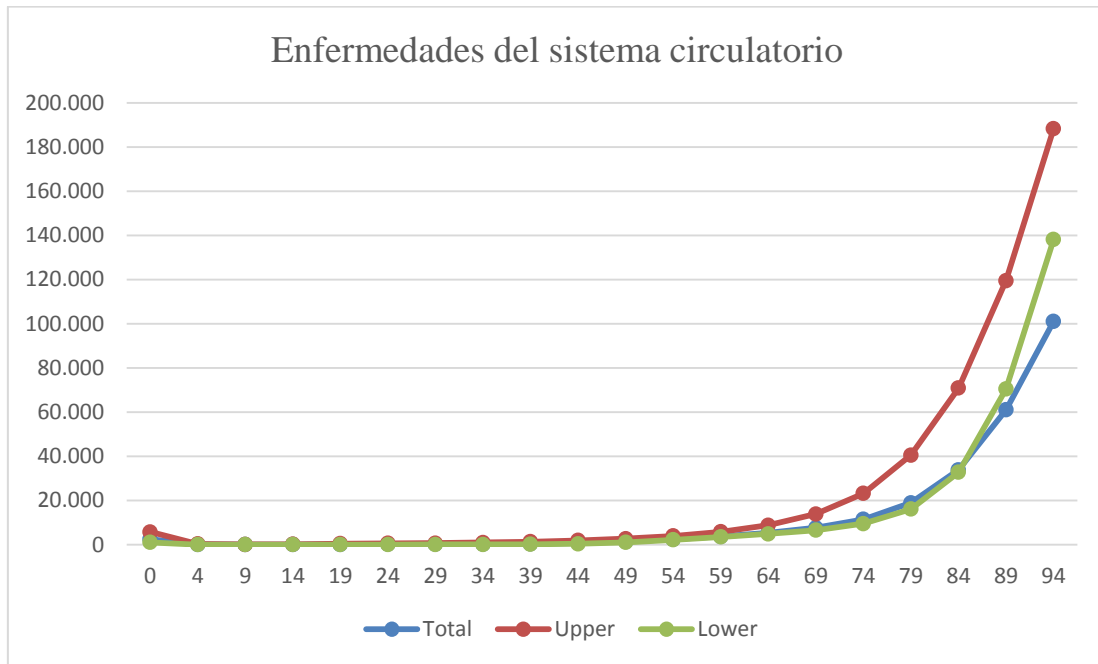
*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE*

**Tabla 5.6 Resultados para enfermedades del sistema circulatorio**

<b>Edades</b>	<b>Log(mx,t)</b>	<b>mx,t</b>	<b>q<sub>x</sub></b>
<b>0</b>	-10,471455	2,833E-05	28
<b>1-4</b>	-12,215696	4,952E-06	5
<b>5-9</b>	-12,350735	4,327E-06	4
<b>10-14</b>	-12,505487	3,706E-06	4
<b>15-19</b>	-11,400702	1,119E-05	11
<b>20-24</b>	-10,914971	1,818E-05	18
<b>25-29</b>	-10,631497	2,414E-05	24
<b>30-34</b>	-10,194371	3,738E-05	37
<b>35-39</b>	-9,5881467	6,854E-05	69
<b>40-44</b>	-8,8593517	0,000142	142
<b>45-49</b>	-8,121177	0,0002972	297
<b>50-54</b>	-7,5810192	0,00051	510
<b>55-59</b>	-7,1258942	0,000804	804
<b>60-64</b>	-6,7143187	0,0012134	1.213
<b>65-69</b>	-6,2649536	0,0019018	1.900
<b>70-74</b>	-5,6892153	0,0033822	3.377
<b>45-79</b>	-5,0112768	0,0066624	6.640
<b>80-84</b>	-4,2334897	0,0145017	14.397
<b>85-89</b>	-3,4624855	0,0313517	30.865
<b>90-94</b>	-2,7753774	0,0623259	60.423

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE*

Una vez obtenido los resultados expuestos, comprobamos el efecto de la desaparición de las enfermedades del sistema circulatorio, disminuyendo la mortalidad total esperada por el número de defunciones por esta causa esperadas a cada edad para el año 2026. Las consecuencias las podemos observar en el Gráfico 5.7, donde se comprueba como la desaparición de esta causa de fallecimiento supondría, para las cohortes de edades 85-89 y 90-94, una mortalidad inferior a la mínima esperada, haciendo que las predicciones al 99,5% no cubran esta posibilidad.



**Tabla 5.7 Desaparición de enfermedades del sistema circulatorio**

## 5.2. Tumores

Siguiendo la misma estructura que en el caso anterior, nos disponemos a constatar si en esta ocasión, la desaparición de las muertes por tumores produciría una insuficiencia en las estimaciones al 99,5% del capital para calculado para cubrir el riesgo de longevidad. Para ello, hemos obtenido los valores de los parámetros del modelo Lee-Carter, a partir de los cuales hemos obtenido el número de fallecidos esperados para el año 2026 por tumores. Todo esto se encuentra recogido en las Tabla 5.8 y Tabla 5.9.

