

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



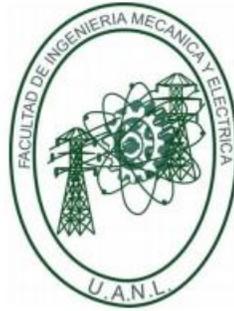
OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE
ENVÍO DE CERDOS DE ENGORDE AL
MATADERO

POR

VICTORIA REBILLAS LOREDO

EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE
ENVÍO DE CERDOS DE ENGORDE AL
MATADERO

POR

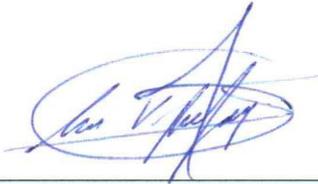
VICTORIA REBILLAS LOREDO

EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis « OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ENVÍO DE CERDOS DE ENGORDE AL MATADERO », realizada por el alumno Victoria Rebillas Loredo, con número de matrícula 1283577, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

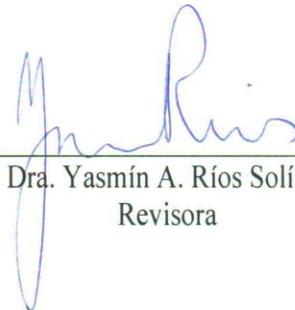
El comité de Tesis



Dra. Sara Verónica Rodríguez Sánchez
Directora de tesis



Dr. Lluís Miquel Plà Aragonés
Revisor



Dra. Yasmín A. Ríos Solís
Revisora

Vo. Bo.



Dr. Moisés Hinojosa Rivera
División de Estudios de Posgrado

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	x
Resumen	xI
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación del problema	3
1.3. Objetivo.	5
1.4. Hipótesis.	6
1.5. Estructura de la tesis.	6
2. Antecedentes	7
2.1. Estructura de la cadena de suministro del cerdo	10
2.2. Etapa de engorde en la cadena de suministro del cerdo	12
2.3. Principales factores económicos de producción en la etapa de engorde	14
2.4. Revisión de literatura relacionada con el problema	16
3. Planteamiento y formulación del problema	21
3.1. Modelo biológico de crecimiento	24
3.1.1. Discretización del modelo de crecimiento	27
3.2. Formulación del problema de programación lineal entera mixta	29
4. Resultados	32
5. Conclusiones y trabajo futuro	55
5.1. Conclusiones	56
5.2. Trabajo futuro	58

Apéndices	59
A. Estimación de la curva de crecimiento	59
B. Preprocesamiento	63
B.1. Datos para la instancia de estudio	63
Bibliografía	67
Ficha autobiográfica	71

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Distribución de la producción de carne mundial referente a diferentes tipos de ganado durante el 2010. (Fuente: FAOSTAT. Abril 2012)..	1
1.2. Distribución de la producción de carne de cerdo en la Unión Europea durante el 2010. (Fuente: FAOSTAT. Abril 2012)..	2
1.3. Representación de una cadena de suministro del cerdo.	3
2.1. Producción mundial de puerco 2000 – 2010. (Fuente: FAOSTAT, Abril 2012).	7
2.2. Producción española de puerco 2000 - 2011. (Fuente: FAOSTAT, Abril 2012)	8
2.3. Consumo mundial de carne de puerco 2000-2010. (Fuente USDA).	8
2.4. Consumo mundial de carne de puerco en la Unión Europea 2000 - 2010. (Fuente: FAOSTAT, Abril 2012).	9
2.5. Representación de la cadena de suministro de la carne de cerdo (Rodríguez et al., 2011).	11
2.6. Distribución de costes en una explotación porcina española equivalente de ciclo cerrado durante el año 2011.(Fuente: MAGRAMA, 2011).	14
2.7. Precio promedio por kilogramo de peso vivo de cerdo en España (Fuente:MAGRAMA, 2011)	15
3.1. Representación del sistema productivo etapa de engorde - matadero.	22
3.2. Diagrama del modelo de decisión integrando modelo de crecimiento y factores involucrados en el periodo de engorde.	23
3.3. Evolución del peso vivo del lote de animales en función del tiempo..	26
3.1.1. Representación de las distribuciones normales de peso medio esperado de los cerdos para las últimas seis semanas de negociación aplicando la discretización semanal y una partición en deciles.	28
4.4.1. Distribución de la granja de engorde para diferentes ventanas de negociación.	40
4.4.2. Peso promedio semanal enviado a matadero para diferentes ventanas de negociación.	41

4.4.3. Valores de la función objetivo para diferentes ventanas de negociación.	41
4.5.1. Distribución de la granja de engorde para diferentes precios de venta fijo.	42
4.5.2. Peso promedio semanal enviado a matadero para diferentes precios de venta fijo.	43
4.5.3. Costo promedio por incremento de kilogramo de peso vivo semanal para diferentes precios de venta fijo.	43
4.5.4. Valor de la función objetivo con diferentes precios de venta fijo.	44
4.6.1. Distribución de la granja de engorde para diferentes series de precios de venta. . .	45
4.6.2. Peso promedio semanal enviado a matadero para diferentes series de precios de venta.	46
4.6.3. Costo promedio por incremento de kilogramo de peso vivo semanal para diferentes series de precios de venta.	46
4.6.4. Valor de la función objetivo con diferentes precios de venta fijo.	47
4.7.1 Distribución de la granja de engorde para diferentes costos de pienso.	48
4.7.2. Peso promedio semanal enviado a matadero para diferentes costos de pienso. . . .	48
4.7.3. Costo promedio por incremento de kilogramo de peso vivo semanal para diferentes costos de pienso.	48
4.7.4. Valor de la función objetivo con diferentes costos de pienso.	49
4.8.1. Valores para la función objetivo para diferentes capacidades en el transporte de cerdos para envío a matadero.	52
4.9.1. Distribución de cerdos en la granja de engorde, comparación de estrategias.	53
4.9.2. Peso promedio semanal enviado a matadero, comparación de estrategias.	53
4.9.3. Costo promedio por incremento de kilogramo de peso vivo semanal, comparación de estrategias.	54
4.9.4. Valores para la función objetivo comparación de estrategias de envío de cerdos a matadero.	54

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Estado del arte de problemas relacionados con el crecimiento de cerdos y envío a matadero.	17
3.1. Bonificaciones y penalizaciones ofrecidas por el empacador en función del peso de la canal y el porcentaje magro de la canal. (Fuente: De Castro, 2001).	22
3.2. Coeficientes del modelo de regresión lineal para la media y desviación estándar del crecimiento y consumo de alimento para lote de cerdos.	26
4.1. Parámetros de entrada para instancias del modelo de Programación Lineal Entera Mixta.	32
4.2. Envío de cerdos a matadero correspondiente al modelo de Programación Lineal Entera Mixta y el modelo de crecimiento de de Castro con una ganancia de 52,130.00 €.	34
4.3. Envío de cerdos a matadero con envío de cerdos de pesos comerciales y de particiones contiguas.	36
4.1.1. Número de cerdos enviados del percentil p a enviar al matadero en la semana t, instancia con veinte particiones en la distribución de peso vivo.	37
4.2.1. Particiones realizadas a la distribución normal de peso vivo para la población de cerdos, refinando la partición en las colas.	38
4.2.2 Envío de cerdos a matadero con envío de cerdos de pesos refinando particiones en las colas de la distribución normal de peso vivo.	39
4.4.1 Índice de conversión y peso promedio enviado con precio fijo de +3% y -3% respecto al precio promedio.	44
4.6.1 Series de precios de venta por kilogramo de peso vivo de cerdo.	45
4.7.1 Costos por kilogramo de pienso.	47
4.7.2 Índice de conversión y peso promedio enviado con costo de pienso de -2.5% y +0.75% respecto al precio promedio.	49
4.8.1. Capacidad y costo de camiones para realizar el envío a matadero.	49
4.8.2. Número de cerdos enviados del percentil p a enviar al matadero en la semana t con camiones de capacidad de 330 y 375 cerdos, instancia con deciles.	51

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero dar gracias a mi padre Dios por su infinito amor, por estar conmigo en cada paso de mi vida y darme tantas cosas que jamás olvidaré.

Gracias a mis padres Vidal Rebillas Reyes y Sylvia Loredo Quiroz por todo el amor que me han dado, por forjarme y educarme como la persona que soy. Gracias a mis hermanos Viridiana Rebillas y Daniel Rebillas por ser mis hermanos, a mi abuelita Petrita Reyes Trujillo y a mi tía Concepción Rebillas Reyes que siempre han estado al pendiente de mí.

Le agradezco a la Dra. Sara Rodríguez por que ha sido más que mi directora de tesis, gracias por su apoyo y confianza incondicional, por sus palabras de aliento en momentos difíciles, por sus consejos y enseñanzas que siempre recordaré.

Doy gracias al Dr. Lluís Miquel Plà Aragonés por las revisiones de esta tesis, y por la oportunidad de trabajar con él durante la estancia que realicé en España, además por toda la paciencia y atenciones que tuvo conmigo.

Agradezco a la Dra. Yasmín Ríos por haber formado parte de mi comité de tesis, por sus comentarios y observaciones que hicieron este trabajo más completo.

El posgrado de Ingeniería de Sistemas ha sido una de las mejores etapas de mi vida, en el he tenido un gran desarrollo personal y académico, además es un lugar con grandes personas, gracias a todos mis profesores y compañeros que forman parte de él, especialmente a Cristina, Nancy, Paulina, Alexis, Fernando, Andrés y Luis por su ayuda, apoyo y amistad.

Agradezco al equipo de fútbol Mecánica Femenil del cual formé parte durante la maestría, extrañaré los entrenamientos y aquellas memorables tardes de partidos. Especialmente agradezco al Ing. Adolfo de la Torre por sus consejos y enseñanzas, a todas mis compañeras de equipo, especialmente a Paty, Alma, Nallely y Janeth por amistad incondicional y por siempre estar conmigo cuando lo necesito.

Le agradezco a la familia Sánchez Rodríguez con quien viví durante mi estancia en España, por haberme brindado su calor de hogar y hacer menos difícil estar lejos de mi país.

La comunidad parroquial San Pablo Apóstol es mi familia espiritual, ahí es donde encontré a Dios, les agradezco mucho a todas las personas que con su ejemplo me han enseñado a servir y amar a Dios.

También quiero agradecer a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y así mismo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de tiempo completo para la realización de mi maestría y por la beca mixta otorgada para realizar mi estancia en el extranjero.

RESUMEN

Victoria Rebillas Loredo.

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ENVÍO DE CERDOS DE ENGORDE AL MATADERO

Número de páginas:

OBJETIVO Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo de esta tesis consiste en estudiar el problema de envío de cerdos de engorde al matadero. Las características que se presentan responden al sistema de producción español. En concreto, el problema abarca la etapa productiva de engorde de cerdos y su envío a matadero que se desenvuelve en la cadena de suministro, buscando la configuración más rentable para el porcicultor.

El problema de envío de cerdos de engorde al matadero involucra el determinar ¿Cuándo enviar los cerdos a matadero?, ¿Cuáles y cuántos enviar? La principal dificultad de

esta toma de decisión, radica en la variabilidad existente en el proceso de engorde para la población de cerdos en la granja. En este problema se toman en cuenta tanto las características de calidad especificadas por el matadero, así como la capacidad limitada del camión. Se sabe que el costo del alimento es el mayor costo operativo seguido del costo de transporte. Por otra parte, las ganancias vienen dadas por la calidad y peso de la carne. En este sentido, se busca determinar la estrategia de comercialización que arroje el mayor beneficio para el productor.

Se propone como metodología de solución un modelo de Programación Lineal Entera Mixta. Este modelo contempla la inclusión de un modelo de regresión lineal que captura la dinámica de crecimiento del cerdo.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La contribución de este trabajo se fundamenta en el desarrollo de un modelo de Programación Lineal Entera Mixta con un modelo de crecimiento embebido. Este modelo pretende apoyar la toma de decisión realizada al efectuar el envío de cerdos, desde las granjas de engorde hacia el matadero basado en un modelo de regresión lineal que captura la dinámica de crecimiento del cerdo.

Si bien en la literatura ya existen trabajos previos que abordan el problema, bajo nuestro conocimiento, no existe alguno que aborde este problema en los términos que aquí se presentan. Las características que distinguen a nuestro trabajo son el integrar un modelo de crecimiento estadístico con datos empíricos y un modelo de toma de decisión para determinar la manera de realizar el envío de cerdos a matadero por medio de Programación Lineal Entera Mixta. Además de incluir las características de la demanda exigidas por el matadero y el transporte necesario para realizar los envíos.

A pesar de que el trabajo considera únicamente granjas porcinas, estos resultados fácilmente se pueden extender a otro tipo de granjas industriales como las de res, cunícolas o incluso piscifactorías. Esto considerando, que el modelo de optimización desarrollado es capaz de adaptarse a las características de crecimiento y homogeneidad específico de cada especie.

La implementación y desarrollo computacional del modelo se realizó mediante el software OPL Studio/CPLEX versión 12.4. Los resultados obtenidos por el modelo permiten observar la realidad económica para el porcicultor derivada de los precios de venta por kilogramo de cerdo y precio de kilogramo de pienso que se presentan en España. El modelo requiere un bajo costo computacional y debido a la incorporación del transporte a nuestra toma de decisión, los resultados obtenidos presentan mejor rentabilidad para el porcicultor comparando con otros resultados existentes.

Firma del director de tesis: _____
Dra. Sara V. Rodríguez Sánchez

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La carne con mayor producción en el mundo es la carne de cerdo. El 39% de la producción mundial de carne pertenece a la carne de cerdo (Figura 1). De ahí que realizar investigación para mejorar los procesos bajo los que opera la industria porcina representa gran importancia. Los principales productores en el mundo son China con 49%, seguido por la Unión Europea (formada por 28 países) con 22% y Estados Unidos que produce el 7%. España ocupa la cuarta posición con 3.08% de la producción mundial, siendo el segundo mejor productor en la Unión Europea solo detrás de Alemania (Figura 2), acode a las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Faostat, 2012).

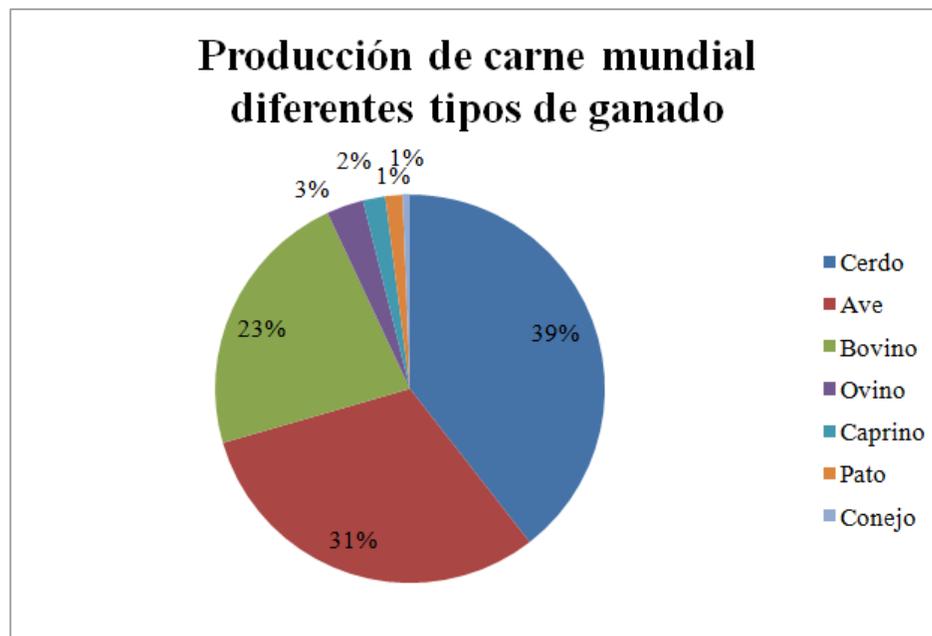


Figura 1.1. Distribución de la producción de carne mundial referente a diferentes tipos de ganado durante el 2010 (Fuente: FAOSTAT. Abril 2012)

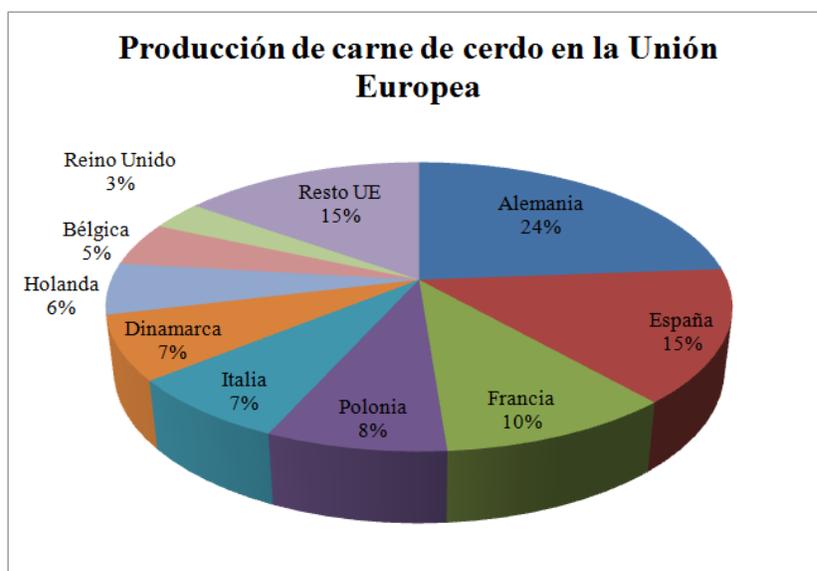


Figura 1.2. Distribución de la producción de carne de cerdo en la Unión Europea durante el 2010 (Fuente: FAOSTAT. Abril 2012).

Recientemente en Europa se ha venido presentado una evolución de la industria porcina, debido al surgimiento de grandes avances tecnológicos y científicos producto de la globalización (Trienekens et al., 2009). La gran demanda por parte de los consumidores en cuanto a precio, calidad, trazabilidad, seguridad alimentaria y bienestar animal han hecho que los productores de cerdo busquen alternativas de operación para ser competitivos. Como resultado, tenemos que en la actualidad se presenta la transformación del perfil tradicional de las granjas en el sistema de producción español. Las granjas están pasando de ser un sistema de producción familiar de pequeña escala a uno industrial y de gran escala (Rodríguez, 2010). Exigido por lo anterior, en la última década los principales productores a nivel mundial presentan la tendencia a buscar una integración vertical y coordinarse en una cadena de suministro (Pérez et al., 2009).

La cadena de suministro de cerdo está compuesta por entidades encargadas de la contratación, producción, sacrificio, transformación, distribución y negociación de cerdos así como subproductos derivados a los consumidores finales (Rodríguez, 2011). En nuestro caso, el problema se desenvuelve en la cadena de suministro porcina que actualmente se encuentra operando en España.

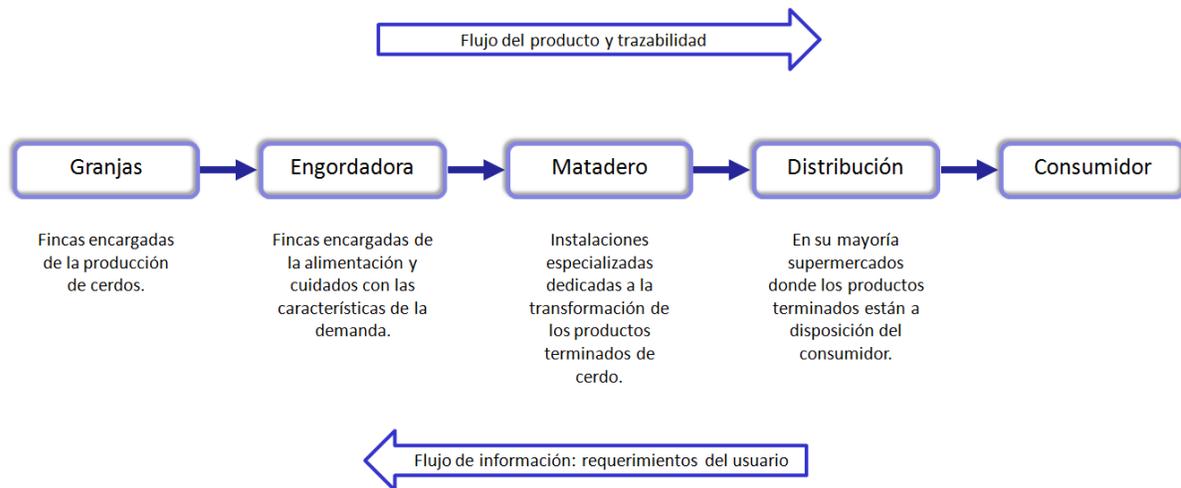


Figura 1.3. Representación de una cadena de suministro del cerdo.

Para una exitosa gestión en la cadena de suministro es necesario desarrollar políticas para producción eficiente, esta gestión debe fluir adecuadamente a lo largo de los agentes que intervienen en la cadena (Taylor, 1997). La coordinación entre los agentes se puede llevar a cabo por medio de contratos económicos. En el entorno actual de la cadena de suministro del cerdo, la coordinación vertical suelen realizarla las cooperativas y las empresas privadas o integradores (Ouden et al., 1996; Hobbs y Young, 2000; Pérez et al., 2009).

