

**PREPUBLICACIONES DEL DEPARTAMENTO
DE MATEMÁTICA APLICADA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
MA-UCM 2011-15**

**Diseño de un modelo económico
y de planes de control para una
epidemia de peste porcina clásica**

E. Fernández Carrión, B. Ivorra, A. M. Ramos,
B. Martínez-López, Sánchez-Vizcaíno.

Septiembre-2011

<http://www.mat.ucm.es/deptos/ma>
e-mail:matemática_aplicada@mat.ucm.es

Diseño de un modelo económico y de planes de control para una epidemia de peste porcina clásica.

Eduardo Fernández Carrión¹, Benjamin Ivorra¹,
Angel Manuel Ramos¹, Beatriz Martínez-López²,
Sánchez-Vizcaíno²

¹ Departamento de Matemática Aplicada,
Universidad Complutense de Madrid.

² Departamento de Sanidad Animal, Facultad de Veterinaria,
Universidad Complutense de Madrid.

Abstract

Classical Swine Fever (CSF) is one of the most harmful diseases for the economy of the pig sector in Europe and worldwide [9]. A typical example is Spain, where we had two historic epidemics in 1997/98 and 2001/02, amounting to almost 110 million euros in losses for employers and administration, which led in many cases to bankruptcy of companies. Spain is not the only country affected: in Europe countries such as Germany (1994-2007), Holland (1997-98), Belgium (1997) or UK (2000) have also been affected over the last century by the same disease and even higher economic losses.

This paper focuses on two main issues. On the one hand, a study as a part of the economic structure of the pig industry in Spain will be conducted. The purpose of this study will be the elaboration of a classification of the cost of an epidemic of CSF and the implementation in an established simulation model for epidemics as well as the analysis of the results obtained in the execution of various simulations. On the other hand, new ideas that do focus on the reduction of the health impact, but also consider the minimization of the extra costs incurred according to existing economic model.

The realization of the following work relied on various results and publications on models of the spread of epidemics of CSF in economic analysis and risk analysis [1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14]. These pathways have been very useful information for design and for comparison of the results. Several ideas have been taking into account in our model, such as the classification of losses proposed by some authors (H.S. Horst [6], H.W. Saatkamp [8]). However, the investigation of economic parameters which are not available in the literature and hard to access was also necessary. Finally, the analysis of the results obtained in the two sources of study is presented and conclusions are drawn which may be useful for novel approaches in further research.

Keywords: classical, swine, fever, CSF, economy, risks, modeling, simulation, control, Be-FAST, losses, impact, stochastic.

Resumen

La Peste Porcina Clásica (PPC) es una de las enfermedades que más daño causan a la economía del sector porcino en Europa y en el resto del mundo [9]. Un ejemplo claro es España, donde contamos con dos epidemias históricas, en 1997/98 y 2001/02, que supusieron casi 110 millones de euros en pérdidas entre empresarios y la Administración, alcanzando en muchos casos, la bancarrota de empresas. No es el único país afectado, pues ya en Europa, países como Alemania (1994-2007), Holanda (1997-98), Bélgica (1997) o Reino Unido (2000) también se han visto afectados a lo largo de este último siglo por la misma enfermedad y con pérdidas económicas incluso superiores.

El objetivo del presente documento tiene una doble intención. Por una parte se mostrará un estudio sobre una parte de la estructura económica de la industria porcina en España. El fin de este estudio será la elaboración de una clasificación gastos que supondría una epidemia de PPC, su implantación en un modelo de simulación de epidemias y el análisis de los resultados obtenidos en la ejecución de distintas simulaciones. Por otra parte, se incorporarán nuevas ideas que traten reducir el impacto sanitario de una epidemia, pero también que minimice los gastos suplementarios que generen de acuerdo al modelo económico una vez desarrollado.

Durante la realización del siguiente trabajo nos hemos apoyado en diversos resultados y publicaciones sobre modelos de propagación de epidemias de PPC, en análisis económicos y en análisis de riesgos [1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14]. Estas vías de información han sido muy útiles para el diseño y en la comparación con los resultados obtenidos. Además se han adaptado muchas de las ideas propuestas por algunos autores como la clasificación de pérdidas (H.S. Horst [6], H.W. Saatkamp [8]). No obstante, ha sido también necesaria la investigación de parámetros económicos fuera de cualquier publicación y de difícil acceso.

Para finalizar el documento, se muestra el análisis de los resultados obtenidos en las dos fuentes de estudio y las conclusiones deducidas de éstos que puedan ser de utilidad para nuevos enfoques en estudio posteriores.

Palabras clave: peste, porcina, clásica, PPC, economía, riesgos, modelización, simulación, control, Be-FAST, pérdidas, impacto, estocástico.

Índice general

1. Introducción	4
1.1. La Peste Porcina Clásica	4
1.2. Medidas de control	5
1.3. El modelo Be-FAST	6
2. Modelo económico	9
2.1. Introducción	9
2.2. Costes indirectos	10
2.3. Costes a pagar	13
2.4. Costes transferidos	14
2.5. Costes calculados	14
2.6. Parámetros	15
3. Medidas de control	19
3.1. Medidas de control del modelo Be-FAST	19
3.2. Detección Preventiva de Granjas Infecladas	21
4. Resultados	22
4.1. Resultados del modelo económico	22
4.2. Resultados de la Detección Preventiva de Granjas Infecladas	27
5. Conclusiones	29

Capítulo 1

Introducción

1.1. La Peste Porcina Clásica

La Peste Porcina Clásica (PPC) es una enfermedad altamente contagiosa que afecta a jabalíes, cerdos salvajes y cerdos domésticos de todas las edades. Es causada por un virus de la familia Flaviviridae, género Pestivirus, y se caracteriza por originar lesiones de carácter hemorrágico y de curso generalmente fatal. Debido al impacto económico y sanitario que causa, es considerada como una de las enfermedades que más daños ocasiona en la industria porcina mundial [9]. Por todo ello, la UE clasifica esta enfermedad dentro de la Lista A de enfermedades de declaración obligatoria y dentro de la Lista de enfermedades de la OIE (Organización Mundial de Sanidad Animal: www.oie.int).

El virus se descubrió en EEUU en 1833 y en Europa se reconoció por primera vez en Inglaterra en 1862. Sin embargo, hasta 1875 no se detectó antes en España. A día de hoy, el virus aún puede encontrarse en amplias zonas de Centroamérica, Sudamérica, África, Asia y Europa. La enfermedad se encuentra actualmente arraigada de forma endémica en muchos países del mundo y Europa. Por otra parte, hay países, como Canadá, EEUU y Australia, en los que la enfermedad se ha erradicado completamente alcanzando un estatus de país libre de PPC (*CSF-free*). En los últimos años se han localizado brotes de esta enfermedad en casi todos los países de la UE como Alemania (1993-2000), Holanda (1997), Bélgica (1990, 1993, 1994) o Italia (1995-1997). En la Tabla 1 se muestra un resumen de los brotes registrados en Europa en los últimos años, tomando por brote a una granja donde se ha hallado algún animal infectado por la PPC.

País	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Serbia y Montenegro	73	62	69	172	128	52	44	110	146	54				
Ucrania					2									
Suiza		47	26											
Rusia	10	11	14	16	14	9	6	4	8	2	7	1	4	12
Rumanía					1	52	155	182	243	246	78			
Reino Unido				16										
Países Bajos	424	5												
Luxemburgo					7	77	5							
Italia	55	18	9	3	5			1						
Francia						9	13	7	1		1			
España	78	21			33	16								
Eslovaquia	97	90	14	21	40	48	37	12	4	5		3		
República Checa	21	13												
Croacia	10		2						7	42	2			
Bulgaria	8	8	4	1	1	32	11	4	5	2	1	1	3	
Bosnia-Herzegovina	43		5	1	52	90	84	23	21	10	12			
Bélgica	8					1								
Austria					1									
Alemania	44	11	415	174	378	451	38	3						

Tabla 1. Brotes de PPC en Europa 1996-2010 (Base de datos de la OIE).

Cada epidemia registrada de esta enfermedad ha dejado consecuencias graves que podemos resumir en algunas cifras representativas en la Tabla 2. Cada uno de los casos que podemos apreciar no está exento de particularidades. Por ejemplo, el caso holandés representa el más desastroso de todos los sucedidos en Europa y demuestra que las medidas de control aplicadas no fueron suficientes. En España, los últimos episodios importantes de la enfermedad su produjeron durante los años 1997 y 1998, afectando a las provincias de Segovia, Sevilla, Zaragoza y Lérida, y nuevamente en los años 2001 y 2002 en Lérida, Castellón, Valencia, Cuenca y Barcelona. En la Tabla 2 podemos apreciar los primeros parámetros económicos de epidemias registradas.

País	Año	Brotes	Duración (meses)	Animales sacrificados	Pérdidas (mill€)
Bélgica	1990	113	10		208,7
Bélgica	1993	7	4		24,5
Bélgica	1994	45	8		49
Bélgica	1997	8	2		10,9
Holanda	1997	14	429	7 mill	2313,4
España	1997	99	16	609.147	60
España	2001	48	11	378.407	48

Tabla 2. Costes históricos de epidemias en Europa [7, 8].