**Tabla 5.8 Parámetros del modelo Lee-Carter para tumores**

Edades	$a_x$	$b_x$	Años	$k_t$
<b>0</b>	-10,119108	0,15072258	<b>2017</b>	-0,3951409
<b>1-4</b>	-10,324356	0,07372759	<b>2018</b>	-0,7902818
<b>5-9</b>	-10,24123	0,0616371	<b>2019</b>	-1,1854227
<b>10-14</b>	-10,339158	0,05604864	<b>2020</b>	-1,5805636
<b>15-19</b>	-10,07535	0,04846362	<b>2021</b>	-1,9757044
<b>20-24</b>	-9,918368	0,04127849	<b>2022</b>	-2,3708453
<b>25-29</b>	-9,667414	0,057053	<b>2023</b>	-2,7659862
<b>30-34</b>	-9,138479	0,07459292	<b>2024</b>	-3,1611271
<b>35-39</b>	-8,443863	0,10034268	<b>2025</b>	-3,556268
<b>40-44</b>	-7,695669	0,10582186	<b>2026</b>	-3,9514089
<b>45-49</b>	-6,97697	0,08091416		
<b>50-54</b>	-6,38352	0,04212993		
<b>55-59</b>	-5,919924	0,02410933		
<b>60-64</b>	-5,538948	0,01925371		
<b>65-69</b>	-5,198544	0,02395211		
<b>70-74</b>	-4,871143	0,02887049		
<b>45-79</b>	-4,542879	0,03117409		
<b>80-84</b>	-4,244656	0,0181972		
<b>85-89</b>	-4,011556	0,00366093		
<b>90-94</b>	-3,886581	-0,0109596		

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE

**Tabla 5.9 Resultados para tumores**

Edades	Log(mx,t)	mx,t	$q_x$
<b>0</b>	-10,714675	2,22165E-05	22
<b>1-4</b>	-10,615684	2,45283E-05	25
<b>5-9</b>	-10,484783	2,79587E-05	28
<b>10-14</b>	-10,560629	2,59165E-05	26
<b>15-19</b>	-10,26685	3,47667E-05	35
<b>20-24</b>	-10,081476	4,18476E-05	42
<b>25-29</b>	-9,8928537	5,05345E-05	51
<b>30-34</b>	-9,4332261	8,00206E-05	80
<b>35-39</b>	-8,840358	0,000144771	145
<b>40-44</b>	-8,1138144	0,000299375	299
<b>45-49</b>	-7,2966949	0,000677775	678
<b>50-54</b>	-6,5499926	0,001430126	1.429
<b>55-59</b>	-6,0151898	0,002441385	2.438
<b>60-64</b>	-5,6150273	0,00364271	3.636
<b>65-69</b>	-5,2931886	0,00502571	5.013
<b>70-74</b>	-4,9852221	0,006838259	6.815
<b>45-79</b>	-4,6660606	0,009409264	9.365
<b>80-84</b>	-4,3165606	0,013345706	13.257
<b>85-89</b>	-4,0260218	0,01784518	17.687
<b>90-94</b>	-3,8432751	0,021423323	21.195

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE

Posteriormente a la realización de dichos cálculos, verificamos cuál esperamos que sea el efecto de la desaparición de los tumores, disminuyendo la mortalidad total esperada por el número de defunciones por esta causa esperadas a cada edad para el año 2026. El Gráfico 5.2 muestra las consecuencias de esta disminución en la mortalidad. En él podemos comprobar como la desaparición de esta causa de fallecimiento supondría, para las cohortes de edades 45-49, 50-54, 55-59, 60-64, 65-69 y 70-74, una mortalidad inferior a la mínima esperada, haciendo que las predicciones al 99,5% no cubran esta posibilidad.