En este trabajo está enfocado en la etapa de engorde de cerdos y su envío al matadero. El sistema donde opera consiste en una granja de engorde bajo la administración de un integrador (cooperativa o empresa privada) que contratan la mano de obra e instalaciones de los ganaderos, se desea determinar el momento óptimo para realizar el envío de cerdos a matadero tomando en cuenta las características de la demanda.

Las cooperativas y las empresas privadas son los encargados de proveer a los poricultores los lechones para engorde, piensos, medicamentos y todos los demás elementos necesarios para llevar a cabo el proceso de engorde de los animales. Entre ambas partes se estipula un contrato económico, donde la empresa paga a los ganaderos conforme el peso y porcentaje magro del cerdo según se haya acordado en el contrato. Estos contratos económicos permiten un mayor control sobre los poricultores individuales que los contratos con especificaciones simples de mercado, pero sin tener la completa propiedad del sistema productivo (Rodríguez, 2010).

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En los últimos 20 años la población mundial presenta un crecimiento exponencial, a su vez el consumo de carne de cerdo así como las exigencias del consumidor en cuanto a calidad en la carne también se han visto en crecimiento. En España no es la excepción, la tasa histórica de consumo, producción y exportaciones que se presenta año tras año se mantiene en crecimiento constante. Debido a esto el sector agroindustrial tanto en España

como en el mundo se ven en la necesidad de producir más alimento y de más calidad, tratando de satisfacer los requerimientos del cliente (calidad, precio, inocuidad, trazabilidad, seguridad, bienestar animal). Este esfuerzo se realiza empleando los recursos disponibles destinados para mejorar la producción (instalaciones, tecnología, materia prima).

En particular la industria porcina mundial y española se han visto afectadas por diversos factores como el aumento en costos de producción (alimentos especializados de engorde, servicios públicos, utilización de instalaciones adecuadas), las recientes crisis económicas además de buscar satisfacción de estándares estrictos de calidad (Rodríguez, 2010). Todos estos factores han ocasionado dificultades para los productores de cerdo, que cada vez tienen más problemas para mantener la rentabilidad de sus negocios tradicionales. Es por eso que producir carne de cerdo de manera eficiente, optimizando los recursos disponibles en las circunstancias del mercado es un reto actual. Este trabajo busca favorecer el desarrollo de la industria porcina, desarrollando modelos matemáticos como apoyo a la toma de decisión para optimizar dichos recursos en la etapa de engorde.

En el año 2011, el sector ganadero español ha exportado 1.292.188 toneladas de carne fresca / refrigerada / congelada de diferentes tipos de ganado, donde 995.319 toneladas (77%) son de carne de cerdo. El ritmo de crecimiento de las exportaciones españolas de carne de cerdo ha sido tradicionalmente muy superior al de las importaciones, debido al posicionamiento de España en el sector productivo mundial de cerdo. Recientemente se han abierto las puertas de nuevos mercados, países como Japón y Rusia no son autosuficientes para cubrir sus demandas de carne de cerdo. Como consecuencia, estos países se ven en la necesidad de adquirir carne de exportación. Los porcicultores españoles además de proveer la carne de cerdo a nivel nacional, tienen la oportunidad de incrementar sus ingresos al producir carne que cumpla con los estándares de calidad demanda en el exterior para exportación.

El sector agroindustrial ha estado trabajando con herramientas cuantitativas desarrolladas como apoyo a la toma de decisiones para diferentes problemas específicos, con el objetivo de mejorar la producción. Específicamente en la industria porcina son escasos los antecedentes existentes para la aplicación de modelos matemáticos, y los ya existentes se han realizado en forma académica. Nuestro trabajo pretende modelar el sistema real presente en el envío de cerdos de engorde a matadero, con el objetivo de ser considerado como una herramienta de apoyo a la toma de decisión para las empresas que comprenden el proceso de engorde de cerdos.

En este trabajo se estudia un problema de optimización en el envío de cerdos al matadero enfocado en la etapa de engorde de cerdos y su envío a matadero. Los cerdos se engordan por lotes que ocupan instalaciones, al alcanzar el peso adecuado se comercializan bajo la gestión todo-dentro-todo-fuera (inglés: all-in-all-out). Aunque el granjero desearía enviar todo un lote al matadero de una vez, eso no es posible debido a que el crecimiento de los animales es desigual y no todos alcanzan un peso comercial en las mismas fechas, lo cual impone una secuenciación de los envíos. El modelo matemático correspondiente debe decidir: cuándo mandar los cerdos al matadero, cuáles y cuántos enviar. Los envíos deben ser efectuados tomando en cuenta la limitación del transporte necesario para realizar las entregas, además de considerar las bonificaciones y penalizaciones definidas por el empacador en base a la calidad de la carne (contenido magro).

En la literatura existen trabajos que enfocan su caso de estudio al crecimiento del cerdo en la etapa de engorde con una perspectiva de nutrición (Bailleul et al., 2000; Chavas et al., 1985). También existen otros trabajos que abordan el crecimiento y envío al matadero de los animales bajo diversas metodologías. Utilizando Programación Lineal Entera Mixta y probabilidades de transición de crecimiento (Ohlmann y Jones, 2008), considerando el envío individual y por lotes de cerdos con un modelo estadístico con una normal multivariada (Kure, 1997) o a partir de un modelo Markoviano con proceso jerárquico (Kristensen et al., 2012), envío de cerdos por lote estimando el crecimiento mediante de una regresión lineal y Programación Dinámica para la toma de decisión (de Castro, 2001) o utilizando Programación Lineal con un modelo de Flujo en Redes (Balogh et al., 2009).

El desarrollo actual de la producción de cerdo se lleva a cabo bajo el sistema donde cooperativas y las empresas privadas están integradas en la cadena de suministro. Nuestro modelo pretende coordinar la etapa productiva de engorde de cerdos y envío a matadero integradas en la cadena de suministro de la carne de cerdo, buscando maximizar la rentabilidad de los productores, aportando a su vez un beneficio para el matadero, ya que recibiría productos de calidad con las características demandadas por el cliente.

1.3 OBJETIVO

El objetivo principal de esta tesis consiste en estudiar el problema en las entregas de cerdos de engorde al matadero en la industria porcina. Se propone como método de optimización un modelo matemático formulado, utilizando Programación Lineal Entera Mixta. Dicho modelo a su vez se apoya en un modelo de regresión lineal que calcula el crecimiento del lote de animales en función del tiempo. Para esto se establecieron los siguientes objetivos particulares:

1. Revisión de bibliografía y estudio referente a la modelación matemática de problemas del proceso de engorde de cerdos y del envío óptimo al matadero, así como las diversas metodologías de solución.
2. Formulación matemática del problema determinista como un problema de Programación Lineal Entero Mixto.
3. Desarrollo e implementación computacional de los modelos y su resolución exacta.
4. Experimentación con el modelo matemático, análisis y discusión de los resultados obtenidos de la experimentación computacional.

1.4 HIPÓTESIS

El problema de optimizar entregas de cerdos de engorde al matadero para este trabajo ha sido modelado como un Problema Lineal Entero Mixto, y utilizando un modelo de crecimiento de los cerdos propuesto por de Casto (2001). Partiendo de esta información, se diseña la estrategia de entrega de los animales al matadero considerando la cantidad limitada de camiones. La hipótesis de este trabajo se centra en la premisa de que es posible resolver el problema de optimizar las entregas de cerdo al matadero, centrado en la etapa de engorde y envío al matadero a partir de dichos modelos.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En este primer capítulo se ha realizado la descripción del problema, se ha expuesto el objetivo de este trabajo, la hipótesis planteada y la metodología propuesta para la solución a este problema.

En el capítulo dos se hace una descripción de los antecedentes del problema que se esta abordando. Haciendo mención de las diferentes metodologías para las cuales se ha trabajado el crecimiento del cerdo y el envío al matadero.

En el capítulo tres se realiza una descripción detallada del problema, así como la formulación matemática propuesta. Se describe el modelo de crecimiento utilizado, además de la función objetivo relacionada con la maximización de beneficios del productor y las restricciones implicadas en el modelo.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos con el modelo, con la experimentación computacional. Se realiza un análisis de dichos resultados además de la comparación con los resultados existentes en la literatura.

En el capítulo cinco se establecen las conclusiones respecto al trabajo realizado y se enuncian algunas problemáticas derivadas del mismo para ser consideradas como trabajo a futuro.

Capítulo 2

ANTECEDENTES

Durante las últimas décadas la transformación es una característica que distingue al sector porcino. La globalización, el desarrollo científico y tecnológico además de cambios sociales son algunos de los factores que han causado toda esta evolución (Trienekens et al., 2009). Dicha transformación se ha hecho presente para favorecer el crecimiento de esta industria. A pesar que en recientes años se viene presentado una tendencia en la disminución de la cantidad de granjas (Ouden et al., 1996), las explotaciones porcinas van creciendo en tamaño y cada vez son más especializadas.

Según las cifras de la FAO (Food and Agriculture Organization), la producción porcina mundial presenta un crecimiento tanto para el número de cabezas de ganado como en el volumen de carne de cerdo. En el periodo comprendido de 2000 al 2010 se registró una tasa de crecimiento promedio anual de 1.3% de ganado en pie, se resalta el hecho que en el 2010 la producción de cabezas fue menor que la carne de canal. Esto debido, a que el desarrollo del sistema actual viene permitiendo la producción de más carne en canal con la misma cantidad de animales.

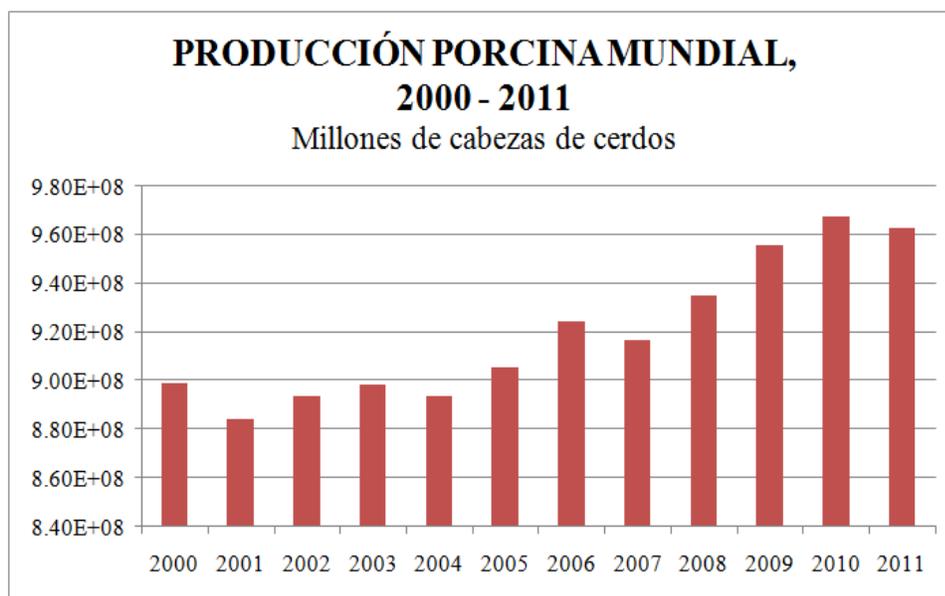


Figura 2.1. Producción mundial de puerco 2000 – 2011 (Fuente: FAOSTAT. Abril 2012).

La producción porcina nacional en España en cuanto a ganado en pie mostró una tendencia creciente de 2005 a 2006 para luego mantenerse hasta 2009. En los últimos dos años la producción de cerdos se redujo 3.5% consecuencia de la crisis económica. En

general, el ámbito de producción para España es de comportamiento estable y muy similar al que se presenta a nivel mundial.

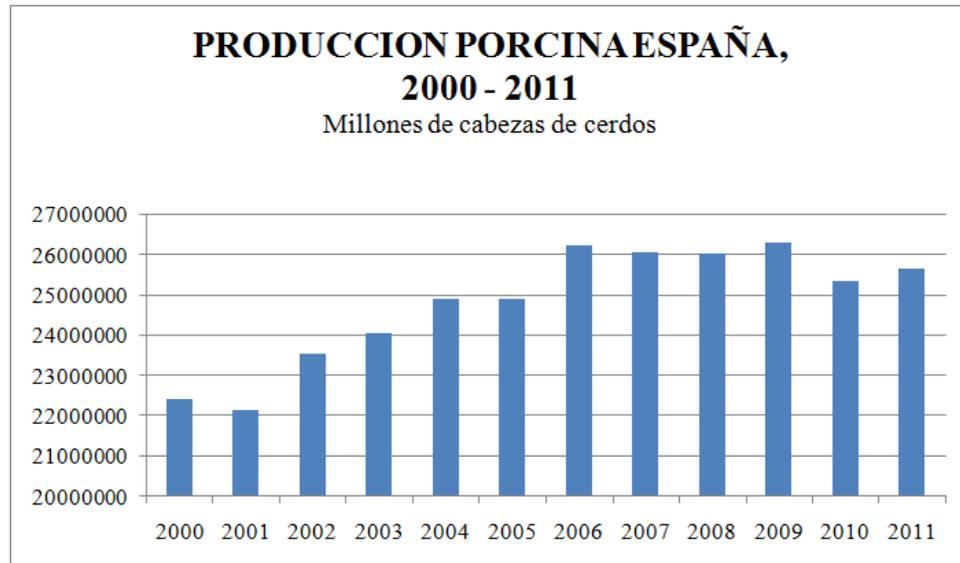


Figura 2.2. Producción española de puerco 2000 – 2011 (Fuente: FAOSTAT. Abril 2012).

El consumo de carne de cerdo es otro aspecto importante a considerar en esta industria, debido a que es la carne que más se consume a nivel mundial. Del periodo comprendido entre 2000 a 2010, el consumo mundial presentó tasas de crecimiento positivas. Para el cierre de 2010 se estimó que el consumo superaría las 103.1 millones de toneladas, con esto se alcanzaría un crecimiento promedio de consumo anual de 1.8% para este periodo.

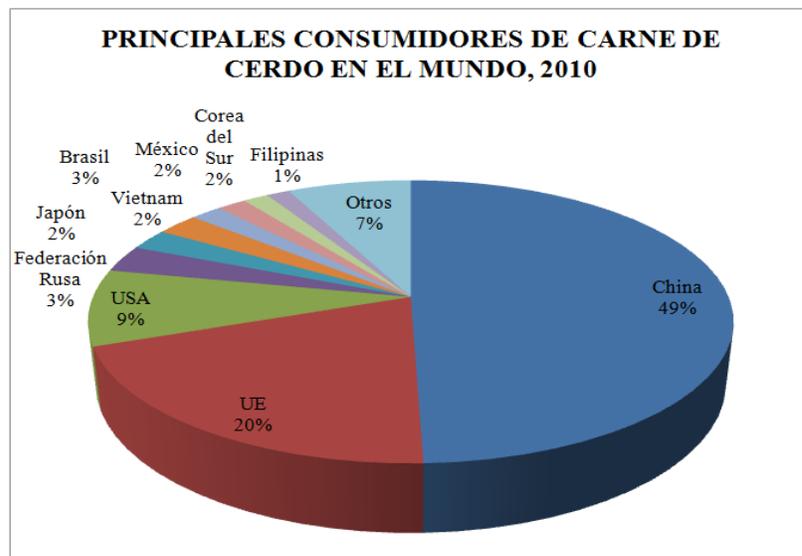


Figura 2.3. Consumo mundial de carne de puerco 2000 – 2010 (Fuente USDA).

De 2000 a 2010 el consumo de porcino en la Unión Europea presenta un incremento promedio de 10%, para este periodo podemos apreciar que la Unión Europea muestra una tendencia creciente. El principal consumidor de carne de cerdo en la Unión Europea es España, con más de 66 kg por habitante por año dicho consumo se ha presentado un 70% desde la adhesión a la Unión Europea.

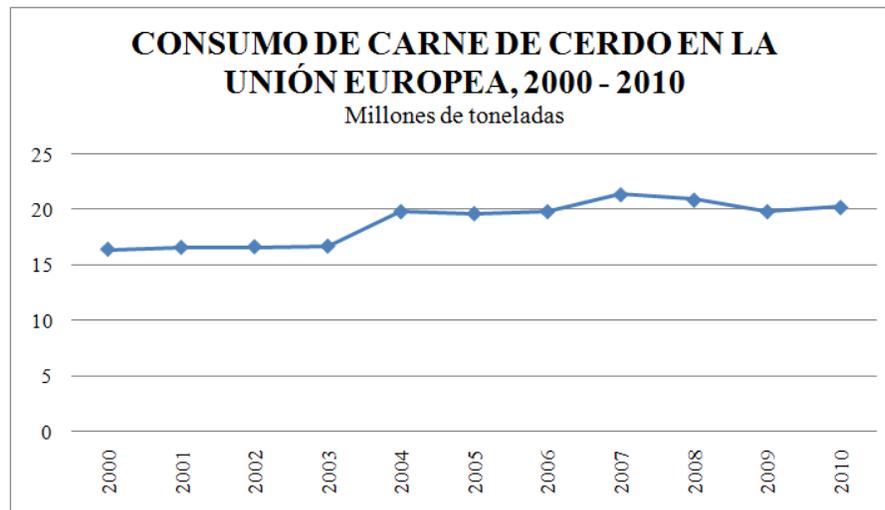


Figura 2.4. Consumo de carne de puerco en la Unión Europea 2000 – 2010 (Fuente: USDA).

Los avances en la tecnología han representado un aspecto importante en la industria porcina en los últimos años. Aires acondicionados, alimentos especializados, dispositivos de identificación de animales e instrumentos para un pesaje más preciso son algunas de las herramientas que se han beneficiado con los avances tecnológicos en esta industria (Backus y Dijkhuizen, 2002). El incremento de los estándares de calidad en los productos, así como la cantidad en la producción es el resultado de implementar estas modernas herramientas.

Asimismo, al pasar de los años la demanda del consumidor presenta estándares más elevados en cuanto a precio, calidad e inocuidad en la carne (Steenkamp, 1997; von Alvensleben, 1997). De la misma manera, la trazabilidad, seguridad animal y medio ambiente, son otros aspectos en los cuales el cliente centra su atención al momento de adquirir productos cárnicos (Schiefer, Huffman, 2002). Todo esto trae como consecuencia que los productores comerciales de cerdo busquen ser más eficientes en la producción, alimentación y aplicación de prácticas de crianza más eficientes.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta en la producción de cerdo es la calidad de carne, alimentos, medicinas, cerdas productoras de genética adecuada son algunos de los recursos necesarios determinantes en la producción, ya que influye significativamente en la calidad de la carne (Rodríguez, 2011).

El porcentaje magro en la canal es el principal indicador para determinar la calidad de la carne de cerdo, un porcentaje elevado de grasa no es deseable prefiriéndose carnes magras con poca grasa. La composición porcentual de una canal es grasa, magro y hueso. Siendo que el hueso puede considerarse constante a igual edad, el resto de la composición se reparte en magro y grasa, utilizándose el primero como criterio de calidad bonificando por los mataderos, en cambio el segundo es penalizado. De esta situación, los porcicultores han entendido que producir cerdos con exceso de grasa es ineficaz y poco rentable (Keeler et al., 1994).

Hoy en día, los sistemas productivos se han apegado a una nueva estrategia competitiva en la cría de cerdos. Esta estrategia se basa en que las explotaciones agrícolas individuales ya no compiten como entidades independientes exclusivamente, sino más bien tienden a integrarse en una cadena de suministro (Christopher, 1998; Min y Zhou, 2002).

Habitualmente la experiencia ha sido la forma de resolución clásica para determinar la estrategia en cuanto a la planeación de la producción. Debido al incremento del tamaño de las explotaciones y las especificaciones comerciales de la carne de cerdo, la industria porcina moderna se ve envuelta en una complejidad creciente al momento de la toma de decisiones.

El uso de modelos para la gestión en la agricultura se viene presentando de manera reciente. A pesar de esto, la literatura sobre métodos cuantitativos aplicados al sector agroindustrial es escasa. Este trabajo considera la etapa productiva de engorde de cerdos y su envío a matadero dentro la cadena de suministro del cerdo, buscando una herramienta de apoyo a la toma de decisión para los productores de cerdo. Bajo este contexto el empacador también se ve beneficiado, al recibir lotes de animales con características homogéneas de peso y porcentaje magro cumpliendo con las características de la demanda del consumidor.

2.1 ESTRUCTURA DE CADENA DE SUMINISTRO DEL CERDO

El circuito comercial que se practica en el sistema productivo de carne de cerdo en España, al igual que otros países de la Unión Europea es mediante cadena de suministro. La cadena de suministro de cerdo está compuesta por entidades encargadas de la contratación, producción, sacrificio, transformación, distribución y negociación de cerdos así como subproductos derivados a los consumidores finales (Rodríguez, 2011).

En general, las diferentes actividades de planeación en una cadena de suministro se clasifican de acuerdo al horizonte de planeación (Fleischmann y Meyr, 2003), decisiones operaciones (corto plazo), tácticas (mediano plazo), y estratégicas (largo plazo).

Los diferentes niveles que forman parte de la cadena deben estar ligados entre sí, con el objetivo de ser una fuente consistente de suministro de productos terminados o derivados de carne de cerdo atendiendo la demanda con las preferencias del consumidor. El punto de partida de la cadena inicia en las granjas productoras, cuya función es buscar y proveer los recursos necesarios para la producción de lechones.