1.2. Medidas de control

Como hemos mencionado anteriormente, el virus de la PPC está dentro de la lista A de enfermedades de declaración obligatoria de la OIE. Esto la clasifica como una de las más potentes debido a su poder de difusión y a su impacto destructivo tanto a nivel sanitario como económico internacionalmente. Ante la aparición de cualquiera de estas enfermedades en cualquier punto del territorio europeo, es obligatorio seguir las directrices que marca la OIE y, también

en nuestro caso, el Ministerio de agricultura, pesca y alimentación de España (MARM). Estas medidas de control se resumen en (véase [5])

- Sacrificio inmediato de todos los cerdos que se encuentren en la explotación infectada y destrucción de los cadáveres.
- Movimientos controlados, en las áreas declaradas, de los cerdos y de sus productos, purines y todo aquel material relacionado con el manejo de los animales que pudiese estar contaminado para evitar la propagación del virus.
- Estrictas medidas de bioseguridad: desinfección de instalaciones, material y vehículos de transporte que pudiesen estar contaminados.
- Rastreabilidad y vigilancia para determinar la fuente de contagio y las vías de difusión de la enfermedad. Se mantiene un especial interés en el seguimiento de visitas de veterinarios, de vehículos de transporte de animales y de vehículos de transporte de materiales.
- Zonificación, para establecer áreas infectadas y libres de la enfermedad, así como compartimentalización territorial para controlar los movimientos de vehículos que puedan suponer un riesgo para la transmisión de la enfermedad. Además se realizará una vigilancia a las granjas de la zona infectada.
- Vacunación en aquellos casos que se requiera debido a la situación epidemiológica, densidad de población, etc.

Queda claro que el objetivo de estas medidas es controlar la expansión de la enfermedad y su erradicación. En el presente documento, no sólo realizaremos un estudio de las consecuencias económicas trabajando con estas medidas de control, sino que también propondremos nuevas medidas rentables desde el punto de vista monetario y que permitan reducir la expansión del virus.

1.3. El modelo Be-FAST

En adelante nos proponemos a explicar brevemente el modelo de difusión sobre el cuál incorporaremos el modelo económico. Este modelo luego lo describiremos en la sección 2.

Para nuestras simulaciones utilizamos un modelo estocástico denominado Be-FAST (*Between-Farm-Animal Spatial Transmission*). El modelo, en particular, ha sido desarrollado por el Grupo MOMAT (www.mat.ucm.es/momat, [1, 2, 3]) de la UCM para evaluar la propagación de la peste porcina clásica diariamente dentro de una granja (*within-farm*), mediante el uso de un submodelo de tipo SI (*Suceptible-Infected*), y entre varias granjas de la misma región (*between-farm*), mediante el uso de un submodelo de tipo *Individual-Based*. Be-FAST ha sido implementado en MatLab y se basa en un método de Monte Carlo a través de un modelo espacial de tipo estocástico que genera $m \in \mathbb{N}$ escenarios

de posibles epidemias. Es también importante destacar que, en este modelo, la población infectada queda dividida en varios estados distintos: Infectados (E), que son los que están infectados por la enfermedad, pero no pueden contagiarla todavía; Infecciosos (I), que además de estar infectados pueden contagiar a otros cerdos susceptibles; y, Síntomas clínicos (C) son aquellos que han desarrollado la enfermedad hasta tal punto que sus síntomas son claramente observables. Los parámetros básicos del modelo son fijados por el usuario al comienzo del programa. Además, las medidas de control, presentadas en la sección 1.2 y en el capítulo 3, también implementadas, se pueden activar / desactivar en el inicio de la simulación y servirán de ayuda para cuantificar la eficacia para reducir la magnitud y duración de la epidemia.

Más precisamente, al comienzo de cada escenario (es decir, en el tiempo $t = 0$), denotado por $m = 1, 2, \dots, M$, todas las granjas se encuentran en estado susceptible (es decir, los cerdos están libres de peste porcina clásica), excepto una seleccionada al azar, que se supone que tiene un cerdo infectado y se clasifica como infectada. Durante un intervalo de tiempo $[0, T]$, siendo $T \in \mathbb{N}$ el número de días máximos de simulación, se realiza la propagación dentro de la granja (*within-farm*) y entre granjas (*between-farm*), (véase [2]). Además, se realiza diariamente durante la simulación un proceso de detección por las Autoridades, que permitirá detectar la enfermedad en las granjas contaminadas. Si al final de un día se comprueba que la epidemia se ha finalizado, el proceso acabará y dará paso a la siguiente simulación. A continuación mostramos en la Figura 1 un diagrama que muestra el cuerpo del programa. Además podremos ver cuál será nuestra aportación al diseño: nuevas medidas de control y evaluación de pérdidas.

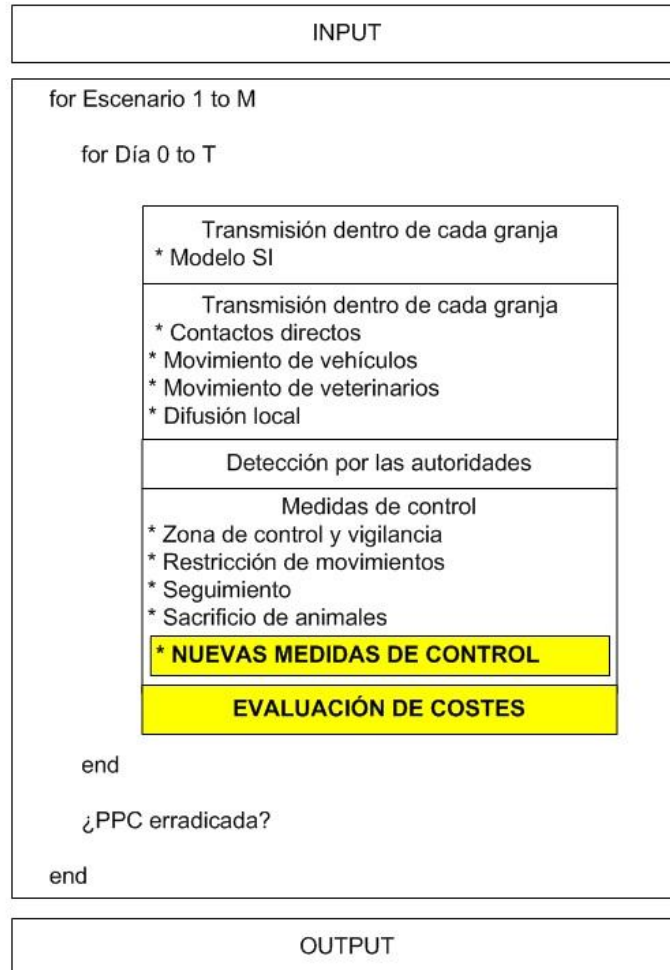


Fig. 1. Estructura del modelo presentado en la Sección 1.3 [2]

Capítulo 2

Modelo económico

2.1. Introducción

Anteriormente hemos comentado superficialmente las pérdidas económicas que supone un brote de PPC. Nos hemos basado en los hechos históricos sucedidos, sobretodo, en Europa a lo largo de las dos últimas décadas. Desde entonces, algunos artículos de carácter científico han tratado de clasificar los diferentes tipos de costes. Por nuestra parte, vamos a considerar los tipos de costes propuestos por H.W. Saatkamp, P.B.M. Berentsen y H.S. Horst [8]. Que son:

- **Costes indirectos**
Son los causados al sector por el efecto de la devaluación del precio del animal en el mercado porcino. Se detallan en la sección 2.2.
- **Costes directos**
Los podemos categorizar en tres tipos:
 - **Costes a pagar (C_p)**
Son los costes pagados directamente por las autoridades para controlar y erradicar la epidemia. Se detallan en la sección 2.3.
 - **Costes transferidos (C_t)**
Son los costes pagados por las autoridades con el fin de compensar las pérdidas de terceros (granjeros, empresas integradoras, aseguradoras o veterinarios). Se detallan en la sección 2.4.
 - **Costes calculados (C_c)**
Son las pérdidas producidas en las empresas del sector porcino hasta la normalización tras la erradicación de la epidemia. Se detallan en la sección 2.5.

2.2. Costes indirectos

Desde que el brote de PPC es detectado hasta su erradicación, es fácil entender que el mercado de cerdos y sus derivados se ve afectado a la baja, como veremos más adelante. La consecuencia de este hecho, en general, consiste en la pérdida de beneficios esperados por prácticamente todos los implicados en este sector empresarial. Nuestro objetivo será modelizar estas pérdidas, pero para poder entender estos costes, es necesario explicar el funcionamiento de la lonja hoy en día.

Como en prácticamente todos los mercados, el sector porcino cuenta con una bolsa de valores a nivel nacional en la que, según la oferta y demanda, se calcula semanalmente el valor del precio del kilogramo de cerdo (€/kg). No obstante, la bolsa española también puede verse afectada por los mercados internacionales del mismo sector, sobre todo de las bolsas europeas. En España, el organismo oficial que pondera estos valores es Mercolleida (www.mercolleida.com).

Sabemos que en España ha habido dos epidemias importantes de PPC. Contamos con la evolución histórica de la bolsa de precios (€/kg de cerdo) durante la última de estas epidemias, y que se muestra en la Figura 2.