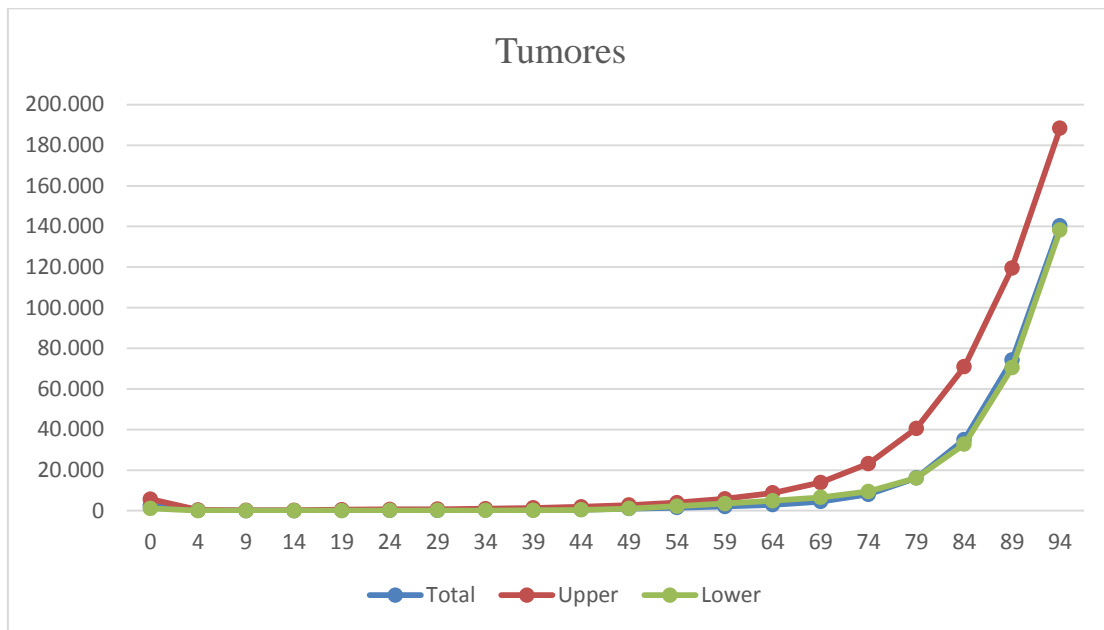


Gráfico 5.2 Desaparición de tumores

## 6. ANÁLISIS JUICIO EXPERTO

Los cálculos realizados en la sección anterior nos llevan a preguntarnos si es posible que los escenarios anteriores o algún otro semejante ocurra. Por ello, hemos considerado que el siguiente aspecto a tratar sería la realización de un análisis de escenarios *What if?* de ambas enfermedades, donde los escenarios propuestos sean fruto de la opinión por juicio experto de profesionales de la medicina. Por consiguiente, hemos realizado un cuestionario, contestada por 17 expertos y cuyas preguntas y respuestas se encuentran recogidas en el Anexo I.

Este cuestionario está dividido en cuatro secciones. En la primera se solicitan aspectos personales como son el sexo, el rango de edad y la profesión. La parte principal del cuestionario está formada por las dos siguientes secciones, en las que se plantean las cuestiones de juicio experto sobre la posibilidad de que estas causas de fallecimiento experimenten una reducción existiendo las tres posibles respuestas:

- No
- Entre en 60% y el 80%
- Entre el 80% y el 90%
- Entre el 90% y el 100%

En los resultados obtenidos un 41,2% de los encuestados contestó que no creen que sea posible que las enfermedades del sistema circulatorio presenten ninguna reducción. Sin embargo, para el caso de tumores, el 58,8% consideran que esta causa puede sufrir una disminución de entre el 60% y el 80%.

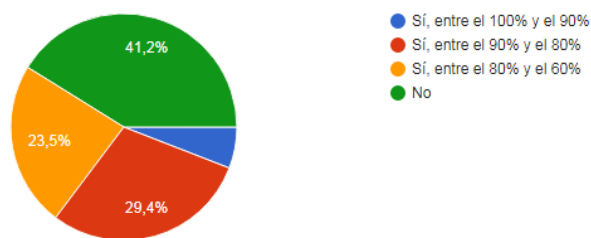
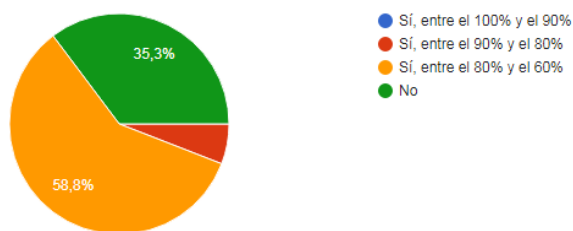
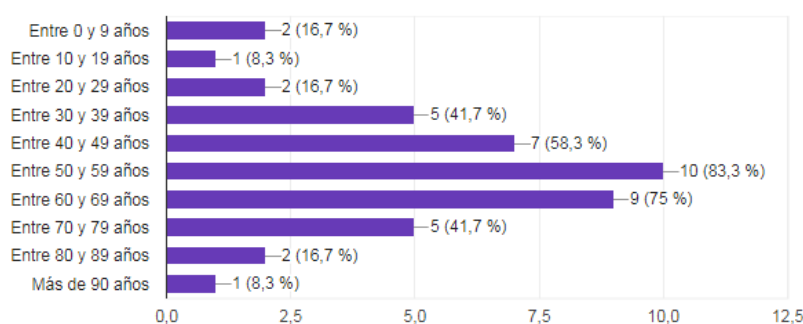


Gráfico 6.1 Posibilidad de la desaparición de enfermedades del sistema circulatorio

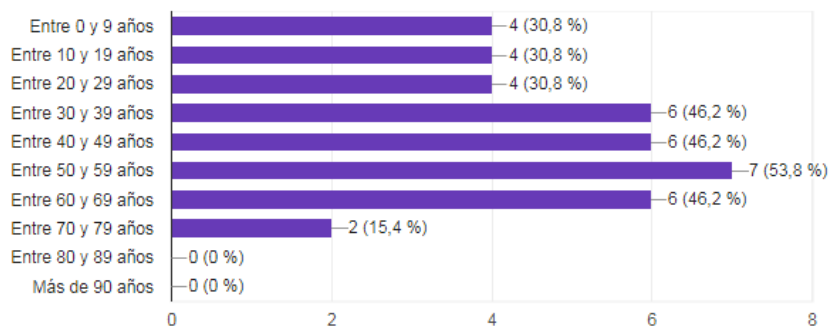


**Gráfico 6.2** Posibilidad de la desaparición de tumores

La siguiente cuestión es a que edades creen que este cambio puede suceder, donde la respuesta mayoritaria coincide en ambos casos, siendo la franja de edad entre los 50 y los 59 años.



**Gráfico 6.3** Edades a las que se espera la disminución en enfermedades del sistema circulatorio



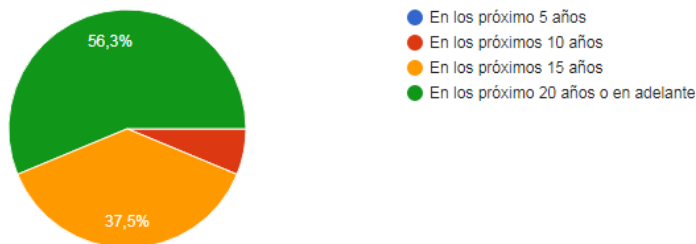
**Gráfico 6.4** Edades a las que se espera la disminución en tumores

La última pregunta de estas secciones se pregunta acerca del horizonte temporal en el que esperan que esperen que esta reducción de la mortalidad tenga lugar. Para enfermedades del sistema circulatorio se obtiene el mismo porcentaje de respuesta (42,9%) para la posibilidad de que ocurra en los próximos 10 años y en los próximos 20 años o en adelante. Para el caso de tumores, el 56,3% de los encuestados esperan que estos cambios en la mortalidad se produzcan a partir de los próximos 20 años.