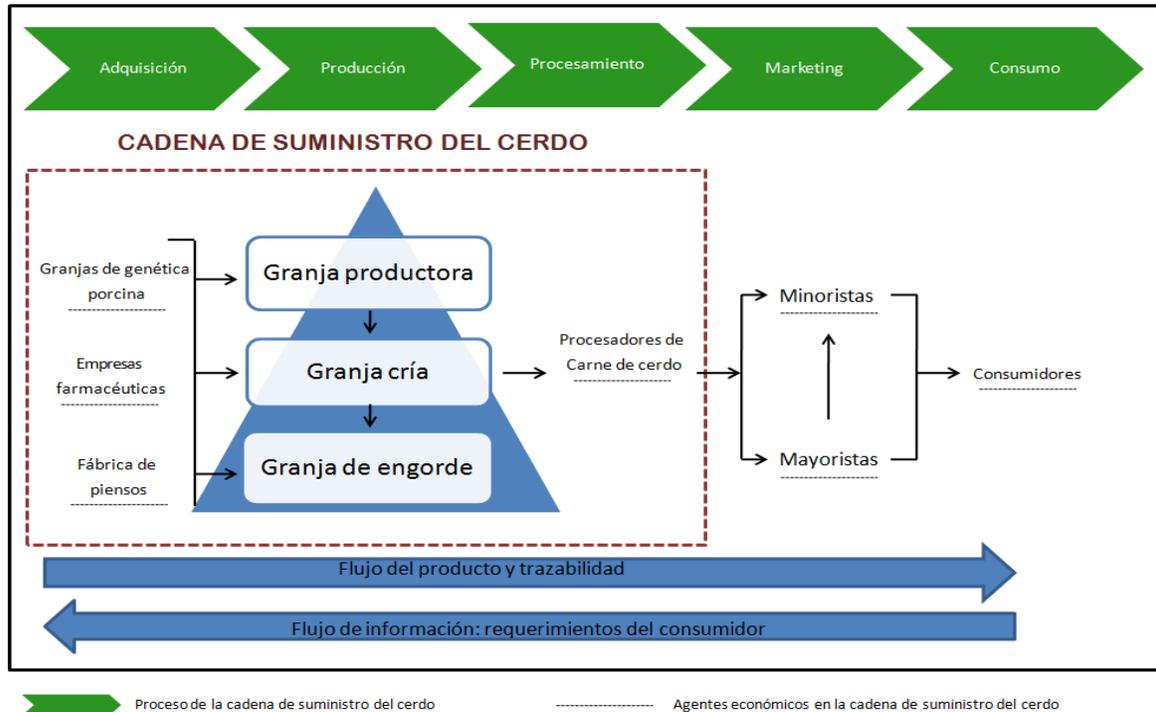


Figura 2.5. Representación de la cadena de suministro de la carne de cerdo (Rodríguez, 2011).

Los lechones producidos en estas granjas son transferidos a las granjas de cría. En esta etapa los animales aún son pequeños y está presente una alta tasa de mortalidad, es por eso que son cuidados y alimentados de forma especial. Posteriormente, son trasladados a las granjas de engorde, donde reciben una dieta específica para al alcanzar el peso adecuado y puedan ser comercializados. Enseguida pasan al matadero, donde son sacrificados para obtener la canal (cuerpo del animal eviscerado). La canal se transformará en una empacadora de carne como diferentes productos de carne de cerdo, buscando satisfacer la demanda del cliente.

Recientemente se ha presentado un cambio en la cultura de consumo de alimentos agrícolas por parte del consumidor, ahora el cliente muestra mayor interés en la calidad de los productos y los procesos de producción (Hobbs et al., 1998). Debido a esto, la cadena de suministro del cerdo ha enfatizado en la incorporación de la satisfacción de los requerimientos del usuario, que ha ocasionado un replanteamiento en algunos procesos de la cadena.

Con el fin de diseñar productos que sean aceptados por los consumidores, es necesario traducir las demandas del consumidor como especificaciones factibles del producto (Pérez et al., 2001). Para logra dicha traducción, en la estructura de la cadena de suministro existen dos flujos que son el flujo de información y el flujo del producto y trazabilidad. Las relaciones definidas que se establecen entre estos dos flujos de cada eslabón de la cadena, son las que permiten el conocimiento de las preferencias del consumidor.

El flujo de la información es la inquietud o necesidad del cliente por el conocimiento acerca de un producto. El flujo del producto y trazabilidad es el trayecto que realiza el producto de inicio a fin a través de la cadena. Este flujo tiene su origen con el productor y la recepción de la materia prima. Posteriormente, pasa al proceso de transformación que se efectúa en el sistema productivo y termina con la expedición del producto terminado listo para el consumo del cliente (Prida y Gutierrez, 1996; Bowersox y Closs, 1996).

2.2. ETAPA DE ENGORDE DENTRO DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL CERDO

Dentro de la cadena de suministro del cerdo en España se tienen tres etapas de producción las cuales son maternidad, cría y engorde. Existen tanto granjas especializadas en cada etapa de producción, como granjas con etapas conjuntas. El sistema se desarrolla con el empacador que es dueño de toda la producción, y los agricultores que son contratados con sus instalaciones y mano de obra. El integrador proporciona los recursos necesarios para la producción de cerdos. Entre los recursos se encuentra proporcionar las cerdas jóvenes que poblarán las granjas y los lechones que pasarán por el proceso de crianza y engorde.

Por gestiones de manejo nos referimos al tipo de procedimiento realizado para llevar a cabo el envío de cerdos al matadero. Existen dos procedimientos primarios de gestión para la última etapa de engorde, operaciones de flujo continuo y AIAO.

Las operaciones de flujo continuo consisten en mantener un abasto de carga constante en la instalación, y realizar de inmediato la sustitución de los cerdos que se envían a sacrificio. Por el contrario, la gestión AIAO practicada por la mayoría de los productores con grandes instalaciones (generalmente con más de 100 animales), consiste en vaciar toda la instalación antes de reemplazar a los animales con una nueva manada.

La gestión AIAO es la más recomendada para grandes instalaciones, ya que permite tener un alto control en las medidas de sanidad. Con esta gestión, las instalaciones quedan vacías una vez enviados todos los animales a sacrificio, esto permite que la granja sea limpiada y desinfectada como prevención para la propagación de enfermedades.

El proceso de engorde inicia con cerdos procedentes de la etapa de cría, cuyo inicio es después del destete los animales. A esta edad los lechones aún son pequeños y la tasa de mortalidad presente es alta, es por eso que reciben atención y cuidados especiales hasta que obtengan entre 15 a 35 kg. Posteriormente los cerdos pasan a la etapa de engorde, en esta etapa los cerdos son alimentados con dietas especiales hasta que estén listos para el sacrificio, los animales son llevados a pesar de 100 a 114 kg (esto puede variar dependiendo el país y el matadero). Los tipos de pienso, el manejo de los animales, densidad de los lotes, limpieza y las condiciones ambientales de la granja son factores que intervienen en esta etapa (Whittemore y Kyriazakis, 2006).

Los cerdos que pasan al matadero son registrados por los productores por medio de internet o llamada telefónica por lo general, durante la semana previa a la recolección de los animales. El matadero realiza la planeación del sacrificio para la siguiente semana, en función de los cerdos disponibles y la demanda de productos de cerdo (Gribkovskaia et al., 2006).

Procedentes de las granjas de engorde los cerdos llegan al matadero para ser sacrificados. La manipulación de los animales durante el traslado al matadero produce un factor de estrés, el cual se debe minimizar ya que afectan la calidad de la carne (Warris, 1998). En el matadero es donde se realiza la mayor parte de la transformación, ya que los cerdos pasan de animales vivos a canales, agregando la importancia de establecer un sistema de higiene que evite la contaminación de los cortes (Pérez et al., 2009).

El sacrificio se puede dividir en cuatro etapas: tiempo de espera antes del aturdimiento el cual no debe exceder las dos horas, el sacrificio que por motivos de bienestar se recomienda sea instantáneamente después que el animal pierde el conocimiento, clasificación de canales y enfriamiento de la canal (Pérez et al., 2009).

Después del sacrificio, las canales (cuerpo eviscerado del animal) se comercializan completas (por lo general, para el mercado internacional) o se transforman en cortes de valor agregado como jamón, chuleta y lomo, además de productos derivados. El valor económico de la canal está determinando por el peso de la canal y la calidad de la carne, medido en términos de porcentaje magro grasa (Rodríguez, 2011).

2.3 PRINCIPALES FACTORES DE PRODUCCIÓN DE LA ETAPA DE ENGORDE

En el año 2011 el costo promedio total de producir un cerdo de 105 kg es de 123.81 € por cerdo engordado, en la etapa de engorde se registró un costo de 79.58 € por cerdo engordado. En la Figura 2.6 podemos ver la distribución de los diferentes tipos de costos relacionados a una granja porcina en al año 2011.

Tanto para costos fijos y variables que se presentan en esta etapa, los costos de alimentación que pertenece a costos variables son los que resultan con mayor peso sobre el costo total de producción de un cerdo de engorde. De modo que determinar una buena estrategia de gestión durante la etapa de engorde es de relevante importancia. A este aspecto debemos agregar que durante el 2011 el precio por kilogramo de pienso ha sido el más elevado en los últimos seis años.

De los costos fijos registrados por 27.27 € por cerdo engordado tenemos que la mano de obra es de 9.55 € y la partida de amortizaciones y alquileres de 7.09 € son las más importantes, entre ambas consisten el 61% de los costos fijos.

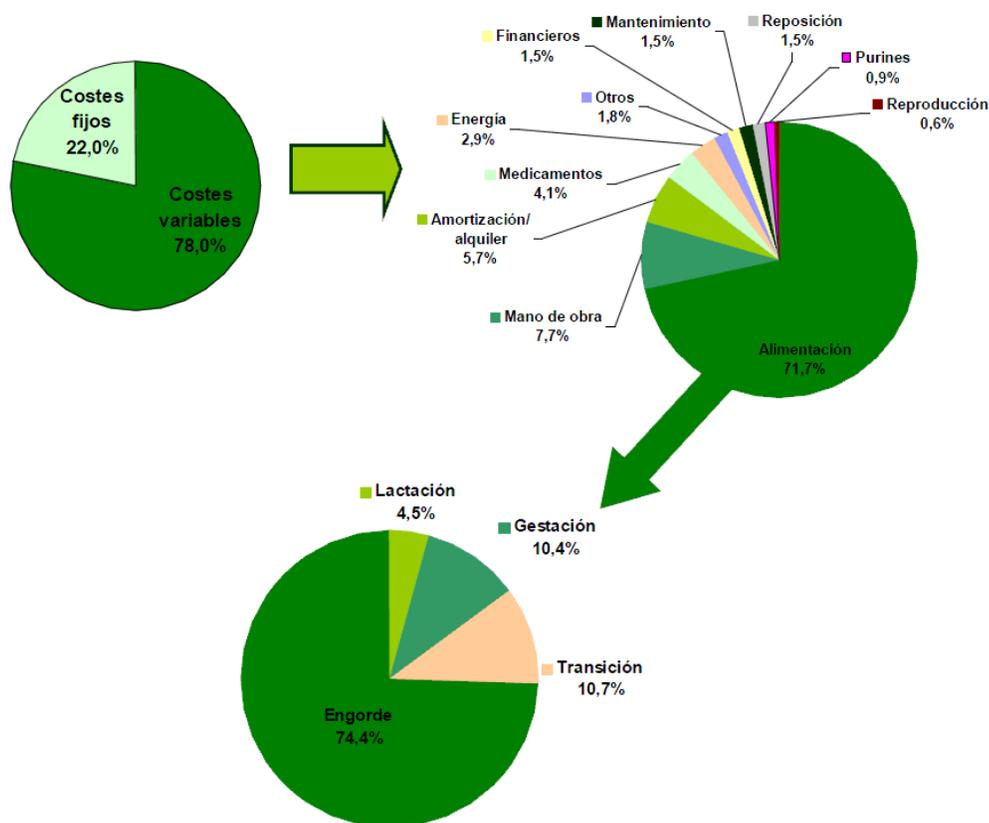


Figura 2.6. Distribución de costes en una explotación porcina española equivalente de ciclo cerrado durante el año 2011. (Fuente: MAGRAMA, 2011)

El precio de venta por kilogramo de cerdo en peso vivo también es otro factor importante para el poricultor. En el periodo de 2000 a 2010 dicho precio ha presentado una inestabilidad, además que este factor es muy sensible en la rentabilidad de los granjeros. Por otro lado vemos que la tendencia de este factor en los últimos años ha ido incrementándose, lo que representa un punto a favor dentro de la producción de cerdos de engorde.

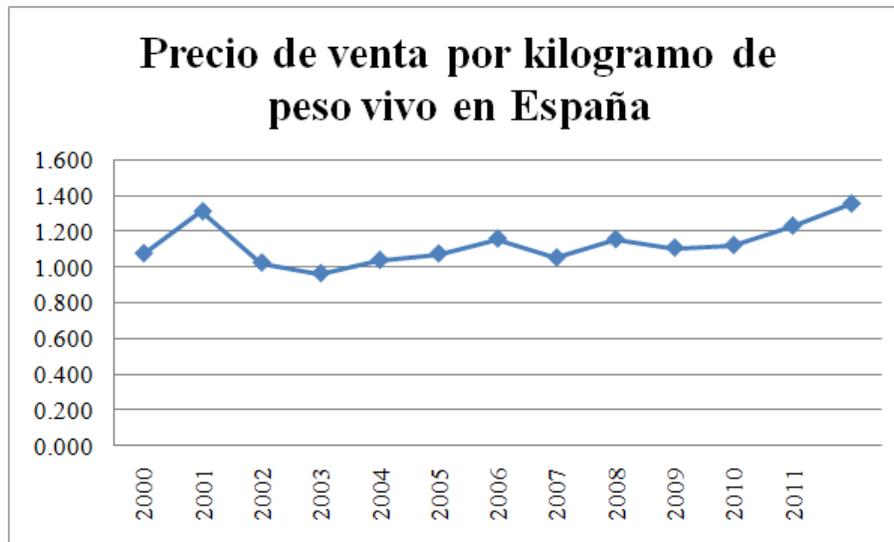


Figura 2.7. Precio promedio por kilogramo de peso vivo de cerdo en España. (Fuente: MAGRAMA, 2011)

2.4. REVISIÓN DE LITERATURA RELACIONADA CON EL PROBLEMA

En la literatura podemos encontrar trabajos con diferentes metodologías y enfoques relacionados con el engorde y envío a matadero en la industria porcina. Los primeros antecedentes que tenemos en la literatura son modelos enfocados a la nutrición de los cerdos.

Podemos citar el de Chavas et al. (1985), que desarrolla un modelo utilizando ecuaciones diferenciales para capturar el crecimiento dinámico de los cerdos con la gestión de flujo continuo. En dicho modelo se busca determinar las condiciones óptimas de engorde analizando como se realiza la alimentación de los cerdos, captando la dinámica de crecimiento biológico. Partiendo de estos principios, se utiliza el modelo para evaluar las decisiones en la nutrición y la comercialización de una manada homogénea de cerdos. Boland et al. (1999) presenta un trabajo enfocado en la dieta de los animales, ya que examina el consumo óptimo de nutrientes para maximizar el retorno económico para el productor.

Situados en la etapa de envío a matadero Jørgensen (1992) y Broekmans (1992) estudiaron la variabilidad en el error de precisión del peso vivo del animal antes de enviarlo a sacrificio. Bajo la gestión AIAO, buscan determinar políticas de marketing que indiquen el momento de envío de los lotes de animales usando procesos de decisión markovianos, Jørgensen considera para su modelo precios fijos ofrecidos por el empacador. Por otro lado, tratando de asemejar más el modelo al sistema de comercialización actual Broekmans incorpora la variabilidad en los precios ofrecidos por el empacador. Broekmans realiza una comparación de sus resultados con los obtenidos por Jørgensen, obteniendo como resultado que el considerar precios variables trae una mejor rentabilidad en un horizonte de planeación a futuro. Buscando obtener mayores beneficios para el productor bajo el mismo contexto anterior, Keeler (1994) desarrolló modelos empíricos tanto para la gestión de flujo continuo como para la gestión AIAO.

En torno al sistema AIAO, en la literatura podemos encontrar dos enfoques empleados para efectuar la venta de cerdos comercializables; el primer enfoque permite realizar la comercialización individual de cerdos, y el segundo ofrece precios fijos por cada animal que en consecuencia asume la comercialización de los animales por camión. Para el primer enfoque Kure (1997) identifica el máximo rendimiento neto individual de los cerdos por cada etapa, para posteriormente calcular el beneficio por lote de animales. Todo esto con un modelo estadístico por medio de una normal multivariada, que se utiliza para capturar el crecimiento de los cerdos considerando una dieta específica.

Autor	Trabajo	Año	Metodología	Características	Tipo de Gestión
Chavas et al.	Modeling dynamic agricultural production response: The case of swine production	1985	Modelar de forma dinámica el crecimiento de los animales, a través de ecuaciones diferenciales.	Averiguar las condiciones necesarias para el engorde de cerdos, principalmente en la alimentación y simultáneamente determinar el momento óptimo de reemplazo de un animal en la granja de engorde.	Flujo continuo
Jørgensen	The influence of weighing precision on delivery decisions in slaughter pig production	1992	Modelo de decisión jerárquico markoviano	Determinar políticas de marketing que indiquen el momento de envío de lotes de animales al matadero, buscando maximizar los ingresos del productor considerando que los precios ofrecidos por cada matadero son fijos.	AIAO
Broekmans	Influence of price fluctuations on delivery strategies for slaughter pigs	1992	Modelo de decisión jerárquico markoviano	Determinar la estrategia óptima de entrega de cerdos al matadero considerando precios variables de comercialización, buscando maximizar los ingresos del productor.	AIAO
Keeler et al.	Assisting swine producers to maximize marketing returns	1994	Empírica mediante el pesaje de las canales y medición de grasa dorsal bajo diferentes condiciones de temperatura después del sacrificio.	Analizar las características adecuadas para una mejor comercialización de las canales. Con esta información se busca ayudar a los productores a obtener mayores beneficios.	AIAO y Flujo continuo

Kure	Optimal slaughter pig marketing	1997	Modelo de optimización determinista apoyado en la normal multivariada.	Maximizar el beneficio del empacador. Primero se busca identificar y seleccionar el máximo rendimiento neto por cerdo individualmente por cada etapa. Después se calcula en valor presente neto por lote.	AIAO
de Castro	Optimització del procés productiu d'engreixament del porcí. Un enfocament operatiu.	2001	Modelo de programación dinámica apoyado con un modelo de crecimiento usando una regresión lineal con coeficientes aleatorios con datos experimentales.	Conocer en qué momento y en qué condiciones debería de enviar en grupo de animales al matadero, de tal forma que se logre obtener la máxima ganancia a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta el último destino de los animales sacrificados.	AIAO y Flujo continuo
Schinckel et al.	Evaluation of alternative nonlinear mixed effects models of swine growth.	2002	Modelo de crecimiento estocástico.	Evaluar cuatro estrategias de marketing alternativas definidas por el umbral de peso, de manera que considerando puntos discretos en el tiempo todos los cerdos por encima del umbral se venden.	AIAO
Li et al.	Analysis of economically optimal nutrition and marketing strategies for Paylean® usage in hog production.	2003	Estudios empíricos con modelos de crecimiento estocásticos.	Analizar la nutrición y estrategias de marketing para maximizar la ganancia neta por cada cerdo en cuanto a espacio por día.	AIAO y Flujo continuo

Niemi	A dynamic programming model for optimizing feeding and slaughter decisions regarding fattening pigs.	2006	Modelo de programación dinámica	Optimizar la alimentación y el momento de sacrificio individual de cada cerdo enfocado en los factores genéticos.	AIAO
Ohlmann y Jones	An integer programming model for optimal pork marketing	2008	Modelo de programación lineal entera mixta apoyado con un modelo de crecimiento usando matrices de transición de crecimiento.	Maximizar el beneficio semanal por empacador en cada etapa para así, maximizar el beneficio anual del empacador.	AIAO
Balogh et al.	Analysis and optimization regarding the activity of a Hungarian Pig sales and Purchased Cooperation.	2009	Modelo lineal usando flujo en redes.	Determinar la cantidad de cerdos a enviar de las diversas granjas. Estos animales deben ser enviados a mataderos que ofrezcan la mayor ganancia integrados en el sistema por cooperativas, tomando en cuenta los diferentes sistemas de precios ofrecidos por los empacadores.	Flujo continuo
Kristensen et al.	Optimal slaughter pig marketing with emphasis on information from on-lin live weight assessment.	2012	Modelo basado en proceso jerárquico de Markov.	Informar al porcicultor la cantidad de cerdos listos para comercializar de manera individual.	AIAO

Tabla 2.1. Estado del arte de problemas relacionados con el crecimiento de cerdos y envío a matadero.

Siguiendo con el mismo enfoque, Niemi (2006) logra optimizar la forma de alimentación y momento de sacrificio, con un modelo de programación dinámica enfocado los factores genéticos de los cerdos. Para ambas gestiones AIAO y flujo continuo Li et al. (2003) estudia la alimentación de los cerdos y diferentes estrategias de marketing para maximizar la ganancia neta por cada cerdo en cuanto a espacio por día.