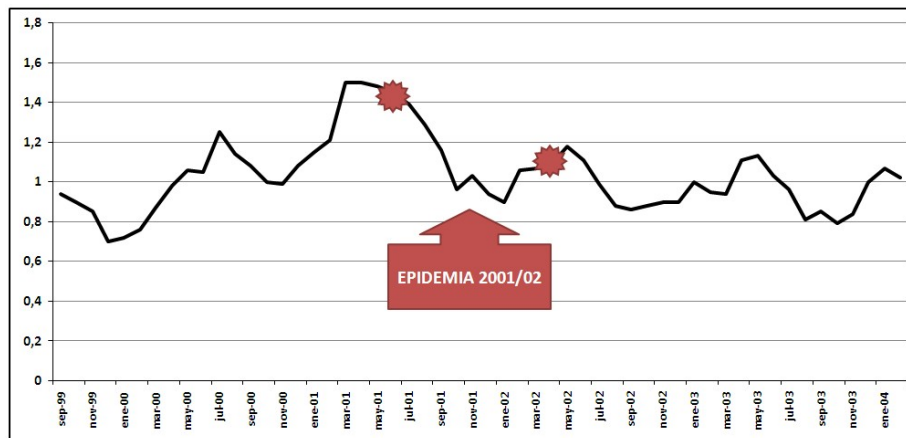


Fig 2. Evolución del precio del cerdo (€/kg) desde Septiembre 1999 hasta Enero 2004, periodo en el que se incluye la epidemia 2001/02 en España (www.mercolleida.com).

En la Figura 2 se ha reducido al intervalo de tiempo que abarca desde los dos años antes de la epidemia hasta los dos después. Gracias a esto, podemos observar que existen unos patrones repetidos anualmente. Se vé que la demanda de cerdo se dispara en los meses de invierno y primavera, mientras que en los meses de verano y otoño alcanza sus niveles más bajos. Sin embargo, también observamos que, durante el año de la epidemia, la caída de este valor es más pronunciada si la comparamos con los años anteriores o posteriores. La epidemia comenzó en Junio de 2001 y duró 11 meses (Mateo del Pozo [7]). Nuestro primer paso es aislar el patrón que existe anualmente en la época de la epidemia. Es decir, trataremos de intuir cómo se habría desarrollado el mercado si no hubiese existido tal epidemia. Para ello, hemos creado un índice económico

(*benchmark*) que compara los resultados históricos con los de la epidemia. En la Tabla 3 hemos registrado en la primera columna la devaluación del precio del cerdo Epi_t (€/kg de cerdo) durante el tiempo que duró la epidemia del 2001/02 en España, $t = 44$ semanas. En la segunda columna, se ha realizado una media de los valores esperados, durante la misma época del año, teniendo en cuenta tan sólo los dos años anteriores y los dos posteriores Ind_t (€/kg de cerdo). Ahora bien, para modelizar cómo se ha devaluado o incrementado el precio del cerdo, en relación a la semana anterior, utilizamos los valores $E_t = \frac{Epi_t}{Epi_{t-1}}$ e $I_t = \frac{Ind_t}{Ind_{t-1}}$ que se muestran en las columnas tres y cuatro, respectivamente.

t	Epi_t	Ind_t	E_t	I_t	t	Epi_t	Ind_t	E_t	I_t
1	1,45	1,18	-	-	23	0,98	0,91	0,99	1,01
2	1,40	1,18	0,97	1,00	24	0,96	0,91	0,98	1,00
3	1,37	1,18	0,98	1,01	25	0,94	0,91	0,98	0,99
4	1,39	1,17	1,01	0,99	26	0,95	0,92	1,01	1,01
5	1,39	1,14	1,00	0,97	27	0,95	0,92	1,00	1,00
6	1,35	1,09	0,97	0,95	28	0,93	0,93	0,98	1,02
7	1,31	1,09	0,97	1,00	29	0,90	0,94	0,97	1,02
8	1,29	1,07	0,98	0,98	30	0,93	0,98	1,03	1,03
9	1,29	1,06	1,00	0,99	31	0,95	1,02	1,02	1,05
10	1,26	1,05	0,98	0,99	32	1,00	1,07	1,05	1,05
11	1,21	1,02	0,96	0,97	33	1,06	1,11	1,06	1,04
12	1,21	1,01	1,00	0,99	34	1,08	1,14	1,02	1,03
13	1,16	0,97	0,96	0,96	35	1,08	1,16	1,00	1,01
14	1,12	0,94	0,97	0,97	36	1,11	1,15	1,03	0,99
15	1,08	0,91	0,96	0,97	37	1,07	1,13	0,96	0,98
16	1,01	0,88	0,94	0,97	38	1,06	1,10	0,99	0,98
17	0,96	0,86	0,95	0,98	39	1,07	1,11	1,01	1,00
18	0,94	0,86	0,98	1,00	40	1,09	1,11	1,02	1,00
19	0,96	0,88	1,02	1,02	41	1,09	1,12	1,00	1,01
20	1,02	0,90	1,06	1,03	42	1,07	1,12	0,98	1,00
21	1,03	0,91	1,01	1,01	43	1,07	1,13	1,00	1,01
22	0,99	0,90	0,96	0,99	44	1,07	1,15	1,00	1,01

Tabla 3. Valores que toma la epidemia y el índice.

Por lo que, si partimos de un valor inicial del cerdo en la primera semana ($v = 1,45$), tenemos que el progreso en 44 semanas se corresponde con la fórmula recursiva:

$$\begin{aligned} \text{epidemia}_t &= \text{epidemia}_{t-1} * E_t \text{ y,} \\ \text{índice}_t &= \text{índice}_{t-1} * I_t, \forall t > 0. \end{aligned}$$

donde, $\text{epidemia}_0 = \text{índice}_0 = v = 1,45$ (€/kg de cerdo) y que da lugar a los valores que se muestran en la Figura 3.

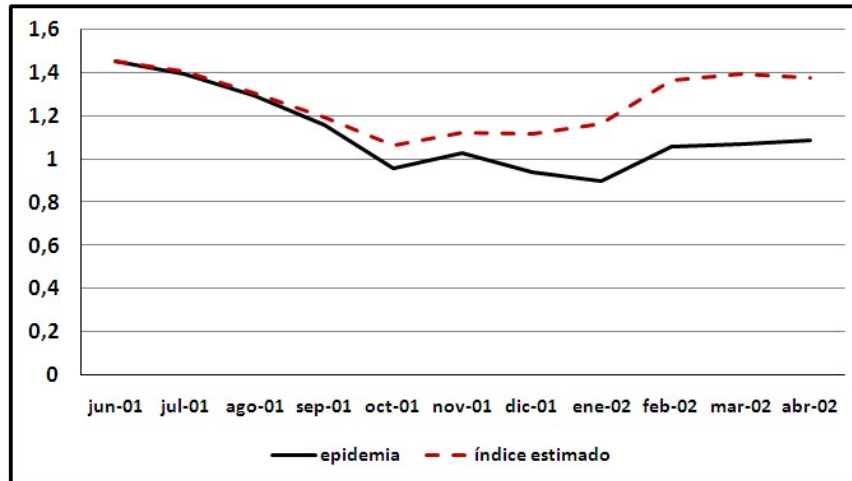


Figura 3. Valores estimados aislando el patrón anual tomando $v = 1,45$ €/kg de cerdo.

Analizando solamente esta porción del gráfico observamos tres partes diferenciadas.

- En una primera fase, los primeros 105 días ($t = 1 - 15$, de junio a septiembre), la distancia entre ambas gráficas es muy corta, casi imperceptible. Realizando un estudio de la volatilidad (desviación típica) de las diferencias entre los valores de $epidemia_t$ e $índice_t$ de la Figura 3, obtenemos un valor muy pequeño: 0,007328. Esto significa que van muy juntas en el gráfico, aunque no son líneas superpuestas. Esta sería una fase de incertidumbre, en la que tanto consumidor como productor no cuentan con que la epidemia sea de larga duración o bien la publicidad del brote no incite a una alarma que provoque una caída fuerte de la demanda. Cabe decir que España ha tenido desde, la epidemia de 1997, brotes muy pequeños de PPC que no alcanzaron nunca nivel de epidemia gracias a las medidas de seguridad establecidas y que, por tanto, es lógico que el mercado no se devalúe rápidamente cada vez que hay un contagio.
- En una segunda fase, los siguientes 203 días ($t = 16 - 29$, hasta principios de enero), observamos un distanciamiento mucho mayor. Durante esta fase, la volatilidad aumenta hasta cinco veces más: 0,037223. Es el intervalo de tiempo de mayor caída de precios en comparación con el índice. Podríamos considerar a la segunda fase como de aceptación, en la que productor y consumidor asumen el hecho de estar en alarma de epidemia de larga duración, y que por tanto, afectaría gravemente a la demanda de productos porcinos.
- Finalmente entraríamos en una fase de recuperación, suponemos que todos los brotes ya han sido localizados y controlados por las autoridades. Esto se valora positivamente en el mercado. El productor y el consumidor, saben

que no tendrán contacto alguno con el virus. Sin embargo, la epidemia se declara erradicada únicamente cuando las granjas infectadas y selladas han pasado la cuarentena. En este periodo aún no se ha declarado el fin de la epidemia, pero sus repercusiones en la bolsa no son muy malas. De hecho, la volatilidad alcanza los niveles de la primera fase, 0,006994; es decir, son más estables.

Prácticamente todos los autores están de acuerdo en que las epidemias de larga duración son las que tienen mayor impacto económico en el mercado [8, 12]. Sin embargo, en las que son de corta duración, el impacto es casi nulo, tal y como ocurriría si no existiese la segunda fase. A pesar de todo, las repercusiones son difíciles de modelizar, pues estas dependen de otros parámetros como la duración de la campaña, la imagen pública, etc. No obstante, nos basamos únicamente en estos resultados históricos para implementarlos en el modelo Be-FAST.