**Gráfico 6.5 Horizonte temporal de la reducción de la mortalidad para enfermedades del sistema circulatorio**



**Gráfico 6.6 Horizonte temporal de la reducción de la mortalidad para tumores**

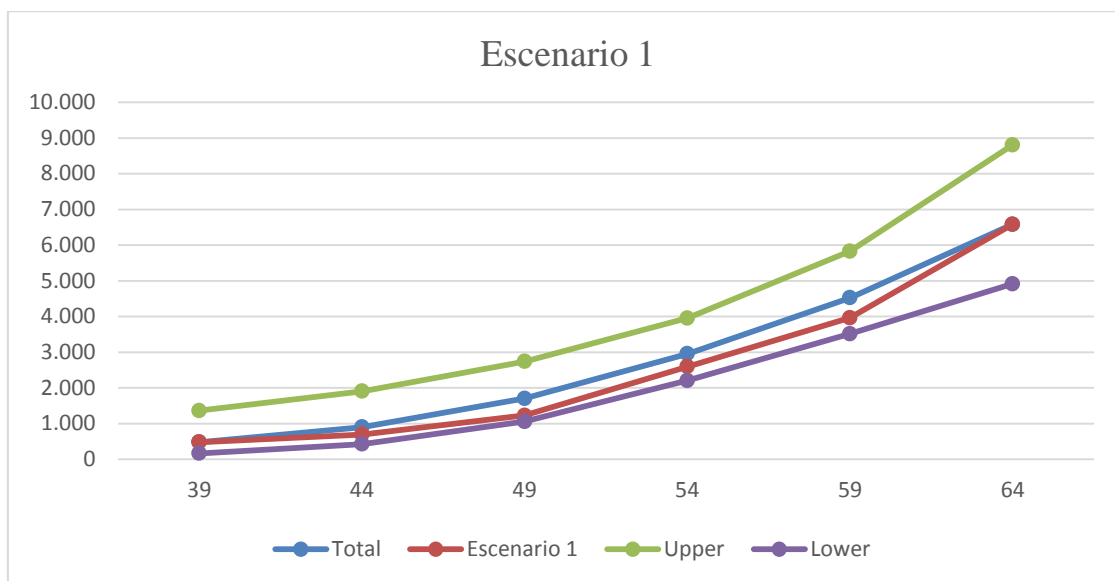
De acuerdo a la opinión recogida de los expertos, la reducción en la incidencia de estas causas de fallecimiento, no sólo vendrá ligada de una mejora en los fármacos, sino también, para el caso de enfermedades del sistema circulatorio, por una mejora en la calidad de vida gracias a unos hábitos más saludables que reducen los factores de riesgo. Para el caso de tumores, la detección temprana será uno de los motivos por los que se podrá reducir la mortalidad. Sin embargo, en varias ocasiones apuntan que, al tratarse los tumores de enfermedades multifactoriales y, algunos de ellos, ligados a la vejez, no será posible erradicar esta causa de fallecimiento en su totalidad.

A partir de estos datos, vamos a proceder a analizar dos posibles escenarios. El primero de ellos consiste en la aplicación de la mediana de las respuestas a la mortalidad, mientras que el segundo recoge el peor escenario posible dentro de las respuestas. Estos datos los esperamos dentro del horizonte temporal de nuestras proyecciones, es decir, 10 años.

### 6.1. Escenario 1

Realizamos la mediana de las respuestas, en lugar de la media, para evitar las respuestas extremas o atípicas. El resultado de este escenario consiste en una reducción de entre un 60% y un 80% (70%), en las edades comprendidas entre los 40 y 49 para tumores (para

nosotros las cohortes 40-44 y 45-49), y en las edades 50 y 59 para enfermedades del sistema circulatorio (en nuestro caso las cohortes 50-54 y 55-59). El Gráfico 6.1 recoge este escenario.