Continuando con la gestión AIAO pero usando un modelo estocástico de crecimiento Schinckel et al. (2002) evalúa cuatro alternativas de marketing, donde la decisión se toma cuando el cerdo sobrepasa el umbral de peso especificado. Posteriormente Boys et al. (2007) utiliza técnicas de simulación tomando el modelo estocástico de Schinckel. Su aportación en este trabajo es el considerar en las estrategias de marketing el envío de camiones cargados completamente. En sus resultados encontramos que para obtener un mayor beneficio, el plan de marketing debe realizarse con los cerdos por lotes con pesos homogéneos.

Balogh et al. (2009) expone un sistema de compra y venta por cooperativas en Hungría. En este trabajo se tienen varias granjas de engorde que pueden vender sus cerdos a diferentes empacadores, cada uno ofreciendo diferentes precios modelando este sistema como un modelo de Programación Lineal usando Flujo en Redes. El modelo permite la cuantificación del número de cerdos a enviar de las explotaciones a los mataderos y el ingreso máximo de venta. También determina los precios de umbral de entrega, así como un análisis de sensibilidad que muestra el impacto de cooperación de expertos miembros de los ingresos por ventas.

Situados en la última etapa de producción de cerdos que es engorde, con la gestión AIAO y con precios establecidos correspondientes a cada categoría de cerdos tenemos los trabajos de Ohlmann y Jones (2008) y de Castro (2001). Ohlmann y Jones (2008) presentan un modelo de Programación Lineal Entera Mixta, apoyados en un modelo de probabilidades de transición de crecimiento. En este trabajo se tiene una granja de engorde con la posibilidad de vender sus animales a diferentes empacadores, cada uno con su propia oferta. Se busca determinar la estrategia óptima de envío de animales al matadero que maximice los beneficios anuales. Esto, tomando en cuenta la cantidad necesaria de camiones para realizar las entregas, sabiendo que los gastos de transporte es uno de los que más impacta en las ganancias del productor.

Por otro lado de Castro (2001) considera tres aspectos en su modelo: aspecto biológico, donde mediante un modelo de regresión lineal permite conocer el comportamiento del crecimiento por lote de animales a través del tiempo, aspecto económico referente a los costos asociados de mantenimiento en la etapa de engorde y aspecto de la caracterización de la demanda donde se encuentran las especificaciones necesarias que deben cumplir los animales para su distribución. Estos tres aspectos son la base para la aplicación de un modelo de programación dinámica que tiene como punto de inicio la etapa de engorde, buscando obtener mayores ganancias para el envío en cada etapa.

Capítulo 3

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Haciendo frente al problema de optimización en la entrega de cerdos de engorde al matadero, formulamos un modelo de apoyo a la toma en las decisiones efectuadas por los porcicultores. Este modelo busca la planeación de los envíos de cerdos a matadero decidiendo ¿cuándo enviar los cerdos al matadero?, ¿cuáles y cuántos enviar?, teniendo como objetivo maximizar la rentabilidad del productor de carne de cerdo.

El decidir el momento óptimo que maximice las ganancias del porcicultor está en función de factores de diferente índole. El modelo formulado incorpora los siguientes factores correspondiente a la fase de engorde:

- Biológicos: tasas de crecimiento, evolución del peso promedio del lote de cerdos, porcentaje magro del cerdo.

- Productivos:
 - Costos: alimentación de los cerdos, transporte.
 - Ganancias: precio de venta fijo, bonificaciones y/o penalizaciones por kilogramo de cerdo.

- Caracterización de la demanda: porcentajes magros requeridos por el cliente.

En general el funcionamiento de una granja de cerdos en la etapa de engorde operando bajo el contexto de cadena de suministro es el siguiente; los cerdos procedentes de la granja de cría ingresan a la granja de engorde, pesando entre 15 y 35 kilogramos. A través de las semanas van consumiendo alimento e incrementando su peso. Existe un índice de conversión alimenticia que nos permite observar la rentabilidad de los animales en cuanto al consumo de alimento y su crecimiento a través de las semanas. El matadero establece un peso óptimo de envío de 100 a 114 kg, este intervalo de peso puede variar dependiendo la zona geográfica. Con el objetivo de recibir carne con las características de la demanda del cliente, el matadero establece un incentivo o penalización por porcentaje magro de cerdo recibido. Acorde a Ohlmann, la duración del periodo de engorde en USA es aproximadamente de 14 a 20 semanas, mientras que para de Castro es de 11 a 17 semanas.

Asumimos que la gestión que se practica en la granja de engorde es AIAO, la cual consiste en vender la totalidad de los animales que están en las instalaciones para que pueda ingresar una nueva manada de cerdos en la granja de engorde.

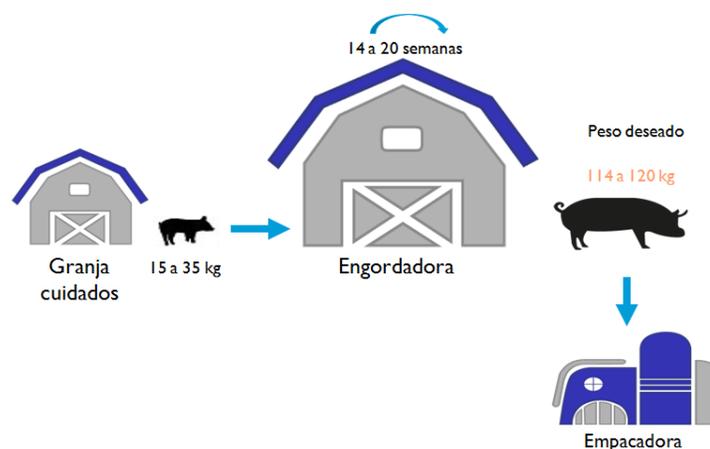


Figura 3.1. Representación del sistema productivo etapa de engorde y envío a matadero.

Desde el aspecto económico, los ingresos percibidos por el productor se generan al realizar la venta de los cerdos al matadero. El ingreso total proviene de un precio fijo por kilogramo de peso vivo del cerdo, agregando una bonificación o penalización aplicable según el peso y las características de porcentaje magro de las canales vendidas. En la Tabla 3.1 tenemos una red de precios establecida por el empacador, considerando un bono por kilogramo de cerdo que se encuentre en los porcentajes magros correspondientes a la demanda del cliente (en color negro). En caso contrario, el productor puede sufrir una penalización por kilogramo de cerdo por defecto de porcentaje magro (en color rojo). Esta medida es realizada con la finalidad de motivar al productor a enviar cerdos con características de peso y porcentaje magro uniformes ajustadas a la calidad demandada por el consumidor.

% Magro	Peso de canal (Kilogramos)					
	45 – 67.9	68 – 71.9	72 – 74.9	75 – 100	100.1 – 105	105.1 – 120
≥ 62	-0.1143 €	-0.0381 €	0.0991 €	0.1905 €	0.1448 €	0.0381 €
61	-0.1219 €	-0.0457 €	0.0914 €	0.1829 €	0.1372 €	0.0305 €
60	-0.1372 €	-0.0610 €	0.0762 €	0.1676 €	0.1219 €	0.0152 €
59	-0.1600 €	-0.0838 €	0.0533 €	0.1448 €	0.0991 €	-0.0076 €
58	-0.1981 €	-0.1219 €	0.0152 €	0.1067 €	0.0610 €	-0.0457 €
57	-0.2362 €	-0.1600 €	-0.0229 €	0.0686 €	0.0229 €	-0.0838 €
56	-0.2667 €	-0.1905 €	-0.0533 €	0.0381 €	-0.0076 €	-0.1143 €
55	-0.2896 €	-0.2134 €	-0.0762 €	0.0152 €	-0.0305 €	-0.1372 €
54	-0.3048 €	-0.2286 €	-0.0914 €	0.0000 €	-0.0457 €	-0.1524 €
53	-0.3429 €	-0.2667 €	-0.1295 €	-0.0381 €	-0.0838 €	-0.1905 €
52	-0.3810 €	-0.3048 €	-0.1676 €	-0.0762 €	-0.1219 €	-0.2286 €
51	-0.4191 €	-0.3429 €	-0.2057 €	-0.1143 €	-0.1600 €	-0.2667 €
50	-0.4572 €	-0.3810 €	-0.2438 €	-0.1524 €	-0.1981 €	-0.3048 €
49	-0.4953 €	-0.4191 €	-0.2819 €	-0.1905 €	-0.2362 €	-0.3429 €
48 ≤	-0.6858 €	-0.6096 €	-0.4724 €	-0.3810 €	-0.4267 €	-0.5334 €

Tabla 3.1. Bonificaciones y penalizaciones ofrecidas por el empacador en función del peso de la canal y el porcentaje magro de la canal. (Fuente: De Castro, 2001).

Para poder tomar decisiones operativas en la granja de engorde es clave conocer el comportamiento del crecimiento de los animales. Al ser un proceso biológico la evolución del engorde de los cerdos no se comporta de la misma manera para todos los animales. Esto conlleva a que los cerdos alcancen las condiciones óptimas para su sacrificio en diferentes momentos del periodo de engorde. Este fenómeno agrega una variabilidad al crecimiento en el lote de cerdos, que aumenta la complejidad del problema que estamos abordando debido a la dificultad de llevar un control individual de la evolución del peso de cada cerdo. Agregamos a esta dificultad la consideración del transporte requerimiento para realizar el envío de los cerdos a matadero.

El modelo de decisión que proponemos, toma en cuenta un modelo de regresión lineal específica que captura la dinámica y variabilidad biológica existente de crecimiento del cerdo durante la fase de engorde. Esto con la finalidad de tomar decisiones más precisas con información explícita de la evolución del crecimiento de los cerdos. El modelo de crecimiento biológico que utilizaremos es el formulado por de Castro (2001).

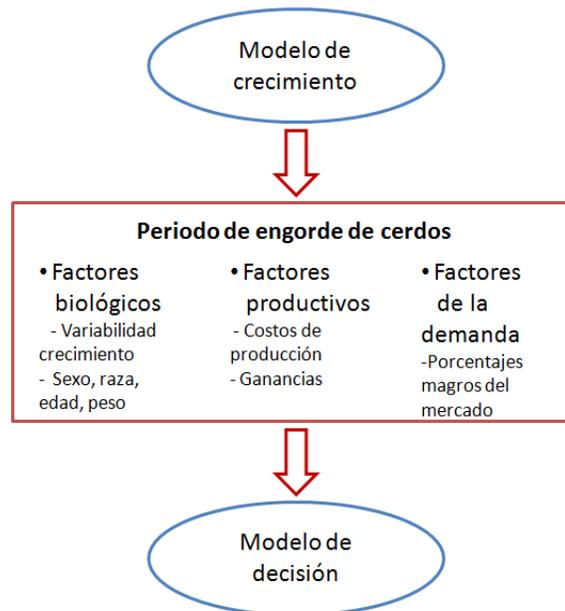


Figura 3.2. Diagrama del modelo de decisión integrando modelo de crecimiento y factores involucrados en el periodo de engorde.

3.1 MODELO BIOLÓGICO DE CRECIMIENTO

En la literatura podemos encontrar trabajos que modelan la curva genética del crecimiento de los cerdos (Moughan 1987, Schinckel 1996, NRC, 1998). Esta es una práctica que se realiza a menudo con el objetivo de tener un control en la rentabilidad del porcicultor en el proceso de engorde. Ohlmann (2001) propone en su trabajo modelar el crecimiento de los cerdos por medio de una matriz de transición de crecimiento. El cálculo de esta matriz y la discretización de las etapas de crecimiento se hacen más elaborados ya que requiere un proceso adicional de clasificación por medio de categorías de crecimiento. En este trabajo se utiliza la regresión lineal generada del crecimiento del lote de cerdos, se realiza la discretización de dicha curva para introducir los datos de la evolución del peso al modelo de decisión. Además contemplamos la variabilidad en el crecimiento del lote de cerdos al considerar la desviación estándar en cada semana del periodo de engorde.

Para este modelo de crecimiento, se tiene como base trabajar por lote. Un lote está definido como un grupo de animales de la misma línea genética que inician el periodo de engorde en un momento determinado, y aunque el peso no es el mismo para todos los animales del lote, se busca que la desviación estándar de los pesos sea la menor posible (lotes homogéneos). Existen diversas maneras de formar un lote algunos lo hacen mediante rasgos característicos de los animales determinados de forma lógica, como lo son sexo y raza (Kure, 1997), con la finalidad de tener lotes más homogéneos que satisfagan la demanda. Para este problema específico se trabaja únicamente con edad y peso de los cerdos.

El modelo de crecimiento considerado pretende “estimar la evolución del peso y consumo del grupo de animales que se está engordando en un momento y en un entorno concreto” (de Castro, 2001). Así pues, a través de una regresión lineal se puede calcular dicha estimación. La función cuenta con variables observables como son peso y/o consumo de pienso, y no observables como porcentaje magro o la grasa intramuscular del cerdo.

El conjunto de variables que definen el comportamiento del animal en un momento dado es a lo que se llama estado de un animal. De Castro (2001) justifica que es posible tratar las variables que conforman el estado del animal como una variable aleatoria que se distribuye según una distribución normal, siempre y cuando se tienda a crear lotes de forma lógica basándose en la fecha de nacimiento de los animales y la variedad genética.

Las variables que definen el estado del animal en el periodo de engorde se pueden modelar con dos vertientes: por medio de modelos mecanicistas o modelos empíricos (Kure, 1997). Los modelos mecanicistas son modelos deterministas que normalmente se componen por un gran número de parámetros difíciles de interpretar y manipular como lo son procesos fisiológicos, leyes físicas y químicas propias de la naturaleza (Moughan, Verstegen et al., 1995). Los modelos empíricos son modelos estadísticos que describen la relación de las variables a través del tiempo, con variables estocásticas (cuyas variaciones también son modeladas) que son fáciles de observar y cuyos parámetros son más sencillos de estimar.

De esta manera el lote es considerado como una población, donde las variables se distribuyen a través del tiempo y se pueden estimar por medio de un modelo estadístico (Giesen et al.1988; Castro et al., 2000). Las variables aleatorias implicadas que intervienen en la modelación por lote se distribuyen como una distribución normal, modelando el comportamiento del crecimiento del grupo de cerdos como conjunto (Kure, 1997; Castro et al., 1999).

En el modelo de Castro (2001) se dispone del valor de todas las variables que componen el estado del lote de animales para las diferentes semanas de engorde (Castro et al., 2000). Para cuantificar el crecimiento de los cerdos en la etapa de engorde, tradicionalmente se usa el índice de conversión (Ridgeon, 1993). Este índice está definido como la cantidad de pienso requerido por el cerdo para aumentar un kilogramo de peso. Con lo anterior, se definen las variables que intervienen en el modelo de crecimiento.

- Peso vivo de los animales (LW, de Live weight)
- Consumo acumulado de pienso (FI, de Feed Intake)

El valor de estas variables es determinado por una función que depende del tiempo en el periodo de engorde. El valor de esta función representará el valor medio del grupo de cerdos. Cada función deberá ir acompañada de otra función que determine el valor de la desviación de la población para ese lote de animales. Tenemos que ambas variables siguen una distribución normal.

$$\mu_{LW} = f_pes(t, TG); \sigma_{LW} = f_desv_pes(t, TG);$$

$$\mu_{FI} = f_consum(t, TG); \sigma_{FI} = f_desv_consum(t, TG);$$

$\forall t >$ semana inicial del periodo de engorde

$$LW_t \sim N(\mu_{LW}, \sigma_{LW})$$

$$FI_t \sim N(\mu_{FI}, \sigma_{FI})$$

$\forall t >$ semana inicial del periodo de engorde.

Las curvas de crecimiento y consumo de pienso están en función de la genética del animal (TG), además de condiciones del entorno donde se lleve a cabo el periodo de engorde (de Castro 2001, Whittemore y Kyriazakis, 2006). En la Figura 3.1 tenemos un ejemplo de la evolución del peso vivo semanal de un lote de cerdos, podemos observar la variación natural presente en el crecimiento del lote de animales representada por la desviación estándar de la distribución normal para cada semana del periodo de engorde. Los cerdos que no tienen el peso promedio, es decir los más pesados y los más ligeros se encuentran en los extremos de las colas de la distribución normal. En el lote podemos encontrar animales que rápidamente obtienen el peso y condiciones óptimas para ser enviados a matadero, también encontramos animales que se encuentran rezagados en su tasa de crecimiento. Cada semana

que los cerdos pasan en las instalaciones representa costos de producción para el porcicultor. Estipulando lo anterior podemos concretar que esta variación en el lote de cerdos es importante en el modelo y representa una complejidad en la toma de decisión.

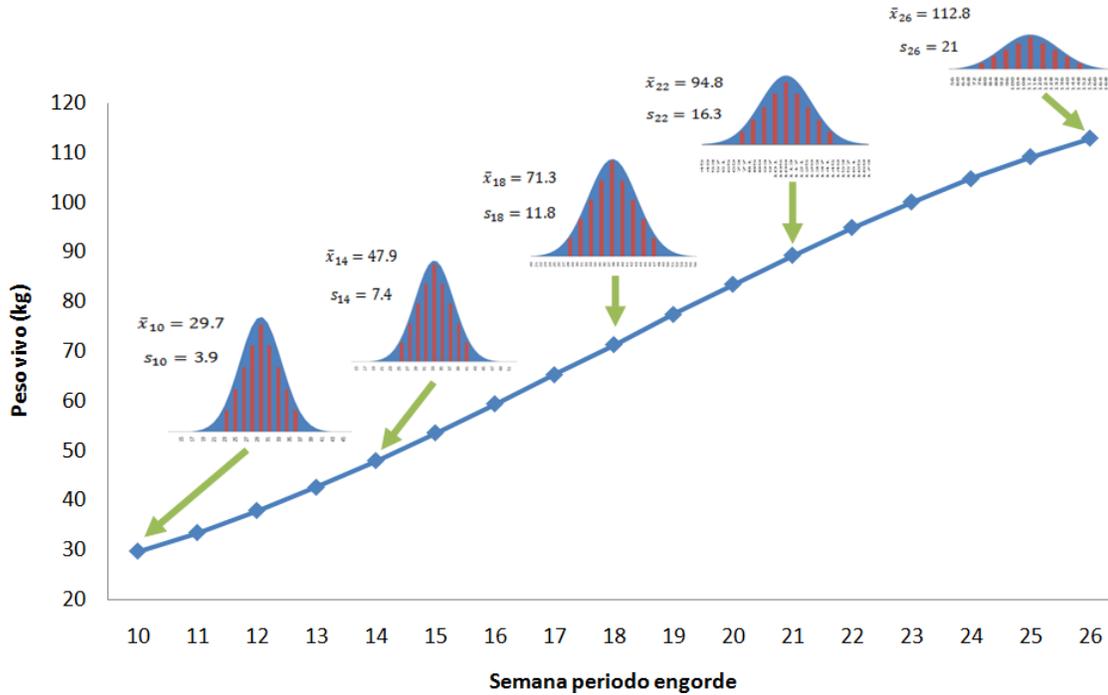


Figura 3.3. Evolución del peso vivo del lote de animales en función del tiempo.

Aparte modelar el crecimiento, es posible estimar el consumo de pienso de los cerdos mediante el cual podemos calcular factores correspondientes a la producción como lo son el precio de la alimentación y el consumo con el tiempo. La Tabla 3.3 resume los coeficientes de los modelos de regresión de crecimiento promedio y la desviación estándar correspondiente a través del tiempo, así como para el consumo semanal. Los datos para cada semana correspondientes a estos coeficientes se pueden encontrar en la sección de anexos de esta tesis.

	m_t	s_t	R^2
Media peso (kg/semana)	5.4870	-27.4544	0.9978
Desviación estándar peso (kg/semana)	1.0938	-7.7308	0.9977
Media consumo (kg/semana)	13.939	-149.2132	0.9914
Desviación estándar consumo (kg/semana)	3.8735	-34.2352	0.9997

Tabla 3.2. Coeficientes del modelo de regresión lineal para la media y desviación estándar del crecimiento y consumo de alimento para lote de cerdos.

La práctica común del envío de cerdos al matadero se hace en condiciones de incertidumbre sobre peso de sacrificio y porcentaje de carne magra. Dado que estas características no son observables por el productor, la decisión de entregar a los cerdos al matadero es en base al peso vivo observado y examinando la tasa de crecimiento hasta que hay suficientes en cantidad y peso dentro de un rango óptimo para llenar un camión.

El modelo de crecimiento toma en cuenta variables que son importantes para determinar la calidad de la carne y las características del producto terminado. Estas variables son: el rendimiento esperado de la canal (peso de la canal/peso vivo) y porcentaje magro esperado (calidad de la canal), estas variables son no observables, pero se puede tener una estimación de su valor ya que van ligadas a la evolución del crecimiento de los cerdos. En la sección de anexos podemos encontrar la tabla que contiene el promedio y desviación estándar del porcentaje de magro de la canal y el porcentaje en relación al peso vivo correspondiente a cada semana del periodo de engorde.