2.3. Costes a pagar

Ante un brote de PPC, las medidas a tomar están definidas en la sección 1.2. Pero para llevarlas a cabo es necesario que existan medios humanos y materiales dispuestos, y que estarán ligados a un gasto económico. El coste de estos medios son los que las autoridades (UE, MARM) tienen que pagar directamente. En nuestro programa, incluimos como costes a pagar:

- Gastos de laboratorio. Son los gastos destinados a la recogida de muestras en las granjas, el envío al laboratorio y los gastos que cubren el análisis de los cultivos así como de los empleados. Los gastos de laboratorio han sido tomados de documentos de publicaciones del Boletín Oficial del Estado (B.O.E) sobre la enfermedad de Aujeszky [9, 10], una enfermedad que ataca al ganado porcino y que tiene similares pruebas en laboratorio. Estas pruebas son llevadas a cabo cuando se realizan tests de seguimiento o sistemas de detección preventiva sobre las granjas con mayor probabilidad de ser contagiadas. Para detectar si esa enfermedad está presente en la granja o no, con un nivel de confianza a fijado de antemano, los test de detección que son realizados sobre las granjas sospechosas requiere de una toma de muestras aleatorias de tamaño $n \in \mathbb{N}$. Para calcular el tamaño de la muestra, nos hemos basado en la siguiente fórmula utilizada habitualmente en los procesos de detección de enfermedades por veterinarios [17]:

$$n = (1 - (1 - a)^{1/D})(N - \frac{D - 1}{2}) \quad (2.1)$$

donde,

- n : Tamaño de la muestra,
- N : Tamaño de la población,

- D : Número de animales enfermos en la piara que esperamos que exista (en nuestro caso tomamos una prevalencia del 10 % de la población),
 - a : Nivel de confianza (en nuestro caso tomamos $a = 95$ %).
- Gastos de establecimiento de una zona de control o de vigilancia. El establecimiento de una zona de control o de vigilancia exige una organización burocrática y de seguridad en la que se restringen movimientos. Para ello, es necesario la movilización de agentes y la coordinación entre ellos.
 - Gastos de limpieza y desinfección de las granjas puestas en cuarentena. Se asumen los costes necesarios para cubrir el coste de los profesionales en limpieza y desinfección, así como de los productos utilizados.

2.4. Costes transferidos

No inmediatamente, las autoridades también deben hacerse cargo indemnizar a los más perjudicados, como son los productores que han perdido las piaras debido al sacrificio. Incluiremos como costes transferidos:

- Indemnización por cerdos sacrificados. Son los costes que mayor impacto económico tienen, pues en realidad, se está destruyendo la materia prima del sector. Por ello, el plan de control de éstas pérdidas es más detallado. En primer lugar, se realiza un censo de los animales sacrificados y del valor que tienen según el tipo de animal. Tras ello, la UE se supone que tendrá que pagar lo más rápido posible estos gastos, pues el productor necesitará el dinero para repoblar la granja y volver a producir cuanto antes (véase [9]).

2.5. Costes calculados

Los costes más difíciles de estimar son los calculados. La mayor parte de todos estos gastos no aparecen en estadísticas ni son recopilados como información útil, sin embargo son pérdidas reales y que habrá que calcular por métodos estadísticos siendo conscientes de que siempre serán valores aproximados. Incluiremos dentro de los costes calculados:

- Eliminación de purines y alimentos contaminados. No sólo son los animales lo que una granja en cuarentena tiene que eliminar. También ha de deshacerse de los bienes y útiles que puedan estar contaminados. De hecho, una de las mayores causas de la infección del virus es el contacto con alimentos contaminados [6]. Y éstos tienen un valor significativo. Hemos considerado que cualquier granja ha de tener almacenado, de media, el alimento para su población durante una semana y ésta dependerá del tipo de población, pues el alimento para cada tipo de ganado puede variar de precio.

- Pérdidas ocasionadas por el bloqueo de granjas y no producción hasta su normalización.
- Pérdidas para las empresas de transporte de ganado.
- Pérdidas para las empresas de transporte de purines y alimentos de ganado.
- Pérdidas ocasionadas al gremio de veterinarios (Asociación de Defensa Sanitaria, ADS). El hecho de no visitar granjas bloqueadas supone una pérdida de ingresos para los veterinarios.

Uno de los parámetros más difíciles de obtener es el de los beneficios que puede llegar a tener una granja o una empresa de transportes diariamente. Dado que son empresas privadas cuyos ingresos y beneficios son de acceso restringido, el cómputo de las pérdidas diarias por la no producción resulta realmente difícil de obtener. No obstante, la forma que hemos utilizado para estimarlas ha sido utilizando algunas de las granjas, industrias o empresas de transportes que sí hacen público dichos datos. A partir de ahí se realizó una ponderación media de pérdidas diarias de cada una de ellas.

2.6. Parámetros

Los parámetros empleados en el modelo económico son los expuestos a continuación en las Tablas 4-10. Los costes, en general, por granja dependen en muchas ocasiones del tamaño que tienen éstas. Hemos considerado para la estimación de todos los parámetros, que el tamaño de una granja se mide en proporción al número de animales que tiene. Por tanto, todos los costes que dependen del tamaño, han sido ponderados por animal.

En la Tabla 4, aparece el desglose de cada tipo de granja existente en Segovia y la indemnización que las Autoridades remuneran en caso de sacrificio. La información ha sido obtenida del B.O.E [9] que establece una valoración media por animal según su raza, que se asemeja bastante a los tipos de granja con los que cuenta el modelo.

Tipo de Explotación	Costes
Centro de inseminación artificial	840,00
Transición de lechones	261,70
Producción de lechones	261,70
Producción de ciclo cerrado	255,85
Producción mixta	255,85
Centro de cuarentena	206,85
Cebo	169,17
Recría de reproductores	169,17
Multiplicación	320,25
Selección	581,00
Matadero	332,15

Tabla 4. Los precios están medidos en €/animal.

En la Tabla 5, para cada tipo de granja existente, mostramos el coste de la alimentación media diaria de cada cerdo. La información ha sido obtenida de una empresa especializada en alimentación porcina :www.alimentosagrobueyca.com. Hemos supuesto que toda granja tiene una reserva de comida para toda la granja de siete días.

Tipo de Explotación	Costes
Centro de inseminación artificial	2,30
Transición de lechones	0,66
Producción de lechones	0,34
Producción de ciclo cerrado	2,30
Producción mixta	2,30
Centro de cuarentena	2,30
Cebo	0,34
Recría de reproductores	1,43
Multiplicación	2,30
Selección	2,30
Matadero	0,00

Tabla 5. Los precios están medidos en €/(día*animal).

En la Tabla 6, los costes de limpieza y desinfección de cada granja en la que se realiza el sacrificio de animales. Hay que tener en cuenta que la limpieza se realiza el primer día de sacrificio y que la desinfección se realiza, al menos, tres veces en todo el ciclo de cuarentena. La información ha sido obtenida teniendo en cuenta los procesos descritos en Mateo del Pozo Vegas [7] y en los consejos y precios de los productos utilizados por la empresa especializada en limpieza y desinfección de granjas, CID Lines, Bioprotexion.

Costes de sacrificio y limpieza	1,53
Costes de desinfección	0,03

Tabla 6. Los precios están medidos en €/(granja*animal).

En la Tabla 7, los costes de cada test realizado a cada animal. Este coste incluye los gastos de laboratorio y de gastos de la empresa dedicada a la recogida de muestras. El valor ha sido obtenido del Programa de control y erradicación de la enfermedad de Aujeszky en España [10] que sigue un proceso idéntico al de la PPC. El número de muestras recogidas en cada granja recordamos al lector que está expuesto en la fórmula 2.1.

Costes de laboratorio	5,8
-----------------------	-----

Tabla 7. Los precios están medidos en €/prueba.

En la tabla 8 se muestran los gastos que supone el establecimiento de una zona de control o vigilancia diaria. Para ello se ha supuesto que por cada granja afectada, al menos tres funcionarios han de estar realizando el control y

seguimiento de la granja para evitar movimientos ilegales que puedan poner en riesgo el proceso de sacrificio y cuarentena de la granja. Así pues se ha realizado una ponderación de salarios que suponen el coste de esta medida.

Costes de control/vigilancia	195
------------------------------	-----

Tabla 8. Los precios están medidos en €/día*granja).

La movilización de vehículos y veterinarios (ADS) a empresas cuyos beneficios provienen del comercio de transporte de animales, materiales y visitas, respectivamente, cuando se establece una zona de control o vigilancia en una granja, así como el hecho de que la granja, durante su cuarentena, no produzca beneficios constituyen una pérdida a considerar. En la Tabla 9, se muestran los valores considerados para el modelo. Esta información ha sido obtenida de diversas fuentes: los beneficios anuales de una granja, www.es.negocius.com; el transporte de ganado, M.A.R. Empresa de transportes de ganado; el transporte de materiales, Trans-Setis S.L. Empresa de transporte de piensos y bienes animales; y el coste de una visita ADS ha sido ponderado con información directa de profesionales.

Pérdidas de no producción	0,25
Pérdidas de transporte de ganado	55,20
Pérdidas de transporte de alimento	130,00
Veterinarios (ADS)	62,50

Tabla 9. Los precios de no producción están medidos en €/(granja*día) y los de transporte y ADS por €/movimiento.

Por último, los costes indirectos han sido calculados según los parámetros de la Tabla 3. Tal y como explicamos en la sección 2.2, el comportamiento de valor del precio del cerdo v en una epidemia se divide en tres etapas o fases que dependen de t (semanas). Nuestro estudio de estos comportamientos ha dado lugar a los valores de la Tabla 10. Más concretamente, los valores de media y desviación típica de las distribuciones de la tabla, se han calculado a partir de los valores de las columnas E_t e I_t de la Tabla 3 en los periodos correspondientes.