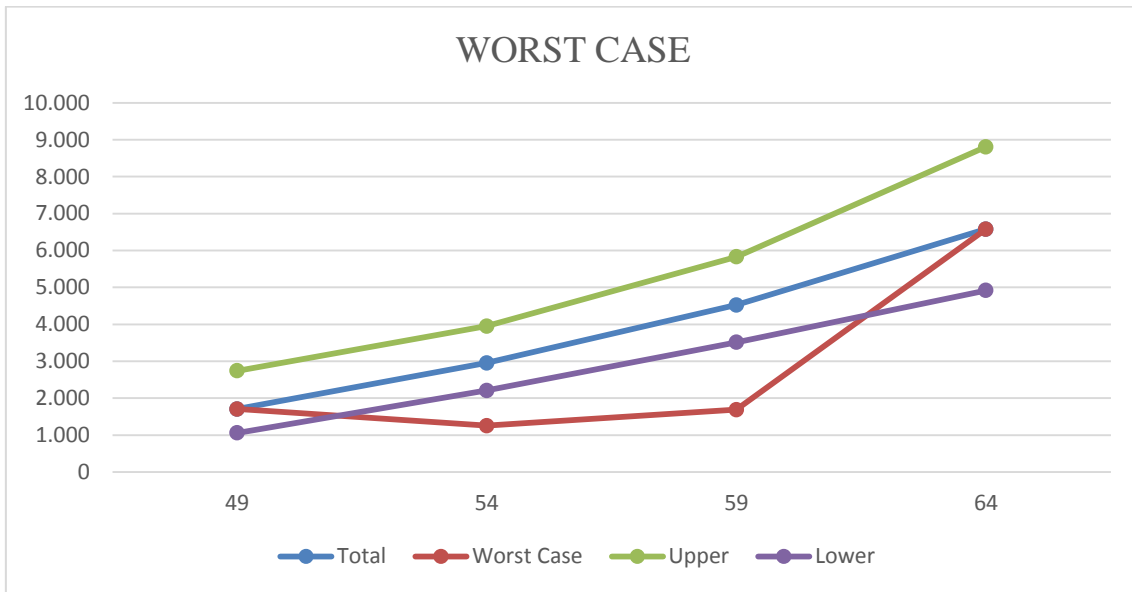


**Gráfico 6.7 Escenario 1. Desaparición del 70% de tumores a la edad 40-49 y de enfermedades del sistema circulatorio a la edad 50-59**

Se puede comprobar en el gráfico expuesto que bajo este supuesto, la reducción sufrida no haría que se saliera del intervalo de confianza al 99,5%. Por tanto, este supuesto no altera la mortalidad total esperada.

## 6.2. Escenario 2. Worst Case

El segundo supuesto que hemos analizado es la posibilidad de que ocurra el peor escenario posible de acuerdo al juicio experto. Este escenario sería una reducción de entre el 90% y 100% (aplicaremos una reducción del 95%) para enfermedades del sistema circulatorio y entre el 80% y el 90% (cogeremos el 85%) para tumores, siendo ambos casos en las edades 50 y 59 años.



**Gráfico 6.8 WORST CASE. Desaparición del 95% de enfermedades del sistema circulatorio a la edad 50-59 y del 85% de tumores a la edad 50-59**

En este caso se puede comprobar como el escenario supondría una desviación respecto al intervalo de confianza calculado para la mortalidad total, por lo que resultaría en un impacto negativo.

## 7. PROYECCIÓN CAUSAL VS PROYECCIÓN TOTAL

Para concluir con este trabajo de fin de máster vamos a proceder a investigar si mediante la suma de las proyecciones de la tasa de mortalidad por causa obtenemos las proyecciones totales.

El Institute and Faculty of Actuaries del Reino Unido demostró que, la suma de causas proporciona una tasa de mortalidad mayor a la obtenida por medio de una proyección única (Tabeau, Ekamper, Huisman, & Bosch, 1999). En vista de estos resultados, estudiaremos a continuación el caso de España con las cuatro causas analizadas a lo largo del trabajo y una quinta que recoja el resto de las causas.

Tal y como hemos indicado anteriormente, obtenemos las proyecciones de probabilidades de defunción, para la población española de entre 60 y 64 años, tanto de forma total como la suma de las causas. Los datos obtenidos se encuentran recogidos en la Tabla 7.1.

**Tabla 7.1 Proyección causal VS Proyección total**

	Circulatorio	Tumores	Respiratorio	Nervioso	Resto	SUMA	TOTAL
<b>2017</b>	0,00164835	0,00389327	0,00043839	0,00389327	0,00144092	0,01131421	0,00760275
<b>2018</b>	0,00159309	0,0038638	0,00042865	0,0038638	0,00141460	0,01116398	0,00748188
<b>2019</b>	0,00153967	0,00383459	0,00041912	0,00383459	0,00138876	0,01101675	0,00736292
<b>2020</b>	0,00148805	0,00380558	0,00040981	0,00380558	0,00136339	0,01087243	0,00724585
<b>2021</b>	0,00143816	0,00377679	0,0004007	0,00377679	0,00133848	0,01073095	0,00713063
<b>2022</b>	0,00138993	0,00374822	0,00039180	0,00374822	0,00131403	0,01059223	0,00701724
<b>2023</b>	0,00134333	0,00371987	0,00038310	0,00371987	0,00129003	0,01045620	0,00690565
<b>2024</b>	0,00129828	0,00369173	0,00037458	0,0036917	0,00126646	0,01032280	0,0067958
<b>2025</b>	0,00125475	0,00366380	0,00036626	0,00366380	0,00124332	0,0101919	0,00668774
<b>2026</b>	0,00121267	0,00363608	0,00035812	0,00363608	0,00122061	0,01006358	0,00658137

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE*

Como podemos observar nuestros resultados siguen en la misma línea que en el caso inglés, ya que la proyección por las causas es mayor que la proyección total. Las conclusiones que se sacan de estos resultados es la existencia de una correlación entre las causas de mortalidad. En otras palabras, si la mortalidad por una determinada causa disminuye, la mortalidad por otras también lo hace. Esto hecho se puede deber a que un avance médico reduce la tasa de cada causa de manera correlacionada.