3.1.1. Discretización del modelo de crecimiento

El modelo biológico de crecimiento de de Castro (2001) descrito anteriormente, nos da como información la distribución de la población de cerdos con respecto a su peso medio esperado para diferentes semanas del periodo de engorde. Se pretende realizar un manejo de la variabilidad existente presente en el crecimiento del lote de cerdos. Se define que la decisión clave es determinar el porcentaje de animales destinado para el envío a matadero. Para determinar esta decisión, se recurre a realizar una discretización semanal de las distribuciones normales proporcionadas por el modelo de crecimiento. Esto con el objetivo de introducir la información del modelo de crecimiento como parámetros al modelo de decisión.

Al realizar un envío de animales al matadero para determinada semana del periodo de engorde, la distribución normal con la evolución del peso vivo sufre una alteración con respecto a la distribución determinada para la siguiente semana. Esto debido, a que la distribución inicial de la población de animales en la granja ha cambiado. Con la finalidad de reducir este error, se realiza un procedimiento para realizar la discretización semanal por medio de la función de distribución de una normal truncada (de Castro, 2001).

La distribución normal truncada se define como:

Si $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, entonces truncando X por debajo de A y por encima de B se da lugar a la variable aleatoria de media

$$E(X) = \mu + \frac{\sigma(\varphi_1 - \varphi_2)}{T}, \quad (3.1.1)$$

$$\text{donde } T = \Phi\left(\frac{B-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{A-\mu}{\sigma}\right),$$

$$\text{con } \varphi_1 = \varphi\left(\frac{A-\mu}{\sigma}\right), \varphi_2 = \varphi\left(\frac{B-\mu}{\sigma}\right),$$

y φ es la función de densidad de una variable normal estándar.

Aplicando la ecuación (3.1.1) podemos conocer el peso promedio esperado de cada partición, y así reducir el error generado al realizar un envío de animales que representa un lote completo de animales. De esta manera, el resultado de los cálculos realizados con esta distribución para cada periodo semanal son los parámetros que se incluyen en el modelo de programación lineal entera mixta.

En la Figura 3.1.1 podemos observar el comportamiento del crecimiento de los cerdos por medio de las distribuciones normales. Cada normal representa la distribución del peso de la población de cerdos para las últimas seis semanas del periodo de engorde, generalmente en estas semanas es cuando se efectúa la comercialización de los cerdos. En cada semana se considera la misma partición para la distribución.

El cálculo de la media de la normal truncada correspondiente a cada elemento de la partición se va actualizando a través de las semanas. De esta forma, el modelo representa el número de animales existentes en cada partición y la evolución de su peso medio. También considera los factores productivos referentes a los gastos de alimentación de los cerdos, además de los factores de la demanda al tomar en cuenta la distribución de los porcentajes magros y rendimiento de la canal que permiten saber las bonificaciones o penalizaciones que un grupo de animales obtendría por el empacador.

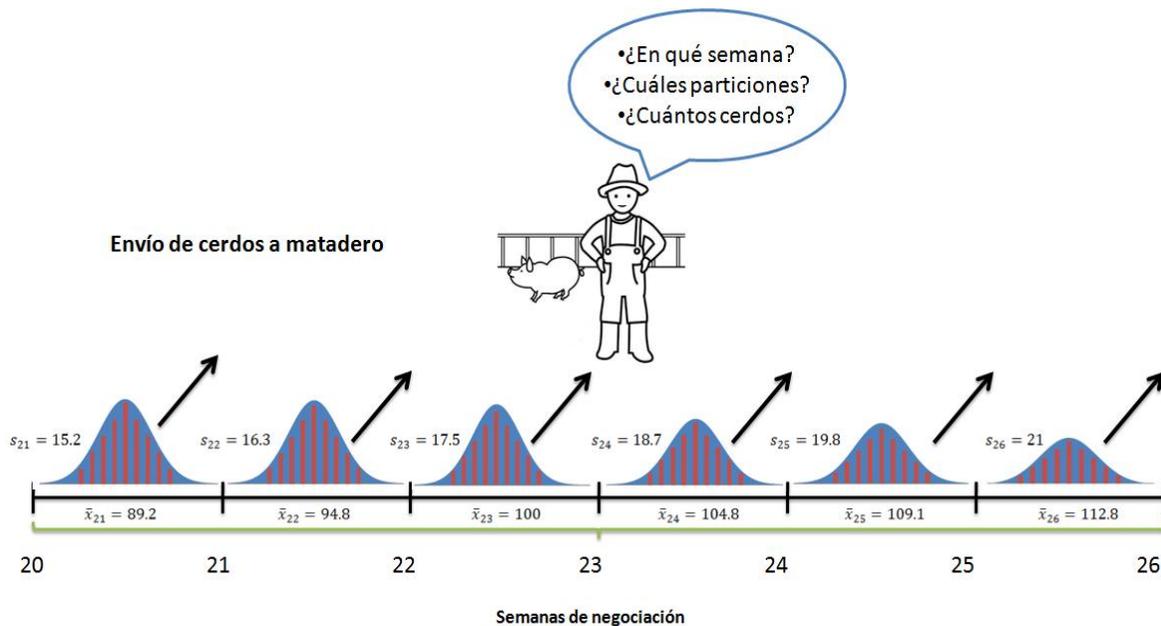


Figura 3.1.1. Representación de las distribuciones normales de peso medio esperado de los cerdos para las últimas seis semanas de negociación aplicando la discretización semanal y una partición en deciles.

3.2 FORMULACIÓN DEL MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

En esta sección presentamos formalmente el modelo determinista utilizando programación lineal entera mixta. Este modelo determinista determina la forma de realizar de los envíos de cerdos al matadero asumiendo que se tiene con certeza el conocimiento de los parámetros implicados. Para el modelo definimos la siguiente notación:

P = conjunto de particiones realizadas a la distribución normal de peso medio esperado,

T = conjunto ordenado de semanas del periodo de engorde.

Consideramos el conjunto P desde la primer partición (1) con los animales más ligeros hasta la última ($|P|$) con los animales más pesados y el conjunto T desde la primer semana de engorde (1) hasta la última semana del periodo de engorde ($|T|$). Sobre estos conjuntos, definimos los siguientes parámetros requeridos para el modelo:

N = número de cerdos en existencia al inicio del periodo de engorde,

q_p = porcentaje de cerdos en la partición p al inicio de la etapa de engorde,

w_{pt} = promedio de peso vivo correspondiente a la partición p en la semana t del periodo de engorde,

C = capacidad del camión en término de número de animales,

f = costo por kilogramo de pienso,

s = costo de transporte por enviar los animales al matadero,

c_t = consumo promedio de pienso de los cerdos en la semana t del periodo de engorde,

b_{pt} = bonificación o penalización por kilogramo ofrecida por el empacador si el cerdo está en la categoría de porcentaje magro l en la categoría de peso de canal m ,

g = precio de venta por kilogramo de peso vivo ofrecida por el empacador.

Las variables de decisión del modelo son definidas como:

x_{pt} = número de cerdos enviados al matadero de la partición p vendidos en la semana t ,

n_{pt} = número de cerdos en la partición p disponibles al inicio de la semana t ,

y_t = número entero de camiones requeridos para el envío al matadero en la semana t ,

d_t = costos semanales de alimentación de los cerdos a la semana t ,

$$h_{pt} = \begin{cases} 1 & \text{si se envían cerdos de dos particiones consecutivas } (p \text{ y } p + 1) \text{ en la semana } t, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

$$c_{pt} = \begin{cases} 1 & \text{si existen ventas determinadas de la partición } p \text{ en la semana } t, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

La función objetivo del modelo está dada por:

$$\text{Max } Z = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} x_{pt} w_{pt} (g + b_{pt} - f c_t) - \sum_{t \in T} s y_t \quad 3.2.1.$$

Las restricciones para el modelo son las siguientes:

$$n_{p,1} = N q_p, \quad \forall p \in P, \quad 3.2.2.$$

$$\sum_p x_{p,t} \leq C y_t, \quad \forall t \in T, \quad 3.2.3.$$

$$x_{p,t} \leq n_{p,t} + N(1 - h_{p,t}), \quad \forall p \in P, t \in T, \quad 3.2.4.$$

$$x_{p,t} \geq n_{p,t} + N(1 + h_{p,t}), \quad \forall p \in P, t \in T, \quad 3.2.5.$$

$$n_{p,t+1} = (n_{p,t} - x_{p,t}), \quad \forall p \in P, t \in T \cup T, \quad 3.2.6.$$

$$n_{p,|T|} - x_{p,|T|} \leq 0, \quad \forall p \in P \quad 3.2.7.$$

$$x_{p,t} \leq N(c_{p,t}), \quad \forall p \in P \cup P, t \in T, \quad 3.2.8.$$

$$h_{p,t} \leq c_{p,t}, \quad \forall p \in P \cup P, t \in T, \quad 3.2.9.$$

$$d_{p,t} + d_{p+1,t} \leq 1 + h_{p+1,t}, \quad \forall p \in P \cup P, t \in T, \quad 3.2.10.$$

$$x_{p,t}, n_{p,t}, \quad \forall p \in P, t \in T, \quad 3.2.11.$$

$$y_t \geq 0, \quad \text{entera,} \quad \forall t \in T, \quad 3.2.12.$$

$$h_{p,t}, c_{p,t} \geq 0, \quad \text{binaria,} \quad \forall p \in P, t \in T. \quad 3.2.13.$$

La función objetivo (3.2.1) pretende determinar el máximo beneficio para el productor, esta función contempla la ganancia adquirida por el número de cerdos a enviar de la partición en la partición p en la semana t , más la bonificación adquirida por enviar cerdos de la categoría de porcentaje magro y en la categoría de peso de canal correspondiente, menos los costos totales de alimentación durante el periodo de engorde y transporte para realizar los envíos.

Las ecuaciones (3.2.2) - (3.2.13) son las restricciones implicadas que conforman el modelo de Programación Lineal Entera Mixta. La restricción (3.2.2) realiza la distribución de la población de cerdos en cada partición al inicio del periodo de engorde $t = 1$, tenemos que esta distribución es siguiendo la distribución normal $w_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1)$. La restricción (3.2.3) hace cumplir que la capacidad del transporte respecto al número de animales no sea sobrepasada, generalmente es entre 200 a 240 animales dependiendo el peso vivo. La restricción (3.2.4) y (3.2.5) indican el número de cerdos que pueden ser enviados a matadero de la partición p en la semana t , la variable $x_{p,t}$ está acotada por $n_{p,t}$. El modelo por naturaleza permite enviar animales en cualquier semana del periodo de engorde, sin embargo la gradilla con penalizaciones y bonificaciones pagadas al poricultor funcionan como un control interno en el modelo. De esta manera, los cerdos más ligeros representan una penalización en la función objetivo y los más pesados son la mejor opción para realizar el envío a matadero. La variable binaria $h_{p,t}$ se utiliza para detectar cuándo i and $(i-1)$ -growth category at time t are sent to the abattoir, then $h_{it}=1$, otherwise $h_{it}=0$. This way all pigs remaining in the i -growth category at week t has to be sold before pigs of the lighter growth category $(i-1)$ can be also selected. La restricción (3.2.5) realiza la actualización de los animales disponibles para ser enviados en la semana $t + 1$ del periodo de engorde. Ya que estamos trabajando con el sistema AIAO, la restricción (3.2.6) nos indica que la instalación debe quedar vacía al final del periodo de engorde.

Las restricciones (3.2.8) - (3.2.10) son introducidas con el objetivo de realizar ventas de particiones contiguas, de manera que los envíos de animales a matadero sean homogéneos. Previamente se ha introducido la variable hit que detecta el momento donde hay ventas consecutivas de la partición p y $p + 1$. Agregando la variable dit en la restricción (3.2.8) indica el momento del periodo de engorde en el que se realiza un envío a matadero. Para complementa la anterior restricción tenemos las restricciones (3.2.9) y (3.2.10).

Las restricciones (3.2.11) y (3.2.13) definen la naturaleza de las variables de no negatividad e integrabilidad.

Capítulo 4

RESULTADOS

En este capítulo se presenta la experimentación computacional realizada con el modelo propuesto en el capítulo anterior, los resultados obtenidos y el alcance. Dicho modelo ha sido planteado para maximizar la ganancia del poricultor, enfocado en la etapa de engorde de cerdos y envío a matadero.

Primero, se describirán los parámetros de entrada requeridos en el modelo de Programación Lineal Entera Mixta. Posteriormente, se presentarán los resultados y aplicaciones derivadas con la experimentación realizada mostrando la utilidad del modelo.

La experimentación realizada se llevó a cabo con parámetros comunes que se presentan en la industria porcina española. Los datos requeridos por el al modelo de crecimiento se han extraído de la tesis de de Castro (2001), y se presentan en la sección de anexos de este trabajo. El modelo de Programación Lineal Entera Mixta se resuelve utilizando el software OPL Studio/CPLEX versión 12.4.

Las pruebas computacionales con el modelo de Programación Lineal se realizaron con los parámetros que se muestran en la Tabla 4.1. Consideramos una granja con capacidad de almacenamiento para 1000 cerdos y la duración total del periodo de engorde está comprendida por 17 semanas. La capacidad del transporte para 250 animales con un costo por envío de 1280.00 €. Tomamos en cuenta inicialmente un precio de venta fijo por kilogramo de cerdo de 1.097 €, y un costo fijo por kilogramo de pienso de 0.4 €. Definimos nueve categorías de porcentaje magro ($|L| = 9$ y ocho categorías de peso de canal magro ($|M| = 8$). Respecto a las particiones sobre la distribución de peso vivo del lote de cerdos, se realizaron diferentes instancias que se describirán más adelante.

Parámetro	Unidad	Valor
Stock inicial de la granja	Número de Cerdos	1000
Precio de venta	€/kg Cerdo vivo	1.097
Costo transporte	€/Camión	600
Capacidad transporte	Numero cerdos/Camión	240
Costo alimento	€/kg pienso	0.4

Tabla 4.1. Parámetros de entrada para instancias del modelo de Programación Lineal Entera Mixta.

El consumo de pienso de cada animal corresponde a la cantidad de pienso consumido esperado en función de la edad. Suponemos que para los animales que consumieran más pienso que la media, se compensa con el ahorro que se logra con los animales que consumen por de bajo la media. Usando el caso anterior, el pienso consumido por la totalidad del lote corresponderá al de la media. Aunque el modelo de crecimiento también proporciona la desviación estándar de esta variable, no se utiliza para esta hipótesis.

Con la finalidad de tener más información referente a la forma de efectuar los envíos se calculó el promedio de peso total por envío y el índice de conversión, El índice de conversión de alimento se define como la relación entre el crecimiento del cerdo y la cantidad de pienso que consume. Si el índice de conversión es mayor de tres, nos señala que los animales están consumiendo más alimento del esperado en relación del peso obtenido (García y Henao, 1986).

Para presentar las instancias realizadas con el modelo descrito en el Capítulo 3 enumeraremos dos casos. El primer caso es haciendo uso de las restricciones (3.2.2) - (3.2.6), y el tercer caso corresponde a la totalidad de las restricciones. El tiempo computacional requerido para resolver las instancias con los diferentes casos fue en promedio de 0.6 segundos.

Caso I.

Presentaremos las pruebas realizadas con el primer caso. Inicialmente las particiones a la distribución normal de peso vivo inicial del lote de cerdos se realizaron en deciles (10% cada una), es decir con diez percentiles. No se estableció ninguna restricción en lo referente a prioridades de envío ni peso mínimo.

Los resultados preliminares obtenidos para la instancia con deciles son enviar cuatro camiones llenos en la semana 1, 12, 13 y 15 (Tabla 4.2), el valor de la función objetivo fue de 48,154.92 €.

Es importante observar el peso promedio con el que son realizados los envíos también presentes en la Tabla 4.2. Podemos ver que los cerdos enviados al matadero en la semana 1, 12 son muy pequeños. Este nos indica, que para el consumo que tienen estos animales el precio de venta y el costo del pienso no es conveniente para el productor mantenerlos en la instalación a semanas posteriores. Calculando el peso promedio de envío para esta instancia obtuvimos un peso promedio de 90.97 kg, además calculamos el índice de conversión que fue de 2.44 kg.

Semana		1	12	13	15
Partición					
1	Cerdos	100			
	Peso	50.59			
2	Cerdos	100			
	Peso	58.97			
3	Cerdos	50	50		
	Peso	63.31	78.90		
4	Cerdos				100
	Peso				97.57
5	Cerdos			100	
	Peso			92.75	
6	Cerdos			100	
	Peso			96.85	
7	Cerdos			50	50
	Peso			101.10	112.03
8	Cerdos		100		
	Peso		99.50		
9	Cerdos				100
	Peso				124.33
10	Cerdos		100		
	Peso		115.84		
Cerdos enviados		250	250	250	250
Coste por incremento de kg.		0.9119	0.875	0.8074	0.7547
Camiones		1	1	1	1

Tabla 4.2. Envío de cerdos a matadero correspondiente al modelo de Programación Lineal Entera Mixta y el modelo de crecimiento de de Castro con una ganancia de 52,130.00 €.

Caso II.

Envío de cerdos a matadero con pesos comerciales homogéneos y particiones contiguas.

De la experimentación presentada en el caso I, tenemos que los envíos de cerdos se realizaron en semanas tempranas del periodo de engorde. Bajo el contexto de cadena de suministro, el empacador establece pesos mínimos para la recepción de cerdos a sacrificar. Introducimos la ecuación (3.2.7) en el modelo de decisión descrita en el Capítulo 3.2 para cumplir con estas especificaciones, esta cota de pesos se puede ajustar dependiendo las características del mercado.

El granjero es incapaz de distinguir visualmente los diferentes deciles de la población, pero le es posible identificar a simple vista los más pesados. Por este motivo, una solución práctica realista debe basarse en el envío a matadero de los animales de la explotación más pesados en cada momento.

Además, el empacador condiciona la recepción de cerdos con peso y porcentaje magro uniforme. De la Tabla 4.2 observamos que los cerdos enviados a matadero en la semana 12 tienen un peso de 78.90 a 115.84 kg correspondientes a las particiones tres, ocho y diez. Para la semana 15 los cerdos tienen un peso de 97.57 a 124.33 kg de las particiones cuatro, siete y nueve, para ambos casos los cerdos enviados son de particiones no contiguas y el peso promedio de los envíos no son homogéneos.

De la situación anterior, introducimos en el modelo de decisión las restricciones (3.2.8) - (3.2.12) descritas en la Sección 3.2 con la finalidad que los cerdos enviados a matadero sean de particiones contiguas con peso y porcentajes magro homogéneo.

Presentamos los resultados obtenidos al introducir esta restricción para la instancia de particiones con deciles y los parámetros especificados en la Tabla 4.1. La ventana temporal de decisión se redujo a las últimas 6 semanas del periodo de engorde, ya que por la experiencia se sabe que en estas es donde se toman las decisiones de envío de cerdos a matadero.

Semana		12	13	14	15	16	17
Partición							
1	Cerdos						100
	Peso						75.95
2	Cerdos						100
	Peso						90.86
3	Cerdos				50		50
	Peso				92.13		98.57
4	Cerdos				100		
	Peso				97.57		
5	Cerdos				100		
	Peso				102.44		
6	Cerdos		100				
	Peso		96.85				
7	Cerdos		100				
	Peso		101.09				
8	Cerdos		100				
	Peso		105.84				
9	Cerdos		100				
	Peso		111.82				
10	Cerdos		100				
	Peso		123.37				
Cerdos enviados			500		250		250
Coste por incremento de kg.							
Camiones			2		1		1

Tabla 4.3. Envío de cerdos a matadero con envío de cerdos de pesos comerciales y de particiones contiguas.

Los envíos al establecer esta restricción se realizan en las semanas 13, 15 y 17. Con los datos del modelo de crecimiento que se disponen, los animales más ligeros para el primer 10% de nuestra partición solo alcanzan a pesar un promedio de 75.95 kg, esto es, nunca alcanzarán un peso superior a 90 kg. Es por eso, que el modelo toma decisiones para todas las particiones excepto la primera. Dejamos a consideración del modelo decidir el momento adecuado para realizar el envío de estos animales ligeros, debido a que dichos cerdos puede generar más costos en la instalación que enviarlos en alguna semana más temprana.

El peso promedio para esta configuración de envíos es de 99.68 kg. Como podemos ver en la Tabla 4.3 al aplicar la cota mínima para efectuar los envíos (en este caso 90 kg), los cerdos son enviados con un peso de 90.86 a 123.37 kg a excepción de los cerdos del primer decil por lo explicado anteriormente. Además observamos que los cerdos son enviados de particiones contiguas. El valor de la función objetivo fue 87,529.92 € y el índice de conversión de 2.43 kg.

1. Experimentación con veinte particiones.

Se realizó una instancia con partición más fina considerando veinte percentiles, es decir particiones de 5% para la distribución de peso vivo del lote de cerdos en la granja. Los resultados obtenidos fueron muy similares a la instancia con deciles, el número de camiones requeridos para realizar las entregas son cuatro en las semanas 13, 16 y 17 (Tabla 4.1.1). La ganancia conseguida fue de 86,140.19 €.

En cuanto al promedio de peso con el que se realizaron los envíos de animales a matadero, tenemos resultados similares a los realizados con la instancia por deciles. Podemos observar en la Tabla 4.1.1 que el intervalo de peso para la semana 13 son de 69.48 a 96.92 kg, donde tenemos que algunos de los cerdos son aún muy ligeros. El peso promedio total para esta configuración de envíos es de 97.85 con índice de conversión de 2.34 kg, muy similar a la instancia anterior.