Devaluación diaria del índice	Distribución
Fase de incertidumbre (105 días)	Normal(0.981691,0.003140)
Fase de aceptación (203 días)	Normal(1.002901,0.003346)
Fase de recuperación	Normal(1.013347,0.006624)

Devaluación diaria en la epidemia	Distribución
Fase de incertidumbre (105 días)	Normal(0.979325,0.004104)
Fase de aceptación (203 días)	Normal(0.987541,0.013425)
Fase de recuperación	Normal(1.011901,0.009108)

Tabla 10. Distribuciones de E_t e I_t según fases de la epidemia.

Así, durante el tiempo que dura la epidemia, el modelo calcula la diferencia entre los parámetros índice_t y epidemia_t para cada día. Suponiendo que el número medio de cerdos vendidos es 2633,24 € y que el precio medio del cerdo es 258,13 €, entonces las pérdidas que se generan cada semana son:

$$7 * (\text{índice}_t - \text{epidemia}_t) * 258,13 * 2633,24.$$

Capítulo 3

Medidas de control

3.1. Medidas de control del modelo Be-FAST

En la sección 1.2 ya describimos las medidas de control que los organismos oficiales obligan a tomar. Cada una de estas medidas supone un desembolso (necesario) por parte de las autoridades y de empresas privadas. En el modelo Be-FAST están establecidas las siguientes medidas de control que explicaremos brevemente (véase Ivorra [2]):

- **Zona de control:**

Afecta a todas las granjas en un radio inferior a 3 km de cualquier brote establecido. En dicha zona de control, los movimientos entre granjas de animales, veterinarios y camiones integradores son reducidos considerando una distribución Bernoulli con medias 0,95, 0,90 y 0,70, respectivamente, durante 51 días. Además, la probabilidad de detección de una granja infectada en esta zona es

$$0,98 \frac{I_{p,j}(t)}{S_{p,j}(t)+I_{p,j}(t)},$$

siendo $I_{p,j}(t)$ el número de cerdos infectados en la granja j ubicada en la zona de control para el instante $t \in \mathbb{N}$ y, $S_{p,j}(t)$ el número de cerdos susceptibles de la granja j ubicada en la zona de control para el instante $t \in \mathbb{N}$.

- **Zona de vigilancia:**

Afecta a todas las granjas en un radio inferior a 10 km y superior a 3 km de cualquier brote establecido. En dicha zona de vigilancia, los movimientos entre granjas de animales, veterinarios, camiones integradores son reducidos considerando una distribución Bernoulli con medias 0,95, 0,90 y 0,70, respectivamente, durante 40 días. Además, la probabilidad de detección de una granja infectada en esta zona es

$$0,95 \frac{I_{p,j}(t)}{S_{p,j}(t)+I_{p,j}(t)},$$

estando la granja j ubicada en la zona de vigilancia.

■ **Restricción de movimientos:**

A las granjas infectadas por PPC y detectadas por las autoridades se les prohíbe el movimiento de entrada o salida (salvo casos excepcionales) tanto de animales, como de veterinarios o camiones integradores asumiendo una distribución Bernoulli con medias 0,99, 0,80 y 0,95, respectivamente. Además, para reducir el contacto con granjas infectadas, cada vez que se detecta una nueva granja infectada se aplica una restricción general de movimiento a todas las granjas durante 90 días siguiendo una distribución Bernoulli de media 0,40.

■ **Sacrificio de animales:**

El sacrificio en las explotaciones en las que se detecta la enfermedad ocurre después de un período de tiempo generado por la distribución de probabilidad descrita mediante la Tabla 11. El número máximo de granjas sacrificadas por día sigue una distribución Poisson de media 20. La repoblación de la granja se produce después de un periodo posterior a una distribución de Poisson de media 90.

Días	0	1	2	3	4	5	6	7 - 8
Prob.	0,11	0,58	0,2	0,06	0,04	0,004	0,003	0,0015

Tabla 11. Distribución de probabilidad (Prob.) del número de días de espera para sacrificar los animales de una granja.

■ **Seguimiento:**

El objetivo del seguimiento es la identificación de contactos infecciosos que puede haber introducido la PPC en una granja o su propagación a otras granjas. Se incluyen en el seguimiento a todos los posibles contactos que ha tenido (movimiento de animales, veterinarios o vehículos integradores) una granja infectada con otras granjas 60 días antes de la detección. Sin embargo, el rastreo de todos los contactos no siempre es posible. Por lo tanto, la probabilidad de localizar un contacto debido al transporte de animales, veterinarios o transporte integrador se distribuye Bernoulli con medias 0,99, 0,40 y 0,70, respectivamente. Finalmente, la probabilidad de detectar una granja contaminada, mediante un test serológico practicado durante el rastreo, sigue una distribución de Bernoulli de media 0,95.

De acuerdo con el modelo Be-FAST y con el diseño económico realizado y explicado en apartados anteriores, otro de los objetivos del trabajo consiste en incorporar nuevas medidas de control que ayuden a minimizar el impacto de una epidemia de PPC manteniendo un equilibrio con los gastos que supongan. La propuesta de este trabajo es estudiar previamente las granjas con mayor predisposición a ser contagiadas por el virus de PPC.

3.2. Detección Preventiva de Granjas Infectadas

Consideramos granjas con mayor predisposición de ser contagiadas a aquellas que hayan sido las más infectadas en las simulaciones Monte Carlo realizadas con el modelo Be-FAST. Tras ello, esta medida de control realizará un seguimiento de carácter especial a éstas granjas desde el inicio de una epidemia con el objetivo de detectar antes granjas infectadas y, por tanto, evitar la propagación de la enfermedad. Para optimizar los resultados trataremos de determinar cuántas granjas debemos incorporar a este seguimiento, con cuanta frecuencia se les debe realizar el test y para qué tipo de epidemias.

El test de seguimiento realizado sobre estas granjas será idéntico al realizado sobre aquellas que se encuentran bajo la medida de control de seguimiento descrita anteriormente. Los costes de esta medida dependen del número de animales que son controlados frecuentemente (fórmula 2.1). Por tanto, lo que trataremos será de llegar a un equilibrio entre los gastos de laboratorio que lleva la ejecución de la medida y los resultados del impacto de la epidemia. Es decir, jugaremos con los siguientes parámetros que mostramos a continuación para que la epidemia se vea reducida en duración, sacrificios de animales y gastos:

- $N_{prev} \in \mathbb{N}$: Número de granjas con mayor predisposición a ser contagiadas que van a ser puestas en seguimiento.
- $D_{prev} \in \mathbb{N}$: Frecuencia, en días, de realización del test de seguimiento.
- Impacto sanitario de la epidemia. Es decir, crearemos casos en los que la epidemia sea de carácter leve y gradualmente ascienda a carácter más grave. La forma en la que conseguimos estos escenarios en el modelo Be-FAST es suponiendo que el número de granjas iniciales, $F_{prev} \in \mathbb{N}$ en el programa, que son infectadas aleatoriamente cambia; por ejemplo, en el caso más leve $F_{prev} = 1$ y, en alguno más grave, $F_{prev} = 100$.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo procederemos a mostrar los resultados obtenidos al final de distintas simulaciones realizadas con el objetivo de encontrar patrones de comportamiento y distribución de los gastos que supone una epidemia de PPC. Además mostraremos también los resultados obtenidos en simulaciones realizadas con y sin la medida de detección preventiva de granjas infectadas para estudiar la rentabilidad de su puesta en práctica.

4.1. Resultados del modelo económico

Hemos preparado nueve casos de tal manera que el impacto esperado de una epidemia de PPC sea creciente en cuanto a gravedad de pérdidas sanitarias. Para ello hemos ejecutado el modelo Be-FAST con la nueva medida de control preventiva de granjas infectadas con nueve datos distintos (ascendentes) del parámetro F_{prev} definido en la sección 3.2. Más precisamente, $F_{prev} \in \{1, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100\}$, de esta manera, podremos observar el comportamiento de los costes económicos ligados a cada tipo de epidemia. Desde el primer caso hasta el último, la duración de la epidemia, así como la cantidad de granjas infectadas y animales sacrificados, es de orden ascendente. En todas ellas se han activado las medidas de control del modelo Be-FAST, descritas en la sección 3.1. A modo de resumen, en la Tabla 12, se pueden ver los resultados de las simulaciones de los parámetros más destacados ligados a cada caso.

Caso	F_{prev}	Pérdidas totales	Pérdidas directas totales	Pérdidas indirectas totales	Duración de la epidemia (días)
1	1	913.386	553.111	360.274	54,51
2	5	3.187.216	2.342.142	845.074	76,90
3	10	5.186.398	4.432.009	861.642	82,84
4	15	7.417.425	6.539.213	878.211	87,67
5	20	9.343.164	8.354.786	988.377	89,40
6	25	11.107.331	10.101.625	1.005.705	90,32
7	50	20.007.452	18.809.734	1.197.717	91,51
8	75	28.028.997	27.069.293	1.291.794	90,75
9	100	36.555.811	35.169.940	1.385.870	94,69

Caso	Nº granjas infectadas	C_p	C_t	C_c	Devaluación
1	2,42	64.203	426.457	62.450	360.274
2	10,49	221.139	1.849.679	271.323	845.074
3	19,58	381.969	3.529.617	520.422	861.642
4	28,72	535.584	5.233.254	770.374	878.211
5	36,67	657.711	6.712.090	984.984	988.377
6	44,59	769.281	8.135.648	1.196.696	1.005.705
7	82,34	1.191.295	15.364.674	2.253.764	1.197.717
8	119,18	1.430.026	22.367.210	3.272.056	1.291.794
9	156,56	1.563.774	29.324.610	4.281.555	1.385.870

Tabla 12. Desglose de costes (€) para los casos 1-9.