A la luz de esta diferencia hemos descubierto que existe una relación constante del 66% entre la suma y el total. Si nos fijamos más detenidamente, esta proporción va reduciendo ligeramente a medida que nos avanzamos en el horizonte temporal de la proyección, ya que la proporción del total sobre la suma es del 67,2% para el año 2017, y se va reduciendo paulatinamente hasta el 65,4% en el año 2026. Buscando una función que determine esta correlación hemos dado con la siguiente

$$tasa\ total_n = tasa\ suma_n (0,6735 - 0,00195(n - 1))$$

Si a la tasa que suma del año n la multiplicamos por el factor 0,6735, y este lo vamos reduciendo a 0,00195 por el número de años transcurridos, es decir, para el año 2017 no habrá reducción, para el 2018 la reducción será de 0,00195, para el 2019 será 0,00195\*2 y así sucesivamente. Gracias a esta fórmula podemos aproximar los resultados de la tasa de mortalidad por causa a la tasa de mortalidad total al 99,99%.

## 8. CONCLUSIONES

Como vemos reflejado, en el artículo “*Three-way data analysis applied to cause specific mortality trend*”, publicado por Giordiano, Haberman y Russolillo en mayo de 2018, se llega a la misma conclusión ya expuesta en este trabajo de fin de máster: la línea específica de investigación de la longevidad consiste en el estudio de la misma por causas de fallecimiento en lugar de en su totalidad.

Para llegar a estas conclusiones hemos empezado analizando el histórico de la tasa de mortalidad de las cuatro principales causas de fallecimiento en España. De este modo hemos comprobado que la tendencia observada en los últimos años es un descenso de la mortalidad tanto por enfermedades del sistema circulatorio como por tumores. Enfermedades del sistema respiratorio no presenta ningún cambio significativo en el histórico estudiado, manteniendo constante. Sin embargo, enfermedades del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos presenta un incremento en los últimos años, debido a la mayor incidencia de la enfermedad en personas de mayor edad.

Los datos obtenidos del modelo Lee-Carter para los parámetros y las posteriores proyecciones de las tasas de mortalidad de estas enfermedades nos han transmitido que, en los próximos 10 años, los patrones esperados para las defunciones en Españas seguirán los mismos patrones que en el pasado.

Del capítulo 5 hemos derivado dos conclusiones principales.

- En primer lugar, para aproximar de manera precisa la tasa de mortalidad futura en las edades extremas, se deben utilizar modelos actuariales corregidos y ajustados. Esto abre una posible futura línea de investigación que ya se está empezando a explorar por algunos autores.
- Por otro lado, hemos probado cuál sería el resultado de la desaparición del total de las defunciones por enfermedades del sistema circulatorio o por tumores.
  - o En el primer caso obtenemos que esta desaparición provocaría que la mortalidad total se desviara negativamente del intervalo de confianza proyectado, con un nivel de significación del 99,5%. Esto sucedería únicamente para las edades 85-89 y 90-94.
  - o En el caso de los tumores, esta misma conclusión es correcta, pero esta vez para las edades 45-49, 50-54, 55-59, 60-64, 65-69 y 70-74.

Gracias a la realización de un cuestionario realizado a profesionales del sector, hemos podido efectuar un análisis de escenarios “*What if?*” por juicio experto.

- El primer escenario supone la desaparición del 70% de las defunciones. Esta disminución de la mortalidad se aplica a la edad 50-59 en enfermedades del sistema circulatorio y a la edad 40-49 para las defunciones causadas por tumores. Estas nuevas estimaciones permanecerían dentro del intervalo de confianza.
- Sin embargo, el segundo escenario sí supondría que la disminución de la mortalidad haga que las predicciones al 99,5% no sean suficientes. Bajo este supuesto se espera que las defunciones por enfermedades del sistema circulatorio disminuyan un 95% y por tumores un 85%, para las edades 50-59 en ambos casos.

Para concluir con este trabajo, hemos querido comprobar que la proyección del total de la tasa de mortalidad es menor que la suma de las proyecciones de las causas. Esto nos lleva a la conclusión de la existencia de una correlación entre las causas. Por último, hemos obtenido una función por medio de la cual podemos aproximar la tasa total como un porcentaje de la tasa suma. Este porcentaje lo aminoramos con el paso del tiempo con un coeficiente de reducción, que irá aumentando con el horizonte temporal.

## 9. ANEXO: RESULTADOS ENCUESTA JUICIO EXPERTO

### TUMORES

#### P.1 ¿Crees que es posible que los tumores, como principal causa de fallecimiento en España, desaparezcan?

Sí, entre el 80% y el 60%

Sí, entre el 80% y el 60%

No

Sí, entre el 80% y el 60%

Sí, entre el 80% y el 60%

No

No

Sí, entre el 80% y el 60%

No

Sí, entre el 80% y el 60%

Sí, entre el 80% y el 60%

No

Sí, entre el 80% y el 60%

Sí, entre el 90% y el 80%

Sí, entre el 80% y el 60%

Sí, entre el 80% y el 60%

No

#### P.2 ¿Para qué edades?

Entre 10 y 19 años, Entre 20 y 29 años, Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años

Entre 0 y 9 años, Entre 10 y 19 años, Entre 20 y 29 años, Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años

Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años

Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años, Entre 70 y 79 años

Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años

-

-

Entre 50 y 59 años

-

Entre 70 y 79 años

Entre 60 y 69 años

Entre 0 y 9 años

Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años, Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años

Entre 50 y 59 años

Entre 0 y 9 años, Entre 10 y 19 años, Entre 20 y 29 años, Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años, Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años



Entre 0 y 9 años, Entre 10 y 19 años, Entre 20 y 29 años, Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años, Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años

-

### **P.3 ¿En cuánto tiempo crees que es posible?**

En los próximos 15 años

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximos 15 años

En los próximos 15 años

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximos 10 años

En los próximos 15 años

En los próximos 15 años

En los próximos 15 años

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximo 20 años o en adelante

-

### **P.4 Por favor, justifique la causa por la que estima que se producirá esa reducción**

Mayor revisión de la población con factores de riesgo, mejorarían el pronóstico del cáncer si este es diagnosticado en etapas tempranas.