Semana	13		16		17	
Cerdos	50		50		50	
Intervalo de particiones enviadas	1	5	6	10	11	20
Intervalo de peso	69.48	96.92	97.25	107.86	95.82	128.36
Total de cerdos	500		250		250	
Camiones	2		1		1	

Tabla 4.1.1. Número de cerdos enviados del percentil p a enviar al matadero en la semana t , instancia con veinte particiones en la distribución de peso vivo.

2. Experimentación refinando la partición en las colas de la distribución de peso.

Con el objetivo de tener un mejor manejo de la variabilidad extrema del crecimiento de los animales, se realizaron particiones más finas en las colas de la distribución normal. Esto debido, a que en las colas de la distribución de peso se encuentran los animales más pesados y los más ligeros que en definitiva permiten adelantar o retrasar la venta de sus coetáneos. La partición utilizada para esta instancia y el número de cerdos que se encuentran en cada partición para una granja con stock inicial de 1000 animales se muestra en la Tabla 4.2.1.

Partición	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	95%	100%
Número de cerdos	50	50	50	50	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50

Tabla 4.2.1. Particiones realizadas a la distribución normal de peso vivo para la población de cerdos, refinando la partición en las colas.

En esta instancia se obtuvo un valor objetivo de 92,9632.54 €, un peso promedio enviado de 98.50 kg y un índice de conversión de 2.32 kg. Al observar el valor de la función objetivo podemos apreciar que es mayor a la registrada para las particiones con diez y veinte particiones, esto es debido a que realizar particiones más finas en las colas nos permite tener una mejor contabilización de las ganancias y costos de alimentación referente a los animales más pesado y más ligeros.

Semana		12	14	15	16
Partición					
1	Cerdos				50
	Peso				68.26
2	Cerdos				50
	Peso				80.44
3	Cerdos				50
	Peso				86.27
4	Cerdos				50
	Peso				90.57
5	Cerdos			50	
	Peso			92.13	
6	Cerdos			100	
	Peso			97.57	
7	Cerdos			100	
	Peso			102.44	
8	Cerdos		100		
	Peso		102.20		
9	Cerdos		100		
	Peso		106.76		
10	Cerdos	50	50		
	Peso	99.50	111.85		
11	Cerdos	50			
	Peso	103.43			
12	Cerdos	50			
	Peso	106.73			
13	Cerdos	50			
	Peso	111.20			
14	Cerdos	50			
	Peso	118.26			
Cerdos enviados		250	250	250	250
Camiones		1	1	1	1

Tabla 4.2.2. Envío de cerdos a matadero con envío de cerdos de pesos refinando particiones en las colas de la distribución normal de peso vivo.

3. Experimentación con categorías de consumo

Para aprovechar la información ofrecida por el modelo de crecimiento, se realizaron categorías de consumo. La hipótesis implicada con estos parámetros es referente a que los animales más pequeños consumen menos pienso y los más pesados consumen más. Se procedió a realizar tres categorías de consumo, particionando las normales de consumo promedio a 30% 70% y 100%.

Los resultados obtenidos por el modelo de decisión son los mismos que se obtuvieron para el caso II (Tabla 4.3). La diferencia respecto a estos resultados los tenemos en el valor de la función objetivo, ya que utilizando categorías de consumo dicho valor fue de 88,429.36 €.

El considerar esta hipótesis nos permite tener un mejor control referente a los costos de consumo de los animales, dichos costos son de los más impactantes en la función objetivo y en la producción de cerdos. El utilizar estas categorías nos representa 1,100.00 € de incremento contra la ganancia con la hipótesis del consumo promedio. A diferencia del caso del consumo promedio, esta hipótesis permite evaluar de mejor los costos de consumo para los cerdos más pesados.

4. Experimentación con ventana de negociación

Se redujo el número de semanas posibles para envío de cerdos al matadero de 6 a 4. La ampliación del período de engorde significa más opciones disponibles en la toma de decisión (Figura 4.4.1). El tener más semanas de negociación permite enviar un mejor promedio de peso (Figura 4.4.2), además las ganancias también son mejores (Figura 4.4.3). No hay que descartar el trabajar con un periodo corto de semanas de negociación, si bien hemos visto que los cerdos son enviados con peso menor y retribuye menos ganancia para el poricultor, nos permite empezar antes la inserción de un nuevo lote de cerdos en la granja de engorde. Esto puede resultar benéfico para el poricultor en cuanto a la planeación de la producción de cerdos de engorde a lo largo del año.

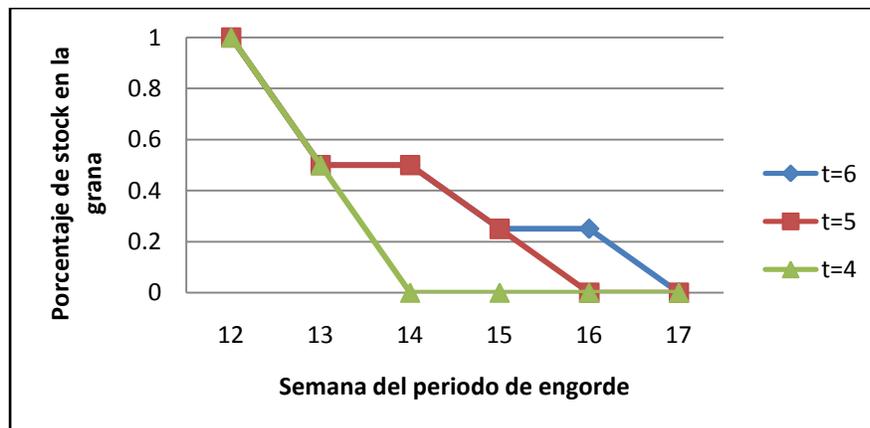


Figura 4.4.1. Distribución de la granja de engorde para diferentes ventanas de negociación.

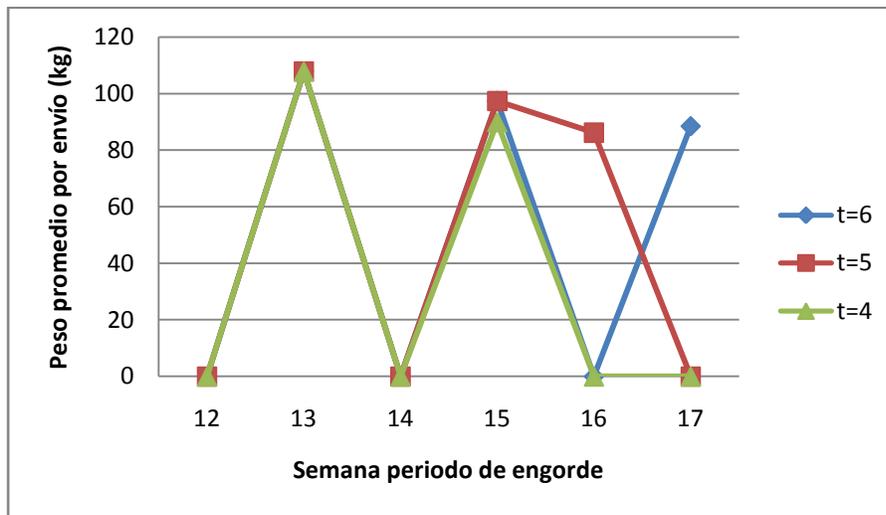


Figura 4.4.2. Peso promedio semanal enviado a matadero para diferentes ventanas de negociación.

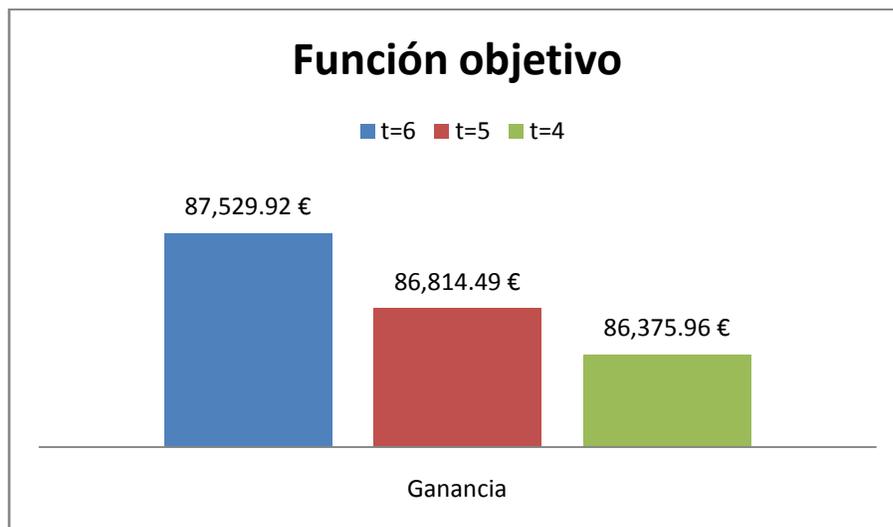


Figura 4.4.3. Valores de la función objetivo para diferentes ventanas de negociación

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta que nos ayuda a determinar el comportamiento de la función objetivo y decisiones ante diferentes variaciones en los parámetros del modelo. En el mundo real el comportamiento de dichos parámetros presenta un comportamiento dinámico, es indispensable estudiar los efectos que causa la variación de los parámetros en las soluciones que representan los diferentes escenarios que se pueden presentar en la industria porcina. Además que es importante verificar la robustez del modelo para ser utilizado como herramienta de aplicación a casos prácticos.

Realizamos pruebas aplicando diferentes variaciones a los parámetros del modelo de decisión, los cuales nos ayudaron a determinar el comportamiento lógico de las soluciones arrojadas por el modelo y el comportamiento de las mismas.

5. Análisis de sensibilidad: experimentación con precio de venta por kilogramo de cerdo.

En los últimos 20 años se ha presentado una variación en los precios de venta por kilogramo de cerdo en peso vivo. Se realizó experimentación con estos precios promedio registrados, tomando en cuenta el precio más bajo y el más alto. Podemos observar que la función objetivo sufre un decremento e incremento proporcional al precio de venta fijo. Se realizó esta experimentación con la instancia de diez percentiles, manteniendo los mismos parámetros de la Tabla 4.1.

En cuanto a la forma de realizar los envíos (Figura 4.5.1), vemos que a medida en que la ganancia fija es menor, los envíos se realizan en semanas más tempranas del periodo de engorde y esto afecta en el peso promedio enviado y el índice de conversión (Tabla 4.4.1). Observamos los cambios en el peso promedio enviado (Figura 4.5.2) y en la función objetivo (Figura 4.5.4) que son proporcionales a tener una ganancia mayor o menor. En la Figura 4.4.2, podemos ver el comportamiento de los costos semanales por incremento de kilogramo para las diferentes instancias.

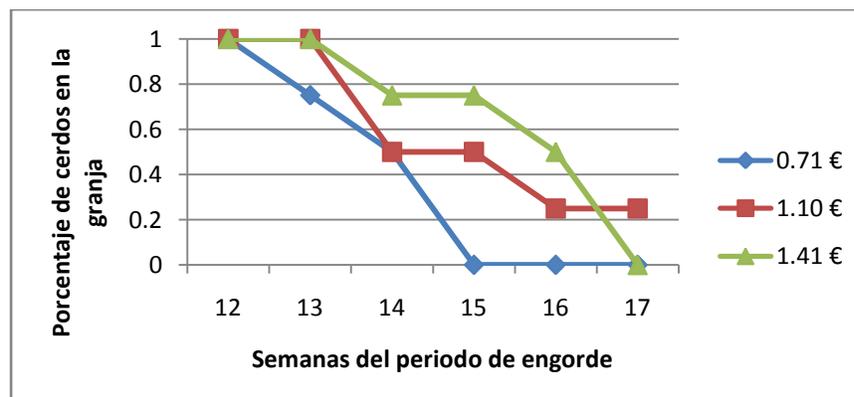


Figura 4.5.1. Distribución de la granja de engorde para diferentes precios de venta fijo.

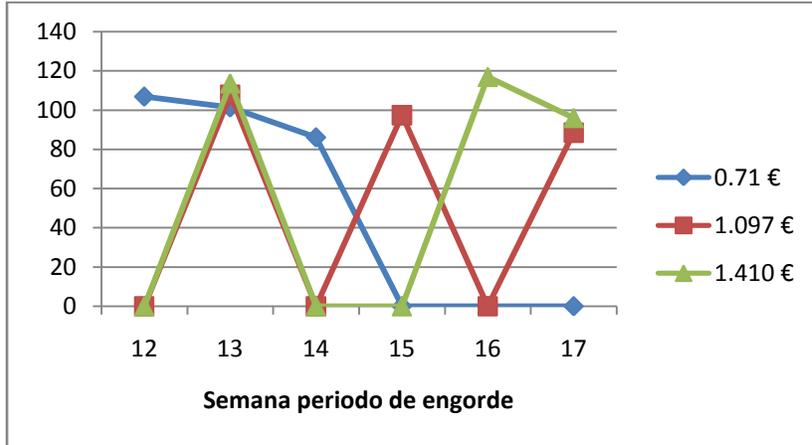


Figura 4.5.2. Peso promedio semanal enviado a matadero para diferentes precios de venta fijo.

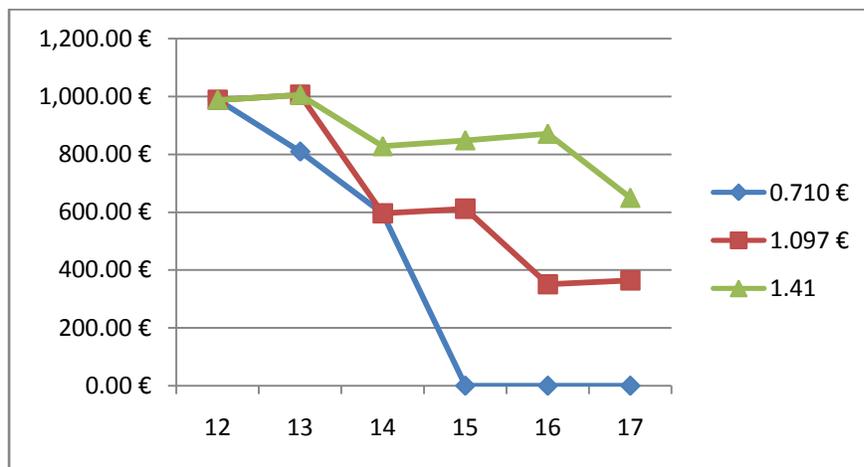


Figura 4.5.3. Costo promedio por incremento de kilogramo de peso vivo semanal para diferentes precios de venta fijo.

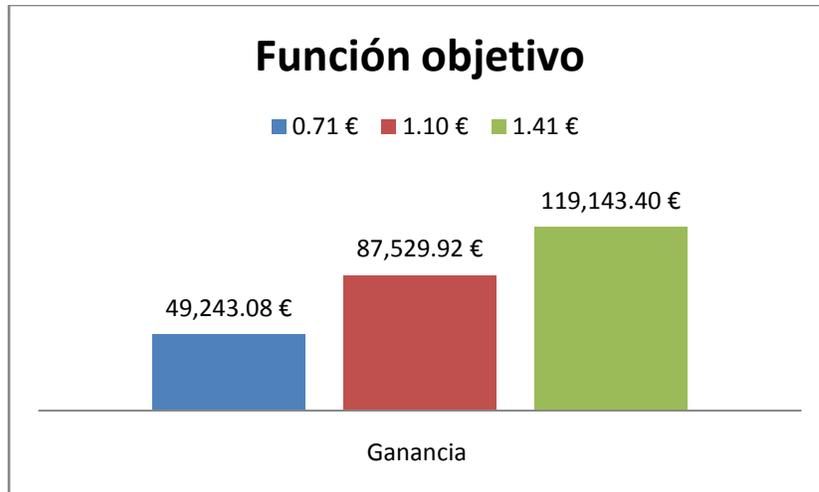


Figura 4.5.4. Valor de la función objetivo con diferentes precios de venta fijo.

Precio de venta	Índice de conversión	Peso promedio enviado
0.71 € (-3%)	3.228 kg	98.47 kg
1.41 € (+3%)	2.622 kg	101.92 kg

Tabla 4.5.1 Índice de conversión y peso promedio enviado con precio fijo de +3% y -3% respecto al precio promedio.

6. Análisis de sensibilidad: experimentación con precios de venta variables semanales

En la industria porcina se presenta un fenómeno económico importante para las ganancias recibidas por el productor. Este fenómeno es la variabilidad de los precios de venta ofrecidos sobre el precio fijo por kilogramo de cerdo. Es por eso que decidimos realizar diferentes pruebas para observar los resultados del modelo de decisión al variar dichos precios a través de las diferentes semanas del periodo de engorde.

Se probaron un conjunto de instancias con series de precios crecientes, decrecientes, cóncavos y convexos para probar el comportamiento del modelo de decisión en cuanto al comportamiento variable de los precios de venta. Estas series de precios vienen expresados en la Tabla 4.6.1. El resto de los parámetros se utilizaron conforme a la Tabla 4.1.

Semana	Serie			
	Cóncava	Convexa	Creciente	Decreciente
21	1.07	1.13	1.10	1.20
22	1.11	1.08	1.14	1.15
23	1.11	1.05	1.16	1.12
24	1.16	1.04	1.19	1.11
25	1.15	1.04	1.22	1.09
26	1.13	1.04	1.25	1.05

Tabla 4.6.1 Series de precios de venta €/kilogramo de peso vivo de cerdo.

En las Figura 4.6.1 podemos ver cómo se realizan los envíos para estas series de precios, el modelo de decisión tiene soluciones sensibles respecto a los diferentes precios presentados. Cabe destacar que la diferencia entre los precios de una semana a otra es muy pequeña (0.05 € como máximo), la función objetivo muestra incrementos significativos a estos precios (Figura 4.6.3).

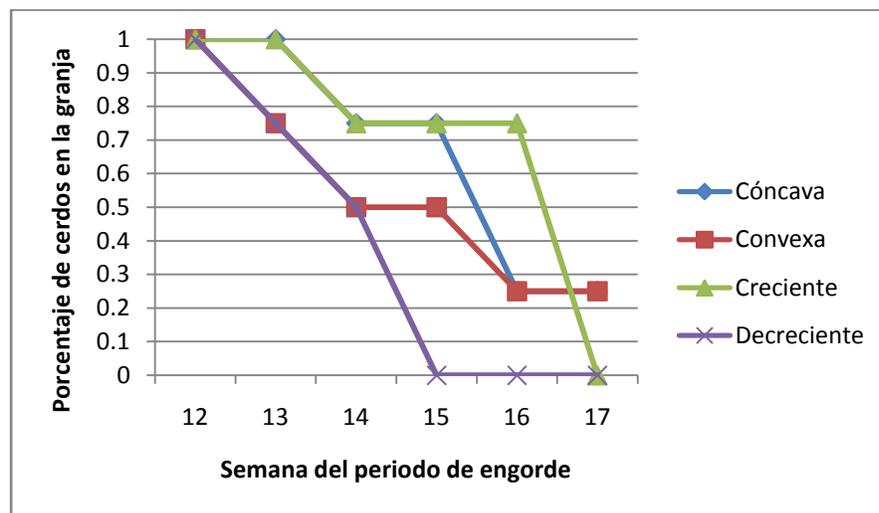


Figura 4.6.1. Distribución de la granja de engorde para diferentes series de precios de venta.

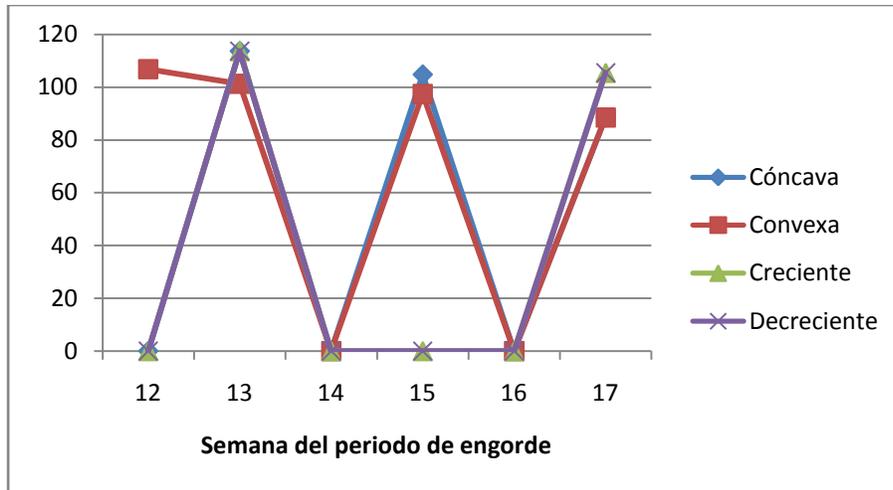


Figura 4.6.2. Peso promedio semanal enviado a matadero para diferentes series de precios de venta.