Como era de esperar, a medida que la epidemia es más grave, el coste económico es mayor.

El primer análisis que podemos realizar es la relación entre los costes directos e indirectos. A continuación mostramos la Tabla 13, donde se puede ver la relación en porcentaje existente entre ambos.

Caso	Pérdidas directas totales	Pérdidas indirectas totales	Duración de la epidemia (días)	Nº granjas infectadas	Cerdos sacrificados
1	60,56 %	39,44 %	54,51	2,42	1.897
2	73,49 %	26,51 %	76,90	10,49	8.348
3	83,72 %	16,28 %	82,84	19,58	15.918
4	88,16 %	11,84 %	87,67	28,72	23.577
5	89,42 %	10,58 %	89,40	36,67	30.285
6	90,95 %	9,05 %	90,32	44,59	36.636
7	94,01 %	5,99 %	91,51	82,34	69.382
8	95,45 %	4,55 %	90,75	119,18	100.705
9	96,21 %	3,79 %	94,69	156,56	132.084

Tabla 13. Relación de porcentaje entre costes directos e indirectos.

En resumen, los costes directos son los que asumen mayor cantidad de pérdidas según la epidemia es de mayor gravedad. Si comparamos las Tablas 12 y 13, los costes directos aumentan notoriamente y, a consecuencia, aumentan su porcentaje mientras que el aumento de los costes indirectos tiene una pendiente mucho más baja. Dado el comportamiento de mercado descrito en la sección 2.2, los costes indirectos atienden más a la duración de la epidemia que al número de brotes o sacrificios. Para estudiar la correlación entre devaluación y duración, realizamos un análisis de mínimos cuadrados (Figura 4). Esta regresión no debe tomarse como un resultado del todo fiable, pues convendría estudiar más valores intermedios para potenciar los resultados de las técnicas de Monte Carlo, ya que en el modelo Be-FAST realizamos 1000 iteraciones y, por tanto, el resultado es estable en $\pm 3\%$ [1]. Además hay que tener en cuenta que el comercio de ganado sólo abarca la provincia de Segovia, que no es lo mismo que a nivel nacional. No obstante, la siguiente ecuación puede ser de utilidad para proporcionar información orientativa.

$$\text{Devaluación} = -906,471,171 + 22,374,334 * \text{Duración} \quad (4.1)$$

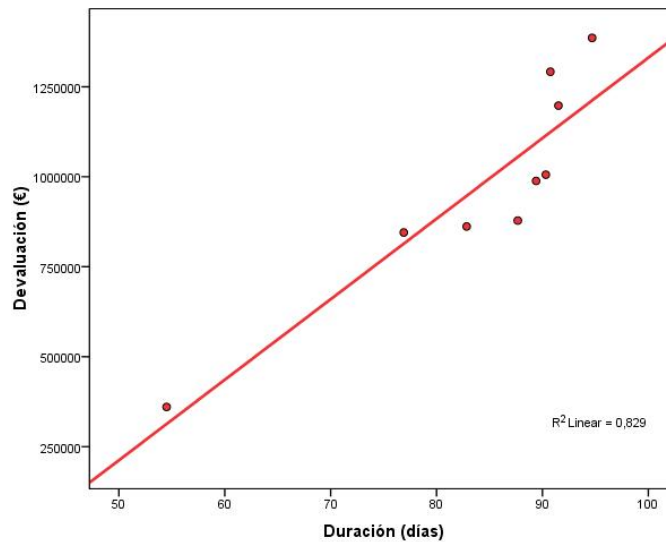


Figura 4. Regresión lineal de la Devaluación (€) respecto la Duración (días) de la epidemia.

Otro análisis que debemos hacer es el relacionado con los gastos directos explicados en la sección 2.3. De forma análoga, mostramos la Tabla 14 donde se muestran los porcentajes de costes a pagar C_p , transferidos C_t y calculados C_c .

Caso	C_p	C_t	C_c	Duración de la epidemia	(Brotos) Nº granjas infectadas
1	11,61 %	77,10 %	11,29 %	54,51	2,42
2	9,44 %	78,97 %	11,58 %	76,90	10,49
3	8,62 %	79,64 %	11,74 %	82,84	19,58
4	8,19 %	80,03 %	11,78 %	87,67	28,72
5	7,87 %	80,34 %	11,79 %	89,40	36,67
6	7,62 %	80,54 %	11,85 %	90,32	44,59
7	6,33 %	81,68 %	11,98 %	91,51	82,34
8	5,28 %	82,63 %	12,09 %	90,75	119,18
9	4,45 %	83,38 %	12,17 %	94,69	156,56

Tabla 14. Relación de costes directos.

Los gastos transferidos (relacionados con las indemnizaciones por animales sacrificados) suponen aproximadamente el 80 % del gasto directo total. Notamos un decrecimiento en la proporción de los gastos a pagar según aumenta la gravedad de la epidemia. Además los costes transferidos y calculados aumentan, esto es debido a que cada vez el número de granjas bloqueadas y sacrificadas es mayor, lo cuál tiene un coste a las empresas que son movilizadas y a las indemnizaciones por sacrificios. Los resultados de un estudio de regresión lineal múltiple da como resultado las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned}
 C_p &= -523,018,802 + 9,707,041 * \text{Duración} + 8,307,842 * \text{Brotos} \\
 C_t &= 305,628,806 - 5,943,735 * \text{Duración} + 189,194,770 * \text{Brotos} \\
 C_c &= -29,666,365 - 609,475 * \text{Duración} + 27,587,601 * \text{Brotos} \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

J.K. Niemi [11] realizó un estudio sobre las pérdidas económicas que supone una epidemia de PPC en Finlandia. Estimó mediante técnicas Monte Carlo las posibles repercusiones que tendría esta enfermedad en distintos casos preparados. Pero Niemi utilizó una técnica distinta para la simulación de costes indirectos: En lugar de trabajar sobre históricos de casos de epidemias (parece lógico dado que la última epidemia de PPC en Finlandia fue en 1917), realizó un trabajo sobre la oferta y la demanda de carne de cerdo en el país. Según este dato, el precio del cerdo en el mercado varía. En sus resultados, presentados en la Tabla 15, distingue dos tipos de epidemias (normal y larga) según el número de brotes o granjas infectadas, y según su estudio de mercado ofrece, las siguientes cifras:

	epidemia normal (1-5 brotes)	epidemia larga (5-33 brotes)
Menor decrecimiento en exportación	1,4	5,4
Medio decrecimiento en exportación	7,5	12,3
Mayor decrecimiento en exportación	13,2	19,2
Costes directos (indep. export.)	0,5	1,6

Tabla 15. Costes J.K. Niemi en mill€.

Nuestro trabajo ofrece un punto de vista distinto al de Niemi en el cálculo de los costes indirectos. El hecho de trabajar con una amplia base de datos sobre la oferta y la demanda de productos porcinos ayuda a predecir el valor del kg de cerdo en el mercado y, para futuras mejoras del presente estudio, las ideas presentadas por Niemi podrían ser positivas. Por otra parte, los costes directos son bastante semejantes. Si tenemos en cuenta los costes en una epidemia normal (0,5 mill€) con los costes directos del caso 1 (553.111 €), resultan bastante parecidos. En una epidemia grave (1,6 mill€) con una media aproximada entre los casos 2, 3 y 4 (4,5 mill€), los resultados varían en casi 3 mill€. Sin embargo, volvemos a hacer hincapié en que Finlandia no es España. Aproximadamente, la media de cerdos por granja en España es de 800 animales, mientras que en Finlandia es de 439 [11], esta diferencia de 361 cerdos es, supuestamente, lo que hace aumentar los costes transferidos en España, que representa, como ya hemos mencionado, un 80 % de los costes directos totales.

Comparamos los resultados que hemos obtenido con los históricos en nuestro país. Esto es, las epidemias de 1997 y el de 2001. Para ello sustituimos los valores de la Tabla 1 con las ecuaciones (4.1) y (4.2). El resultado es el siguiente:

Año	Duración (días)	Brotos	Coste simulado	Coste real [7]
1997	480	99	33,44 mill€	60 mill€
2001	330	49	18,36 mill€	48 mill€

Tabla 16. Resultados históricos en España comparados con los resultados de las fórmulas 4.1 y 4.2

Hay que tener en cuenta que esto es tan solo un estudio previo y hemos tirado a la baja en los costes, justificando de dónde proceden directamente de la fuente (en medida de lo posible). Niemi [11] calcula, por ejemplo, que los gastos administrativos por cada granja son 43.174 € de media. En este trabajo esa cifra está muy lejos de la que hemos supuesto real. Además, hemos de tener en cuenta que en España, tal y como comenta Mateo del Pozo [7], las medidas de control no fueron tomadas estrictamente y causó la propagación innecesaria de la enfermedad. Pero probablemente, los motivos principales por los que nuestros resultados económicos de la Tabla 16 son aproximadamente la mitad de los datos históricos, es que la base de datos que hemos utilizado en las simulaciones numéricas realizadas con el modelo Be-FAST son las del sector porcino en Segovia en 2008, en lugar de las de los años 1997 y 1998. Hay que tener en cuenta que en 2006 el número de granjas en esta misma provincia se redujo a más de la mitad a causa de una crisis en el sector [16]. Si tenemos esto en cuenta, es normal que los resultados que hemos estimado sean aproximadamente la mitad de los reales en la epidemia de 1997/98.