Aumento de la investigación en este campo y descubrimientos de los mecanismos implicados en el cáncer, así como su tratamiento

Screening de pacientes en edad de riesgo

La investigación, aunque constante, no está siendo muy fructífera

Mis opciones contestadas no son las que pienso realmente, me parece una difícil muy pregunta y no sé contestar con estas opciones. Creo que los tumores tienen un porcentaje muy elevado de causa no controlable. Si bien podemos reducir la incidencia de cánceres evitables como el de cuello de útero, considero que hay otros que son naturales y van a seguir ocurriendo, y puesto que la esperanza de vida es elevada en España, cada vez cobra más peso la muerte por cáncer en ancianos. He contestado que sí porque creo que puede dejar de ser la causa principal de muerte si se consigue una buena terapia contra ellos, o si aumentan las muertes por otras causas como infarto u otras causas relacionadas con la pandemia que supone a día de hoy la obesidad y el síndrome metabólico

-

Creo que no es posible porque se trata de enfermedades multifactoriales en las que la nunca se conocen todos los factores

Por un mejor cribado y una detección precoz pudiendo tener más posibilidades de tratamiento

Avances científicos

Por mejoras en la certificación de la muerte y la determinación de sus causas y posiblemente por avances médicos que también consigan disminuir la mortalidad por cáncer.

-

Los avances médicos

Por las nuevas terapias biológicas

Porque cada vez se descubrirán más diana terapéuticas y dispondremos de un mayor abanico de recursos farmacológicos para combatir los principales tumores

Por los avances en la investigación

Los avances en los tratamientos quimioterápicos dirigidos e individualizados en función de la farmacogenética...

No se reducirán

## **ENFERMEDADES DEL SISTEMA CIRCULATORIO**

### **P.5 ¿Crees que es posible que las enfermedades del sistema circulatorio, como principal causa de fallecimiento en España, desaparezcan?**

Sí, entre el 80% y el 60%

Sí, entre el 90% y el 80%

Sí, entre el 90% y el 80%

Sí, entre el 90% y el 80%

No

No

Sí, entre el 80% y el 60%

No

No

No

No

Sí, entre el 80% y el 60%

Sí, entre el 90% y el 80%

Sí, entre el 100% y el 90%

Sí, entre el 90% y el 80%

Sí, entre el 80% y el 60%

No

### **P.6 ¿Para qué edades?**

Entre 20 y 29 años, Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años, Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años

Entre 40 y 49 años, Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años, Entre 70 y 79 años, Entre 80 y 89 años, Más de 90 años

Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años, Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años, Entre 70 y 79 años

Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años, Entre 70 y 79 años, Entre 80 y 89 años

Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años, Entre 50 y 59 años

-

-

Entre 70 y 79 años

Entre 0 y 9 años

Entre 40 y 49 años, Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años

Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años

Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años, Entre 70 y 79 años

Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años, Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años

Entre 0 y 9 años, Entre 10 y 19 años, Entre 20 y 29 años, Entre 30 y 39 años, Entre 40 y 49 años,

Entre 50 y 59 años, Entre 60 y 69 años

-

### **P.7 ¿En cuánto tiempo crees que es posible?**

En los próximos 10 años

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximos 15 años

En los próximos 10 años

-

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximo 20 años o en adelante

-

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximo 20 años o en adelante

En los próximos 10 años

En los próximo 5 años

En los próximos 10 años

En los próximos 10 años

En los próximos 10 años

-

### **P.8 Por favor, justifique la causa por la que estima que se producirá esa reducción**

-

Cambios en los hábitos de vida de las personas mediante educación

Fomentando la buena alimentación, mejorando fármacos como anticonceptivos orales y promoviendo la actividad física

Con una debida concienciación, se deberían eliminar los factores de riesgo que provocan la enfermedad

No lo veo posible en un futuro cercano porque el abuso de la carne en la dieta hace que todo el mundo tenga placas de ateroma y por tanto esta causa seguirá siendo la principal causa de muerte muchos años. Habría que luchar con herramientas sociales, no sanitarias

-

Por los programas de prevención primaria y prevención secundaria (ejercicio, dieta, abandono de tabaco, alcohol...)

-

Mejora en los estilos de vida

-

-

La mejoras en la calidad de vida

Por la conciencia social

La mejor forma de prevenir la enfermedad coronaria es mantener una salud cardiovascular adecuada, controlando la dieta y el ejercicio físico así como evitando el tabaco. La sociedad está cada vez más concienciada de este hecho lo que, en unos años, pienso que podría reducir considerablemente la mortalidad.