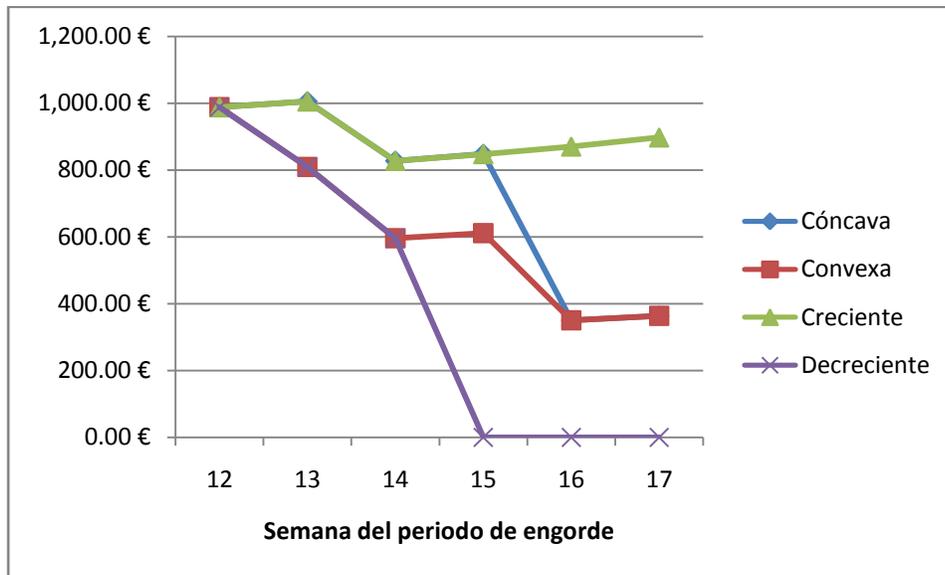


Figura 4.6.3. Costo promedio por incremento de kilogramo de peso vivo semanal para diferentes series de precios de venta.

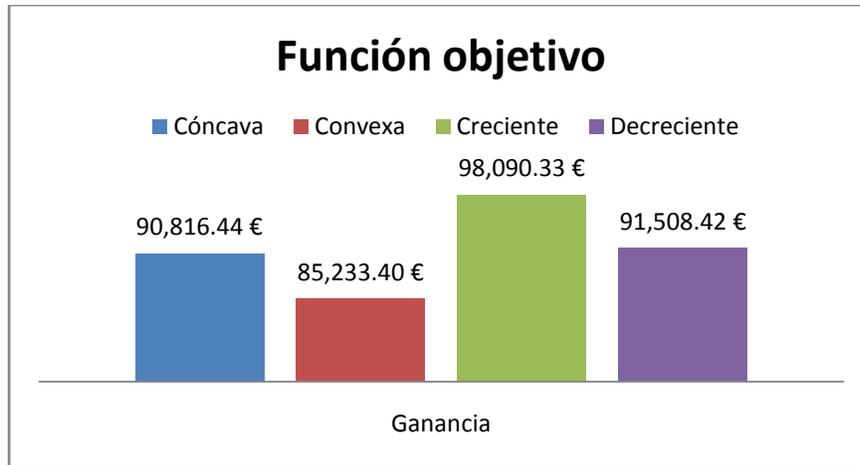


Figura 4.6.4. Valor de la función objetivo con diferentes precios de venta fijo.

7. Análisis de sensibilidad: experimentación con costos de alimentación

Debido a que los principales costos en la producción de cerdos son los costos de alimentación, se probó con cuatro diferentes costos de pienso (Tabla 4.7.1, el resto de los parámetros se utilizaron conforme a la Tabla 4.1.

De los resultados obtenidos tenemos las Figura 4.7.1 observamos que a menor costo de pienso, los animales tienen más oportunidad de permanecer en la instalación. A mayor costo de pienso, los animales son enviados a matadero en semanas más tempranas del periodo de engorde. Al igual que en el caso anterior, esto también se ve reflejado en el peso promedio enviado (Tabla 4.7.2) y el índice de conversión (Tabla 4.6.3). Al igual que en el caso anterior con las ganancias, el precio del pienso también es determinante en la función objetivo. Esto se puede concluir de la Figura 4.7.2, donde a mayor costo por kilogramo de pienso la función objetivo es menor.

Costo pienso	Variación respecto costo base
0.30 €	-2.50%
0.40 €	0%
0.50 €	2.50%
0.70 €	7.50%

Tabla 4.7.1. Costos por kilogramo de pienso.

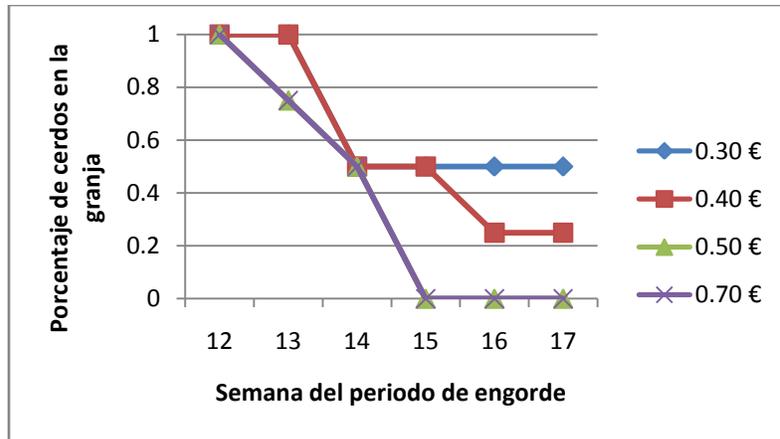


Figura 4.7.1. Distribución de la granja de engorde para diferentes costos de pienso.

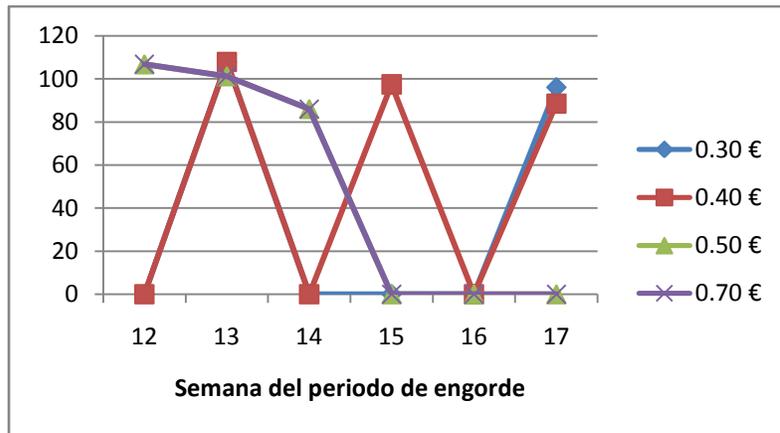


Figura 4.7.2. Peso promedio semanal enviado a matadero para diferentes costos de pienso.

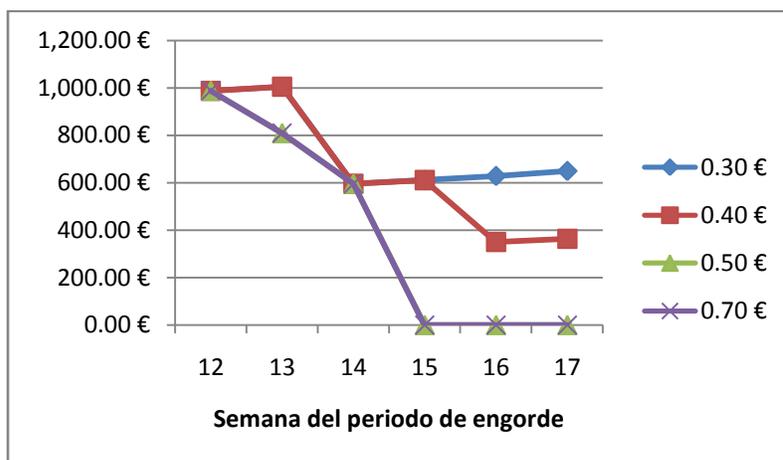


Figura 4.7.3. Costo promedio por incremento de kilogramo de peso vivo semanal para diferentes costos de pienso.

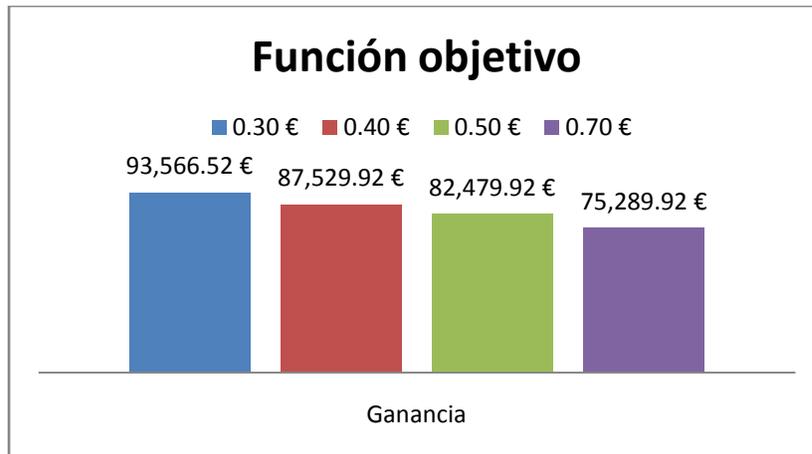


Figura 4.7.4. Valor de la función objetivo con diferentes costos de pienso.

Costo de pienso	Índice de conversión	Peso promedio enviado
\$0.30 (-2.5%)	2.95	98.03
\$0.7 (+0.75)	2.581	101.92

Tabla 4.7.2. Índice de conversión y peso promedio enviado con costo de pienso de -2.5% y +0.75% respecto al precio promedio.

8. Análisis de sensibilidad: experimentación con capacidad del camión

En cuanto a la capacidad del camión respecto al número de animales, se experimentó con cuatro tipos de camión que son chico, mediano, grande y extra grande. Tomando como base el tamaño normal con capacidad de 250 animales, los camiones chicos tienen un tercio menos de la capacidad del normal. Igualmente para el camión grande, cuenta con un tercio más que la capacidad del camión normal. El camión extra grande tiene un medio más de la capacidad del camión normal. Los costos y las capacidades están en la Tabla 4.8.1. Se utilizó un costo proporcional a la capacidad del transporte (mayor capacidad, mayor costo y menor capacidad menor costo).

Camión	Capacidad	Costo
Chico	160	642.00 €
Normal	250	1,285.00 €
Grande	330	1,713.33 €
Extra grande	375	1,927.50 €

Tabla 4.8.1. Capacidad y costo de camiones para realizar el envío a matadero.

Al utilizar un camión grande (capacidad de 300 animales) se requieren cuatro camiones para realizar la entrega de cerdos a matadero, si se usa un camión extra grande (capacidad de 375 animales), son requeridos tres camiones. En la Tabla 4.8.4 tenemos la manera en que se efectúan los envíos.

De esta experimentación y los resultados obtenidos, cabe resaltar la forma de efectuar los envíos a matadero. Ya que dependiendo de la capacidad del camión el modelo trata de llenar por completo el camión. Así se puede observar que hay animales de algunos percentiles que se dejan creciendo para semanas posteriores, y así realizar el envío más conveniente de manera que el camión vaya completo. Para la instancia realizada con el camión chico, vemos que la función objetivo presenta un incremento representativo debido a que se requieren más camiones para realizar los envíos (Figura 4.8.2).

Tipo camión		Grande			Extra grande		
		13	15	17	12	15	17
Semana							
Partición							
1	Cerdos			100			100
	Peso			75.95			75.95
2	Cerdos			100			100
	Peso			90.86			90.86
3	Cerdos			100			100
	Peso			98.57			98.57
4	Cerdos		100			100	
	Peso		97.57			97.57	
5	Cerdos	100				100	
	Peso	92.75				102.44	
6	Cerdos	100				100	
	Peso	96.85				107.16	
7	Cerdos	100			75	25	
	Peso	101.09			101.09	112.03	
8	Cerdos	100			100		
	Peso	105.84			105.84		
9	Cerdos	100			100		
	Peso	111.82			111.82		
10	Cerdos	100			100		
	Peso	123.37			123.37		
Cerdos enviados		500	100	300	375	325	300
Camiones		2	1	1	1	1	1

Tabla 4.8.2. Número de cerdos enviados del percentil p a enviar al matadero en la semana t con camiones de capacidad de 330 y 375 cerdos, instancia con deciles.

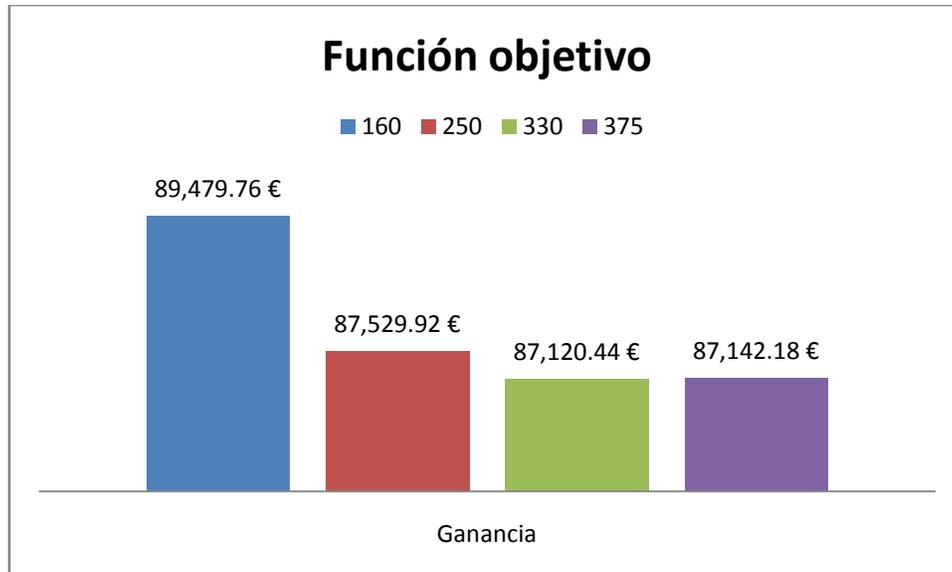


Figura 4.8.1. Valores para la función objetivo para diferentes capacidades en el transporte de cerdos para envío a matadero.

9. Comparación de resultados

Actualmente en la industria porcina el envío de cerdos a matadero se efectúa por medio de reglas heurísticas. Dichas reglas no consideran la variabilidad en el crecimiento del lote de cerdos ni las bonificaciones por porcentaje de magro impuestas por los empacadores. Una de estas reglas es la llamada regla 20/80 que consiste en vender los animales en dos partes. El primer envío consiste en vender al inicio de la ventana comercial del 10% al 20 % de los animales más pesados, y el segundo envío se realiza con el resto de los animales al final de la ventana comercial. Esta regla se practica comúnmente en Estados Unidos, su objetivo es maximizar la capacidad de crecimiento de los cerdos que siguen creciendo en la granja.

Comparamos nuestros resultados con la regla 20/80 y los resultados obtenidos por de Castro (2001). En la Tabla 4.9.1 podemos ver la distribución del matadero al realizar los envíos para cada práctica. Nuestro modelo también mejora el promedio de peso por envío (Figura 4.9.2), y un mejor control de los costos por incremento de peso vivo (Figuras 4.9.3). Lo anterior también se ve reflejado en el valor de la función objetivo (Figura 4.9.4), los resultados obtenidos por el modelo propuesto mejoran el resultado presentado por de Castro en 0.13% que representa 10,506.96 €. Cabe destacar, que tanto la regla 20/80 como el modelo de Castro no consideran el transporte para su toma de decisión.

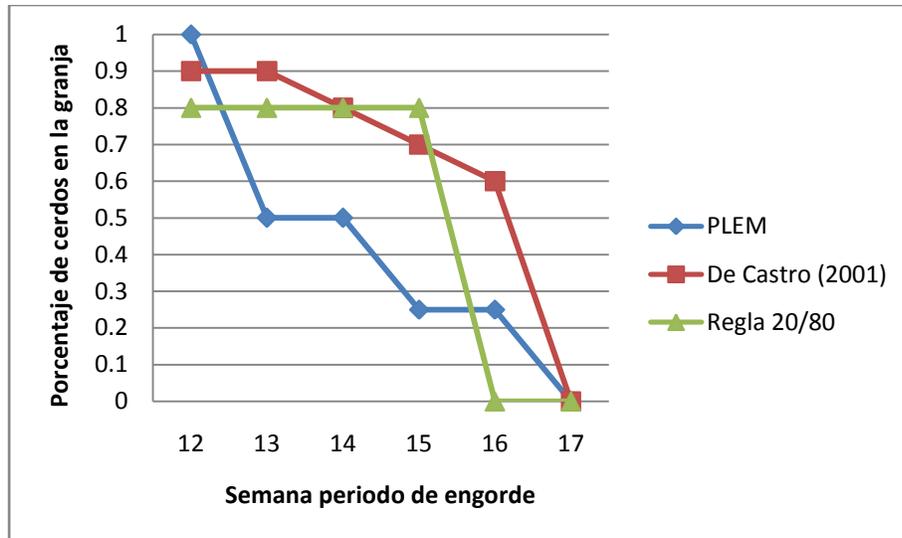


Figura 4.9.1. Distribución de cerdos en la granja de engorde, comparación de estrategias.

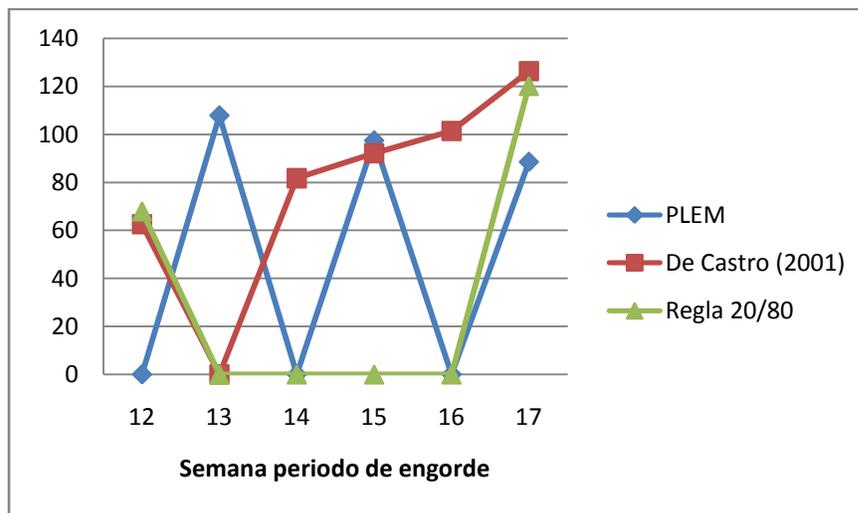


Figura 4.9.2. Peso promedio semanal enviado a matadero, comparación de estrategias.

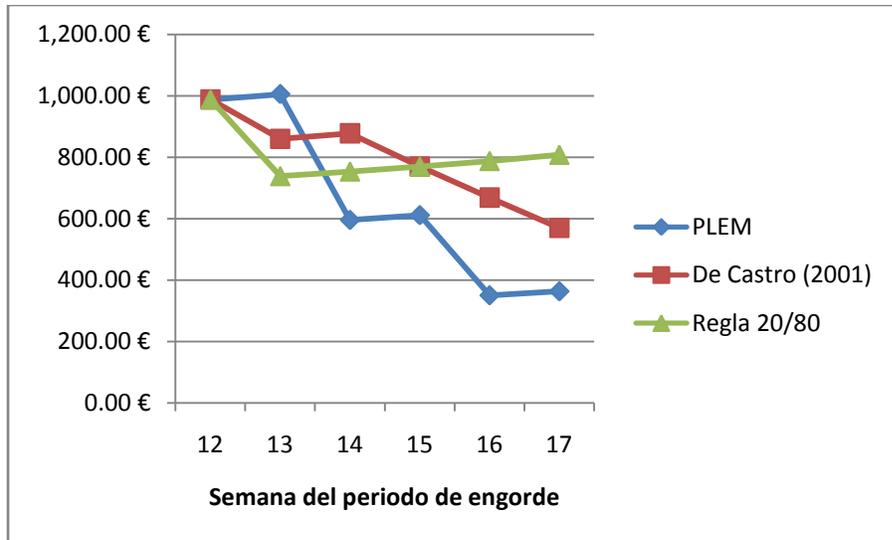


Figura 4.9.3. Costo promedio por incremento de kilogramo de peso vivo semanal, comparación de estrategias.

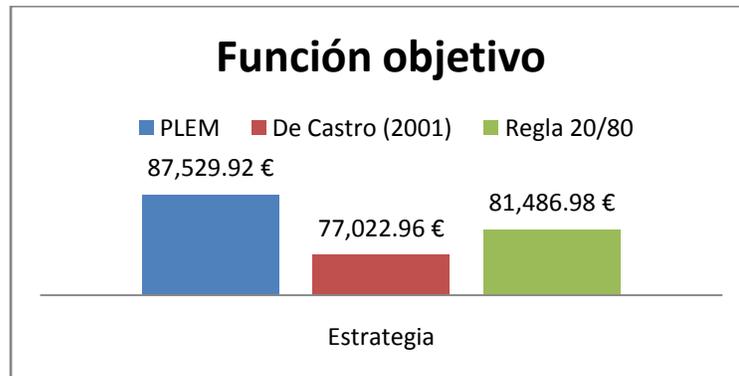


Figura 4.9.4. Valores para la función objetivo comparación de estrategias de envío de cerdos a matadero.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente trabajo abordamos el problema de optimización en el proceso de envío de cerdos al matadero. Para la formulación matemática de este problema utilizamos Programación Lineal Entera Mixta integrado un modelo empírico. Este modelo es por medio de una regresión lineal que captura la evolución del crecimiento de los cerdos. El emplear esta formulación nos permite manejar la variabilidad existente en el proceso de engorde del lote de los animales y además nos permite incorporar de manera más rápida y directa los parámetros necesarios para el modelo de decisión.