4.2. Resultados de la Detección Preventiva de Granjas Infechadas

Para la optimización de los resultados al activar la nueva medida de control, contamos con tres parámetros nuevos de trabajo. El primero de ellos es cada cuantos días realizamos el testeo D_{prev} , el segundo es el número de granjas que entran en el programa N_{prev} y el tercero es el número de granjas aleatorias infectadas con el que se inicia el modelo F_{prev} , que ya habíamos utilizado para generar los 9 casos que presentamos en la Tabla 12.

Recordemos los casos 1, 7 y 9 de la Tabla 12. Son tres casos de epidemias distintos. El más leve de todos ellos y dos más graves. En la Tabla 17 estos casos se corresponden con los casos 1, 6 y 11 y, los restantes han sido obtenidos mediante manipulaciones de los parámetros D_{prev} y N_{prev} . En concreto, lo que hemos realizado son un total de 15 casos, 5 para cada una de las epidemias, donde $F_{prev} \in \{1, 50, 100\}$, y tomando $D_{prev} \in \{7, 15\}$ y $N_{prev} \in \{25, 100\}$:

Caso	Medidas	F_{prev}	D_{prev}	N_{prev}	Dur. (días)	Nº granj. inf.	Cerdos sacrificados
1	no	1	-	-	54	2,4	1.897
2	si	1	7	25	53	2,2	1.820
3	si	1	7	100	49	1,9	1.686
4	si	1	15	25	52	2,2	1.835
5	si	1	15	100	51	2,1	1.757
6	no	50	-	-	91	82,3	69.382
7	si	50	7	25	86	79,5	67.436
8	si	50	7	100	82	75,3	64.542
9	si	50	15	25	87	80,4	67.462
10	si	50	15	100	84	77,7	66.178
11	no	100	-	-	94	156,5	132.084
12	si	100	7	25	90	149,6	127.501
13	si	100	7	100	83	142,1	121.319
14	si	100	15	25	89	150,7	128.201
15	si	100	15	100	85	146,4	125.078

Caso	Pérdidas directas totales	C_p	C_t	C_c	Porcentaje de granjas detectadas
1	553.111	64.203	426.457	62.450	0,00
2	764.777	313.166	394.183	57.426	0,04
3	1.258.874	829.767	374.410	54.696	0,16
4	631.612	170.918	401.773	58.920	0,05
5	859.092	412.917	388.844	57.330	0,15
6	18.809.734	1.191.295	15.364.674	2.253.764	0,00
7	18.700.693	1.548.453	14.960.951	2.191.287	1,75
8	18.780.358	2.319.261	14.360.689	2.100.407	5,65
9	18.453.590	1.328.001	14.939.209	2.186.379	1,66
10	18.593.198	1.776.123	14.670.057	2.147.017	5,47
11	35.169.940	1.563.774	29.324.610	4.281.555	0,00
12	34.332.103	1.951.996	28.252.145	4.127.961	3,16
13	33.553.902	2.705.820	26.923.141	3.924.941	10,57
14	34.324.591	1.718.626	28.452.540	4.153.424	2,98
15	33.877.706	2.057.143	27.773.737	4.046.825	9,32

Tabla 17. Relación entre costes directos y la nueva medida de control.

Como podemos observar, activar la medida en los casos más leves de la epidemia, consigue mejorar los resultados sanitarios pero no los económicos, por tanto, no parece ser muy óptima para el objetivo que nos planteamos. Sin embargo, en los casos más graves de epidemias, reduce el impacto sanitario pero, además, el económico desciende hasta 1,3 mill€, aproximadamente. Para un estudio más general, se puede realizar una red de valores para F_{prev} , D_{prev} y N_{prev} y encontrar el óptimo según más casos de gravedad de la epidemia.

Capítulo 5

Conclusiones

Durante este trabajo hemos estudiado los principales costes que supone una epidemia de PPC, tanto a nivel teórico como en un caso real. A diferencia de otros estudios similares [6, 8, 11, 12], hemos trabajado con valores reales tomados directamente de las fuentes implicadas, que son los parámetros expuestos en la sección 2.6. Por otro lado, aún podríamos obtener valores más finos que los expuestos. Ello implicaría una dedicación más profunda en el estudio del modelo económico, pero el problema es el acceso a la información, que tratándose de valores económicos, son difíciles de conseguir.

De los resultados expuestos, el parámetro que más hace aumentar el coste de la epidemia es la medida de control del sacrificio. Pero a pesar de tener un valor muy alto, la medida es necesaria. Como ya comentamos en el caso holandés (1997), medidas de control no eficientes pueden llegar al descontrol total de la enfermedad, con consecuencias sanitarias y económicas desastrosas. Como vemos en nuestros resultados, los casos más graves de epidemia porcina, con buenas medidas de control, se solventan en plazos de tiempo relativamente cortos. Para ello basta recordar la Tabla 12 de la sección 4.1, donde la duración de las epidemias cada vez es menor en relación al número de granjas infectadas.

Son varios los autores que trabajan sobre las pérdidas económicas de la PPC incluyendo los costes indirectos o devaluación del mercado porcino [6, 8, 11, 12]. Cada uno de ellos, propone distintas formas de estudio predictivo del valor del kilogramo de carne de cerdo. En general, se basan todos en el estudio según la oferta y demanda del producto a nivel interno además de contar con una base de datos histórica sobre las importaciones y exportaciones del producto. España es muy distinta a Finlandia, Holanda o Dinamarca en este aspecto. España es un país principalmente exportador y el tipo de ganado exportado es muy diferente. Un estudio de este tema puede ayudar a mejorar el patrón que se ha propuesto en este trabajo. El haber realizado un estudio previo de la devaluación del valor del precio del cerdo en el mercado durante un periodo de epidemia ofrece un enfoque distinto a tener en cuenta para futuros trabajos.

Una parte importante del trabajo ha sido también intentar encontrar medidas de control alternativas que puedan reducir el impacto sanitario y económico

de las epidemias de PPC. Lo cierto es que, con la estructura económica ya implantada en el modelo Be-FAST, se simplifica el estudio de nuevas medidas. En concreto, la medida de prevención de granjas más propensas a la infección, ha generado en algunas situaciones resultados positivos. A modo de resumen, la medida resulta ser efectiva cuando se dan ciertas circunstancias: cuando la epidemia es de las más graves, compensa realizar la prueba a un número relativamente grande de granjas, en caso contrario no parece serlo. No sólo se detectan antes las granjas infectadas, sino que además, detiene la propagación de la enfermedad y con la consecuencia directa reducción de impacto sanitario y económico. Con este trabajo hemos tratado de facilitar los futuros estudios en nuevas medidas de control que disminuyan el coste económico de las epidemias. Una vía a seguir puede ser la realización de medidas de sacrificio preventivo en zonas de control [11], la vacunación preventiva [8, 11] o la realización de un estudio alimenticio de los animales de granja, pues suele estar ligado a la propagación de enfermedades [6].

Hay que tener en cuenta que el modelo Be-FAST, sobre el que hemos implantado la estructura económica expuesta en esta memoria, trabaja con una base de datos de Segovia, datos reales proporcionados por la Junta de Castilla y León [2]. Este trabajo realizado es fácilmente extrapolable a otras zonas geográficas, si se cuenta con las bases de datos adecuadas. Segovia es una de las provincias españolas con mayor densidad porcina y, por consiguiente, donde mayor impacto puede tener una epidemia de PPC. El hecho de exportar este modelo a territorio nacional o europeo podría permitir realizar un estudio similar al que H.S. Horst [6] realizó en Holanda, donde divide el territorio según la densidad de granjas, exportaciones e importaciones, dando interesantes resultados de impacto económico. Por otra parte, el modelo también puede ser útil para estudiar otro tipo de enfermedades del ganado, no sólo porcino. La ventaja es que el modo de producción de la industria porcina suele ser muy similar al aviar, al bovino o al vacuno, y las enfermedades que comparten lista A de la OIE con la PPC requieren las mismas medidas de control, por lo que para calcular los costes económicos de alguna de estas enfermedades podría bastar con una adaptación de este trabajo.

Bibliografía

- [1] B. Martínez-López, B. Ivorra, A.M. Ramos, J.M. Sánchez-Vizcaíno, "*A novel spatial and stochastic model to evaluate the within- and between-farm transmission of classical swine fever virus. I. General concepts and description of the model*", *Veterinary Microbiology* 147, 2011.
- [2] B. Ivorra, B. Martínez-López, M. Sánchez-Vizcaíno, A.M. Ramos, "*Modeling and simulation of Classical Swine Fever Virus spread between and within farms*", Enviado a publicar.
- [3] B. Martínez-López, B. Ivorra, D. Ngom, A.M. Ramos y J.M. Sánchez-Vizcaíno, "*A novel spatial and stochastic model to evaluate the within and between farm transmission of classical swine fever virus: II Validation of the model*", Aceptado para publicación en *Veterinary Microbiology*.
- [4] D. de Pereda Sebastián, B. Ivorra, A.M. Ramos, "*Modelización matemática de la difusión de una epidemia de peste porcina entre granjas*", Proyecto fin de Máster en Investigación matemática, 2010.
- [5] MARM, "*Manual práctico de operaciones en la lucha contra la peste porcina clásica*", 2006.
- [6] H.S. Horst, R.B.M. Huirne, A.A. Dijkhuizen, "*Risk and economic consequences of introducing classical swine fever into the Netherlands by feeding swill to swine*", 1999.
- [7] Mateo del Pozo Vegas, "*Estudio del brote de Peste Porcina Clásica ocurrido en Castilla y León en los años 1997-1998*", 2006.
- [8] H.W. Saatkamp, P.B.M. Berentsen, H.S. Horst, "*Economic aspects of the control of classical swine fever outbreaks in the European Union*", *Veterinary Microbiology* 73, 2000.
- [9] B.O.E., "*3002, Orden ARM/293/2011, de 7 de febrero*", Martes 15 de febrero de 2011.
- [10] Secretaría General de Agricultura y Pesca, subdirección general de sanidad animal, MARM, "*Programa de control y erradicación de la enfermedad de Aujeszky en España*", 2004.