Por la prevención de factores de riesgo

Los avances en la detección temprana, en farmacoterapia, y en el desarrollo de la cardiología intervencionista

No se reducirán

## **POSIBLES FUTURAS CAUSAS DE DEFUNCIÓN**

### **P.9 ¿Crees que existe la posibilidad de que aparezcan nuevas causas de fallecimiento en los próximos años? (Un ejemplo sería la resistencia a los antivirales)**

-

Resistencia a antimicrobianos, enfermedades relacionada con la adicción a las tecnologías

Si, intoxicaciones y suicidios

Neurodegenerativas

Sí

-

También la resistencia a antibacterianos, intoxicaciones por productos empleados en la industria alimentaria

Pluripatologías

Si

No lo sé. Quizás nuevas epidemias, resistencia bacteriana y viral, enfermedades priónicas...

Incremento incidencia DM2

La resistencia a antibióticos

Sí, por ejemplo enfermedades respiratorias asociadas a la contaminación atmosférica

Sí, una de ellas la del ejemplo. También creo que en unos años podrían surgir nuevas enfermedades como consecuencia de los efectos nocivos de la contaminación ambiental.

Si, el ejemplo que se expone de la resistencia a los antivirales me parece que es muy probable que ocurra, y también me parece posible que se acentúen los problemas respiratorios como causa, dada la contaminación creciente.

Sí, fundamentalmente la resistencia a antimicrobianos y tuberculostáticos, o la aparición de nuevas cepas virales contra las que no haya tiempo de desarrollar terapias.

Sí

### **P.10 ¿Cuál sería el impacto de esa causa en términos de aumento de mortalidad?**

-

La resistencia a antimicrobianos podría aumentar la mortalidad muchísimo

No muy grande

Aumentaría los porcentajes de fallecimiento por esta causa, derivando varias líneas de investigación hacia ella

si fuera resistencia a antivirales el impacto sería enorme en el mundo desarrollado, no sé cómo cuantificarlo

-

-

60-70%

En principio poco aumento

No sabría contestar.

Brutal

Muy alta

Alto

No sabría responder con exactitud, quizás no se vería reflejado en un gran aumento de la mortalidad pero sí de la morbilidad.

Significativa, sobre todo la resistencia a antivirales

Es impredecible

No se puede saber aún

## 10.BIBLIOGRAFÍA

- Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE)*. (2017). Obtenido de Organización Mundial de la Salud: [https://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3561%3A2010-clasificacion-internacional-enfermedades-cie&catid=511%3Ahealth-information-analysis&Itemid=2560&lang=es](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=3561%3A2010-clasificacion-internacional-enfermedades-cie&catid=511%3Ahealth-information-analysis&Itemid=2560&lang=es)
- Debón Aucejo, A., Martínez Ruiz, F., & Montes Suay, F. (2017). Modelo Lee-Carter extendido. *XV Jornada de ASEPUMA y III Encuentro Internacional*.
- EDCM. (2016). *Defunciones según la Causa de Muerte - Año 2016*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: [www.ine.es/prensa/prensa.htm](http://www.ine.es/prensa/prensa.htm)
- EDCM. (2016). *Defunciones según la Causa de Muerte - Año 2016*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: [www.ine.es/prensa/prensa.htm](http://www.ine.es/prensa/prensa.htm)
- FarmaIndustria. (2018). *Medicamentos Innovadores: Historia de una Revolución*. Obtenido de <http://www.farmaindustria.es/web/reportaje/medicamentos-innovadores-historia-una-revolucion/>
- Giordano, G., Haberman, S., & Russolillo, M. (Mayo de 2018). Three-Way Data Analysis Applied to Cause Specific Mortality Trends. *Demography and Health Issues*, 121-130.
- Goerlich Gisbert, F. J. (2007). ¿Cuántos somos?: una excursión por las estadísticas demográficas del Instituto Nacional de Estadística (INE). *Boletín de la Asociación de Geógrafos españoles*(45), 123-156.
- Grupo Bioactuarial de Investigación. (2016). *Gestión Integral de Riesgos de Enfermedades Graves y Crónicas*.
- INE, D. (2018). *Defunciones según causa de muerte*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: <http://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=7947>
- INE, P. (2018). *Principales series de población desde 1998*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: <http://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t20/e245/p08/10/&file=02002.px&L=0>
- Lee, R. D., & Carter, L. R. (1992). Modeling and Forecasting U.S. Mortality. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 87, No. 419, 659-671.

- Rodríguez-Pardo del Castillo, J. M., & López Farré, A. (2017). *Longevidad y envejecimiento en el tercer milenio: nuevas perspectivas*. Madrid: Fundación MAPFRE.
- Rodríguez-Pardo, J. M., Albarrán Lozano, I., Ariza Rodríguez, F., Cóbrecas Juárez, V. M., & Durbán Reguera, M. L. (2014). *El riesgo de longevidad y su aplicación práctica en Solvencia II*. VII Premio Internacional de seguros Julio Castelo Matrán. Fundación MAPFRE.
- Rodríguez-Pardo, J. M. (2011). El Riesgo de la longevidad en las personas centenarias. *Gerencia de Riesgos y Seguros No. 111. Fundación MAPFRE*, 26-39.
- Tabeau, E., Ekamper, P., Huisman, C., & Bosch, A. (1999). Improving overall mortality forecasts by analysing cause-of-death, period and cohort effects in trends. *European Journal of Population/Revue européenne de Démographie*, 15(2), 153-183.
- Weber. (2018). *El valor del medicamento desde una perspectiva social*. Madrid: Fundación Weber.
- Zalbidegoitia, A. B. (2010). Un análisis sobre las posibilidades de predicción de la mortalidad futura aplicando el modelo Lee-Carter. *Anales del Instituto de Actuarios Españoles*(16), 111-140.