- [11] J.K. Niemi, H. Lehtonen, K. Pietola, T. Lyytikäinen, S. Raulo, "*Simulated financial losses of classical swine fever epidemics in the Finnish pig production sector*", Preventive Veterinary Medicine 84, 2008.
- [12] A. Boklund, N. Toft, L. Alban, A. Uttenthal, "*Comparing the epidemiological and economic effects of control strategies against classical swine fever in Denmark*", Preventive Veterinary Medicine 90, 2009.
- [13] S. Karsten, G. Raveb, J. Krieter, "*Monte Carlo simulation of classical swine fever epidemics and control I. General concepts and description of the model*", Veterinary Microbiology 108, 2005.
- [14] J.A. Stegeman, A.R.W. Elbers, A. Bouma, M.C.M. de Jong, "*Rate of inter-herd transmission of classical swine fever virus by different types of contact during the 1997-98 epidemic in The Netherlands*", 2001.
- [15] D. Klinkenberg, J. De Bree, H. Laevens and M. C. M. De Jong, "*Within- and between-pen transmission of Classical Swine Fever Virus: a new method to estimate the basic reproduction ratio from transmission experiments*", 2001.
- [16] Official Journal of the European Union, "*Economical difficulties of Proin-serga enterprise in Segovia*", pigmeat.blog.com, 2010.
- [17] J. Casal i Fàbrega, E. Mateu de Antonio, "*Problemas de epidemiología veterinaria*", Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona, 1999.

**PREPUBLICACIONES DEL DEPARTAMENTO
DE MATEMÁTICA APLICADA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
MA-UCM 2010**

1. CONTINUITY OF DYNAMICAL STRUCTURES FOR NON-AUTONOMOUS EVOLUTION EQUATIONS UNDER SINGULAR PERTURBATIONS, J. Arrieta, A. N. Carvalho, J. Langa and A. Rodríguez-Bernal.
2. ON THE LONG TIME BEHAVIOUR OF NON-AUTONOMOUS LOTKA-VOLTERRA MODELS WITH DIFFUSION VIA THE SUB-SUPER TRAJECTORY METHOD, J.A. Langa, A. Rodríguez-Bernal and A. Suárez.
3. MODELLING AND SIMULATION OF A POLLUTED WATER PUMPING PROCESS, C. Alavani, R. Glowinski, S. Gomez, B.Ivorra, P. Joshi and A. M. Ramos.
4. EXPANDING THE ASYMPTOTIC EXPLOSIVE BOUNDARY BEHAVIOR OF LARGE SOLUTIONS TO A SEMILINEAR ELLIPTIC EQUATION, S. Alarcón, G. Díaz, R. Letelier and J. M. Rey.
5. A SINGULAR PERTURBATION IN A LINEAR PARABOLIC EQUATION WITH TERMS CONCENTRATING ON THE BOUNDARY, A. Rodríguez-Bernal.
6. ISOTHERMALISATION FOR A NON-LOCAL HEAT EQUATION, E. Chasseigne and R. Ferreira.
7. HOMOGENIZATION IN A THIN DOMAIN WITH AN OSCILLATORY BOUNDARY, J. M. Arrieta and M. C. Pereira
8. VERY RAPIDLY VARYING BOUNDARIES IN EQUATIONS WITH NONLINEAR BOUNDARY CONDITIONS. THE CASE OF A NON UNIFORMLY LIPSCHITZ DEFORMATION, J.M. Arrieta and S. Bruschi
9. PERTURBATION OF ANALYTIC SEMIGROUPS IN SCALES OF BANACH SPACES AND APPLICATIONS TO PARABOLIC EQUATIONS WITH LOW REGULARITY DATA, A. Rodríguez-Bernal
10. IDENTIFICATION OF A PRESSURE DEPENDENT HEAT TRANSFER COEFFICIENT, A. Fraguera, J. A. Infante, Á. M. Ramos and J. M. Rey.
11. MATHEMATICAL MODELING FOR PROTEIN FOLDING DEVICES. APPLICATIONS TO HIGH PRESSURE PROCESSING AND MICROFLUIDIC MIXERS, J. Bello Rivas, J. A. Infante, B. Ivorra, J. López Redondo, P. Martínez Ortigosa, A. M. Ramos, J. M. Rey, and N. Smith
12. A VARIANCE-EXPECTED COMPLIANCE APPROACH FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION, M. Carrasco, B. Ivorra, R. Lecaros and A. M. Ramos
13. MODELING AND SIMULATION OF CLASSICAL SWINE FEVER VIRUS SPREAD BETWEEN AND WITHIN FARMS, B.Ivorra, B.Martinez-Lopez, J. M. Sanchez-Vizcaino and A.M. Ramos
14. NONLINEAR PARABOLIC PROBLEMS IN THIN DOMAINS WITH A HIGHLY OSCILLATORY BOUNDARY, J. Arrieta, A. C. Carvalho, M. C. Pereira and R. P. Silva.
15. SINGULAR LIMIT FOR A NONLINEAR PARABOLIC EQUATION WITH TERMS CONCENTRATING ON THE BOUNDARY, A. Jiménez-Casas and A. Rodríguez-Bernal

16. SENSITIVITY ANALYSIS OF A DEFAULT TIME MODEL FOR CREDIT RISK PORTFOLIO MANAGEMENT, R. Abella Muñoz, I. Armero Huertas, B. Ivorra and A. M. Ramos del Olmo
17. OPTIMIZATION OF A PUMPING SHIP TRAJECTORY TO CLEAN OIL CONTAMINATION IN THE OPEN SEA, S. Gómez, B. Ivorra and A. M. Ramos del Olmo

**PREPUBLICACIONES DEL DEPARTAMENTO
DE MATEMÁTICA APLICADA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
MA-UCM 2011**

1. APPROXIMATING TRAVELLING WAVES BY EQUILIBRIA OF NON LOCAL EQUATIONS, J. M. Arrieta, M. López-Fernández and E. Zuazua.
2. INFINITELY MANY STABILITY SWITCHES IN A PROBLEM WITH SUBLINEAR OSCILLATORY BOUNDARY CONDITIONS, A. Castro and R. Pardo
3. THIN DOMAINS WITH EXTREMELY HIGH OSCILLATORY BOUNDARIES, J. M. Arrieta and M. C. Pereira
4. FROM NEWTON EQUATION TO FRACTIONAL DIFFUSION AND WAVE EQUATIONS, L. Vázquez
5. EL CÁLCULO FRACCIONARIO COMO INSTRUMENTO DE MODELIZACIÓN, L. Vázquez and M. P. Velasco
6. THE TANGENTIAL VARIATION OF A LOCALIZED FLUX-TYPE EIGENVALUE PROBLEM, R. Pardo, A. L. Pereira and J. C. Sabina de Lis
7. IDENTIFICATION OF A HEAT TRANSFER COEFFICIENT DEPENDING ON PRESSURE AND TEMPERATURE, A. Fraguera, J. A. Infante, Á. M. Ramos and J. M. Rey
8. A NOTE ON THE LIOUVILLE METHOD APPLIED TO ELLIPTIC EVENTUALLY DEGENERATE FULLY NONLINEAR EQUATIONS GOVERNED BY THE PUCCI OPERATORS AND THE KELLER–OSSERMAN CONDITION, G. Díaz
9. RESONANT SOLUTIONS AND TURNING POINTS IN AN ELLIPTIC PROBLEM WITH OSCILLATORY BOUNDARY CONDITIONS, A. Castro and R. Pardo
10. BE-FAST: A SPATIAL MODEL FOR STUDYING CLASSICAL SWINE FEVER VIRUS SPREAD BETWEEN AND WITHIN FARMS. DESCRIPTION AND VALIDATION. B. Ivorra B. Martínez-López, A. M. Ramos and J.M. Sánchez-Vizcaíno.
11. FRACTIONAL HEAT EQUATION AND THE SECOND LAW OF THERMODYNAMICS, L. Vázquez, J. J. Trujillo and M. P. Velasco
12. LINEAR AND SEMILINEAR HIGHER ORDER PARABOLIC EQUATIONS IN \mathbb{R}^N , J. Cholewa and A. Rodríguez Bernal
13. DISSIPATIVE MECHANISM OF A SEMILINEAR HIGHER ORDER PARABOLIC EQUATION IN \mathbb{R}^N , J. Cholewa and A. Rodríguez Bernal
14. DYNAMIC BOUNDARY CONDITIONS AS A SINGULAR LIMIT OF PARABOLIC PROBLEMS WITH TERMS CONCENTRATING AT THE BOUNDARY, A. Jiménez-Casa and A. Rodríguez Bernal
15. DISEÑO DE UN MODELO ECONÓMICO Y DE PLANES DE CONTROL PARA UNA EPIDEMIA DE PESTE PORCINA CLÁSICA, E. Fernández Carrión, B. Ivorra, A. M. Ramos, B. Martínez-López, Sánchez-Vizcaíno.