Bajo el planteamiento expuesto las decisiones que deben considerarse son cuándo enviar los cerdos al matadero, cuáles y cuántos enviar. El objetivo es maximizar la ganancia percibida por el porcicultor y proporcionar una solución que cumpla con las características del sistema de comercialización actual en la industria porcina. Entre estas características como lo son envío de cerdos por lotes homogéneos, requerimientos de peso y porcentaje magro mínimos de recepción de cerdos al matadero asimismo tomando en cuenta el transporte requerido para efectuar los envíos.

Se experimentó con una primera formulación considerando todo el periodo de engorde. Este modelo nos sirvió para probar la realidad económica en la que se encuentra el porcicultor, debido a que con el precio de venta y kilogramo de pienso que se presenta en la industria porcina actualmente los animales deben ser enviados a etapas tempranas del periodo de engorde. Esto nos llevó a introducir una restricción tomando en cuenta un peso mínimo que establecen los mataderos para recibir a los cerdos y sacrificarlos. Posteriormente se agregaron un conjunto de restricciones de manera que los animales enviados a matadero sean de rango con peso vivo homogéneo, esto también es un requisito del matadero.

5.1 Conclusiones

En base al estudio computacional realizado con las características de las instancias presentadas en el Capítulo 4 establecemos las siguientes conclusiones:

- a) La formulación del primer modelo de decisión nos permite ver la realidad económica actual del porcicultor, como consecuencia observamos que con los parámetros económicos actuales la solución determina que los cerdos sean enviados con pesos inferiores a los requeridos por el matadero.
- b) Se realizó la modificación del modelo al establecer una cota mínima de peso, con el objetivo que los cerdos enviados tengan los pesos específicos indicados por el empacador.
- c) Otro requisito establecido por el empacador es recibir lotes de cerdos con pesos uniformes. De los resultados que se obtuvieron no se cumplía con esta especificación, es por eso que se introdujeron restricciones efectuar envíos de cerdos de lotes contiguos.
- d) La utilización de diferentes percentiles para nuestra formulación, permite refinar las categorías de peso vivo y bonificación. Esto nos sirve para tener un mayor control sobre los costos de alimentación de los cerdos.
- e) Implementar una partición más fina sobre las colas de la distribución normal arrojó resultados similares que no realizarlas. Pero se obtuvo que el utilizar este refinamiento también nos permite manejar la variabilidad en la distribución de pesos de los cerdos, y un mayor control sobre el consumo de los animales.
- f) El consumo es un aspecto determinante en el modelo, el utilizar las categorías de consumo nos permite tener un mayor control sobre el consumo de los animales según su peso promedio.
- g) El precio de venta por kilogramo de cerdo ofrecido por el empacador es un parámetro sensible para nuestro modelo y en los valores de la función objetivo. Además, es importante considerar las ganancias semanales ya que es un parámetro variable en la industria porcina. Al tener un mayor precio de venta fijo por kilogramo de cerdo permite al granjero dejar crecer más semanas a los cerdos. Si el precio de venta fuese menor, es más conveniente para el granjero enviar a los cerdos en etapas más tempranas.
- h) Análogamente para los costos por kilogramo se presenta un fenómeno similar al del precio de venta. Este parámetro también es sensible en nuestro modelo, que repercute en las decisiones y la función objetivo. A mayor costo por kilogramo de pienso, los animales deben de ser vendidos a etapas tempranas del periodo de engorde. A menor costo de pienso se puede mantener los cerdos en la granja y es rentable venderlos con mayor peso.

- i) El modelo naturalmente busca enviar los camiones completos, es por eso que el considerar diferentes tipos de camiones afecta en la función objetivo. Si la capacidad no se ajusta mucho al stock inicial de la granja no se envían camiones llenos.
- j) La decisión óptima de nuestro modelo da lugar a la entrega de cerdos con más de semanas que la práctica habitual. Esto se debe a que probablemente a que los porcicultores no han contemplado aspectos económicos importantes. Dichos aspectos son la penalización y/o bonificación por kilogramo de peso vivo, costo de alimentación con cerdos de índice de conversión bajo, costos de transporte para el envío a matadero.
- k) Se desarrolló una herramienta computacional en OPL utilizando el solver CPLEX que resuelve el problema en envío de cerdos al matadero considerando los requerimientos del matadero, la variabilidad en el proceso de engorde y el transporte para realizar los envíos.
- l) El modelo desarrollado incorpora un modelo de crecimiento empírico y fácil de realizar que nos aporta la evolución del peso promedio, consumo, rendimiento de la canal y porcentaje magro de la canal de un lote de cerdos. Debido a esto se decidió utilizarlo para que esta información sirviera como parámetros de nuestro modelo de decisión.
- m) Compráramos los resultados obtenidos por nuestro modelo con la regla 20/80 utilizada actualmente en la industria porcina y los resultados presentados por de Castro (2001), resultado los nuestros mejores a los dos mencionados. Cabe mencionar que nuestro modelo incorpora el transporte a la toma de decisión.

5.2 Trabajo a futuro

El trabajo realizado hasta ahora ha permitido obtener resultados favorables en cuanto a la toma de decisión para envío de cerdos a matadero, hemos identificado algunos puntos que representan áreas de estudio abiertas para extender este problema a una problemática más real, los cuales mencionaremos a continuación.

1. Adecuar el modelo considerando una nave de engorde que cuenta con varios corrales para engorde de cerdos.
2. Extensión del modelo determinista a un modelo estocástico, donde la variable estocástica sea el precio de venta por kilogramo de cerdos. En la industria porcina se presenta variabilidad semana a semana en dicho precio. En base a los resultados obtenidos podemos observar que este parámetro es determinante en las ganancias percibidas por el porcicultor.
3. Ampliación del modelo determinista y estocástico contemplando varias granjas de engorde secuenciando el envío de cerdos cubriendo todo el año, de manera que el matadero no detenga su operación por no tener animales para su sacrificio.

APÉNDICE A

ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE CRECIMIENTO

Los datos requeridos para el modelo de crecimiento se han extraído de la tesis de de Castro (2001). El modelo biológico de crecimiento a través de una regresión lineal busca estimar la evolución del peso en función de la edad. El consumo de alimento, el porcentaje magro y el rendimiento de la canal están en función del peso.

Para mostrar la evolución del peso de los animales obtenidos por dicho modelo, se tiene la tabla donde se muestra el peso de la media de los animales con su correspondiente desviación estándar. La Figura 1 muestra gráficamente la evolución del peso vivo y el consumo acumulado en el periodo de engorde de los cerdos. Los datos presentados corresponden a una población de hembras y machos castrados.

De forma análoga al modelo de crecimiento, se puede realizar una estimación para el valor de las variables no observables como son el rendimiento de la canal y el porcentaje magro. Los valores se determinan a partir del conocimiento de la evolución del peso vivo del lote, ya que estas variables en el lote también siguen una distribución normal. En la tabla se muestran los resultados obtenidos para ambas variables, y de forma gráfica en las Figuras 2 y 3.

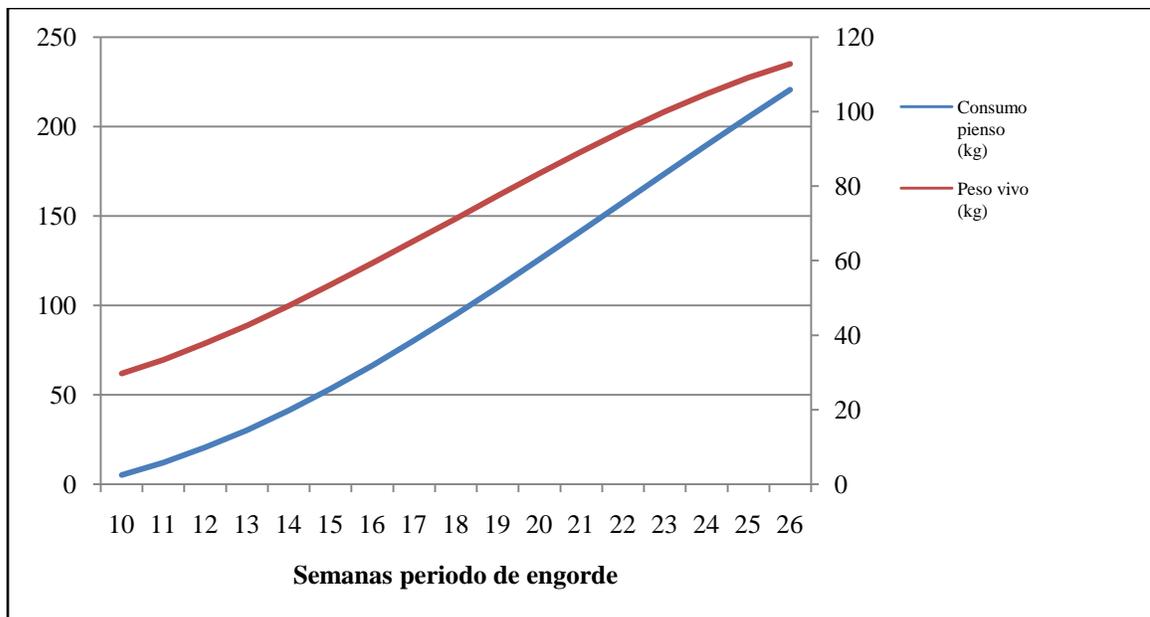


Figura 1. Evolución del incremento de peso vivo y consumo acumulado en función de la edad de un animal promedio. Fuente (de Castro, 2001).

t (semanas)	Peso(kg)		Consumo (kg)	
	media	desviación estándar	media	desviación estándar
10	29.7	3.9	5.1	5.5
11	33.4	4.6	12.1	8.5
12	37.8	5.4	20.5	12.1
13	42.6	6.3	30.2	15.9
14	47.9	7.4	41.3	19.7
15	53.5	8.4	53.4	23.6
16	59.3	9.5	66.4	27.5
17	65.3	10.6	80.3	31.4
18	71.3	11.8	94.9	35.3
19	77.4	12.9	110.1	39.2
20	83.4	14	125.7	43.2
21	89.2	15.2	141.6	47.1
22	94.8	16.3	157.6	51
23	100	17.5	173.7	54.9
24	104.8	18.7	189.6	58.9
25	109.1	19.8	205.3	62.8
26	112.8	21	220.6	66.7

Tabla 1. Evolución del peso y el consumo de pienso en función de las semanas de inserción en la explotación. Se expresa en la media y la desviación estándar de la distribución normal.
Fuente (de Castro, 2001).

Peso vivo (kg)	Porcentaje magro		Rendimiento medio de canal
	Media	desviación estándar	
50	61	5.9	78.79%
55	60.7	6	78.82%
60	60.4	6.2	78.84%
65	60.1	6.4	78.86%
70	59.8	6.6	78.88%
75	59.5	6.9	78.90%
80	59.1	7.1	78.93%
85	58.8	7.4	78.95%
90	58.5	7.7	78.97%
95	58.2	8	78.99%
100	57.9	8.4	79.02%
105	57.6	8.7	79.04%
110	57.3	9.1	79.06%
115	57	9.5	79.08%
120	56.7	9.8	79.10%
125	56.4	10.2	79.13%
130	56.1	10.6	79.15%
135	55.8	11	79.17%
140	55.5	11.4	79.19%
145	55.2	11.9	79.22%
150	54.9	12.3	79.24%
155	54.6	12.7	79.26%
160	54.3	13.1	79.28%
165	54	13.5	79.30%
170	53.7	14	79.33%
175	53.4	14.4	79.35%

Tabla 2. Evolución del porcentaje magro y rendimiento de canal en función del peso vivo de la población de cerdos. Fuente (de Castro 2001)

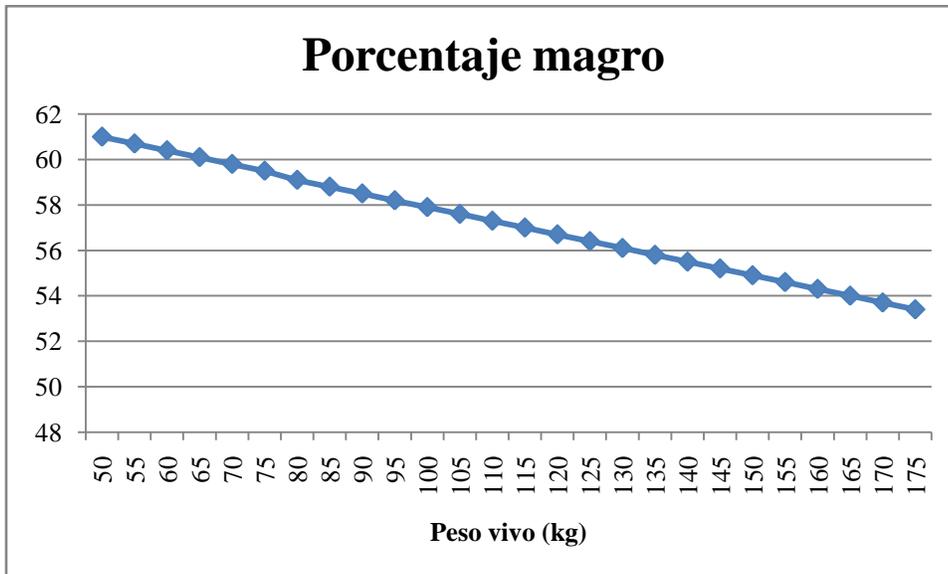


Figura 2. Evolución del porcentaje magro en función del peso vivo de la población de cerdos. Fuente: (de Castro, 2001).

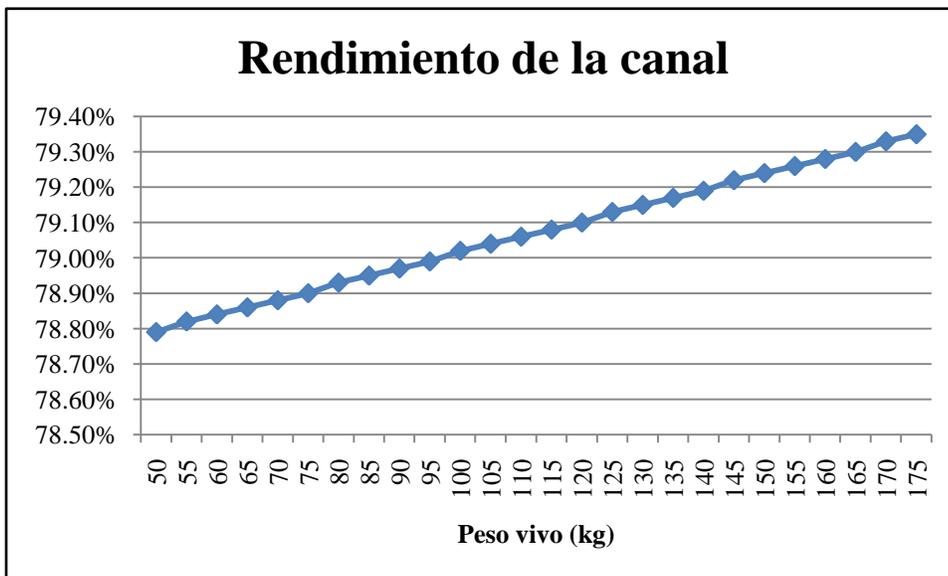


Figura 3. Evolución del rendimiento de la canal en función del peso vivo de la población de cerdos. Fuente: (de Castro, 2001).

APÉNDICE B

PREPROCESAMIENTO

B.1. DATOS PARA LA INSTANCIA DE ESTUDIO

Semana	Peso medio									
	Partición									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
10	22.86	25.63	27.06	28.19	29.21	30.19	31.21	32.34	33.77	36.54
11	25.33	28.59	30.28	31.62	32.82	33.98	35.18	36.52	38.21	41.46
12	28.32	32.16	34.14	35.71	37.12	38.48	39.89	41.46	43.44	47.27
13	31.54	36.02	38.33	40.17	41.81	43.39	45.03	46.87	49.18	53.64
14	34.91	40.17	42.89	45.04	46.97	48.83	50.76	52.91	55.63	60.87
15	38.76	44.73	47.81	50.25	52.44	54.56	56.75	59.19	62.27	68.22
16	42.63	49.38	52.87	55.63	58.10	60.50	62.97	65.73	69.22	75.95
17	46.70	54.23	58.12	61.20	63.96	66.64	69.40	72.48	76.37	83.88
18	50.59	58.97	63.31	66.74	69.81	72.79	75.86	79.29	83.63	91.98
19	54.76	63.92	68.66	72.41	75.77	79.03	82.39	86.14	90.88	100.01
20	58.83	68.78	73.92	77.99	81.64	85.16	88.81	92.88	98.02	107.94
21	62.52	73.32	78.90	83.33	87.28	91.12	95.07	99.50	105.08	115.84
22	66.19	77.77	83.76	88.50	92.75	96.85	101.10	105.84	111.83	123.37
23	69.29	81.72	88.15	93.24	97.80	102.20	106.76	111.85	118.28	130.67
24	71.98	85.27	92.13	97.57	102.44	107.16	112.03	117.47	124.33	137.58
25	74.35	88.42	95.69	101.45	106.61	111.59	116.75	122.51	129.78	143.81
26	75.95	90.86	98.58	104.68	110.15	115.45	120.92	127.02	134.74	149.61

Tabla 1. Peso promedio por partición en función de las semanas del periodo de engorde.

Semana	Consumo/Kg por categoría		
	Pertencil		
	30%	70%	100%
10	2.40	5.10	11.46
11	2.36	7.00	11.63
12	4.23	8.40	12.57
13	5.30	9.70	14.10
14	6.70	11.10	15.50
15	7.58	12.10	16.62
16	8.48	13.00	17.52
17	9.38	13.90	18.42
18	10.08	14.60	19.12
19	10.68	15.20	19.72
20	10.96	15.60	20.23
21	11.38	15.90	20.42
22	11.48	16.00	20.52
23	11.58	16.10	20.62
24	11.26	15.90	20.53
25	11.18	15.70	20.22
26	10.78	15.30	19.82

Tabla 2. Consumo promedio por partición en función de las semanas del periodo de engorde para instancia con categorías de consumo.

Semana	% Magro									
	Partición									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	62.64	62.47	62.39	62.32	62.26	62.20	62.14	62.07	61.98	61.82
11	62.49	62.29	62.19	62.11	62.04	61.97	61.90	61.82	61.72	61.52
12	62.31	62.08	61.96	61.87	61.78	61.70	61.62	61.52	61.40	61.17
13	62.12	61.85	61.71	61.60	61.50	61.41	61.31	61.20	61.06	60.79
14	61.92	61.60	61.44	61.31	61.19	61.08	60.96	60.84	60.67	60.36
15	61.68	61.33	61.14	60.99	60.86	60.74	60.61	60.46	60.27	59.92
16	61.45	61.05	60.84	60.67	60.52	60.38	60.23	60.07	59.86	59.45
17	61.21	60.76	60.52	60.34	60.17	60.01	59.85	59.66	59.43	58.98
18	60.97	60.47	60.21	60.01	59.82	59.64	59.46	59.25	58.99	58.49
19	60.72	60.17	59.89	59.67	59.46	59.27	59.07	58.84	58.56	58.01
20	60.48	59.88	59.57	59.33	59.11	58.90	58.68	58.44	58.13	57.53
21	60.26	59.61	59.28	59.01	58.77	58.54	58.31	58.04	57.71	57.06
22	60.04	59.34	58.98	58.70	58.45	58.20	57.94	57.66	57.30	56.61
23	59.85	59.11	58.72	58.42	58.14	57.88	57.60	57.30	56.91	56.17
24	59.69	58.89	58.48	58.16	57.86	57.58	57.29	56.96	56.55	55.76
25	59.55	58.71	58.27	57.92	57.61	57.31	57.00	56.66	56.22	55.38
26	59.45	58.56	58.10	57.73	57.40	57.08	56.76	56.39	55.93	55.03

Tabla 3. Porcentaje magro por partición en función de las semanas del periodo de engorde.

	Peso canal									
Semana	Partición									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	17.96	20.14	21.27	22.16	22.96	23.74	24.54	25.43	26.56	28.73
11	19.91	22.48	23.81	24.86	25.81	26.72	27.66	28.72	30.05	32.62
12	22.27	25.29	26.85	28.09	29.19	30.27	31.38	32.61	34.18	37.19
13	24.80	28.33	30.15	31.59	32.89	34.14	35.43	36.88	38.70	42.22
14	27.46	31.60	33.74	35.44	36.96	38.43	39.95	41.65	43.79	47.93
15	30.49	35.19	37.62	39.55	41.28	42.95	44.67	46.60	49.04	53.74
16	33.54	38.86	41.61	43.79	45.75	47.64	49.59	51.77	54.53	59.85
17	36.74	42.69	45.76	48.19	50.38	52.49	54.67	57.11	60.19	66.13
18	39.82	46.43	49.86	52.57	55.00	57.35	59.78	62.50	65.93	72.54
19	43.11	50.34	54.09	57.05	59.71	62.28	64.94	67.91	71.67	78.91
20	46.32	54.18	58.24	61.46	64.35	67.14	70.03	73.26	77.33	85.20
21	49.24	57.77	62.19	65.69	68.82	71.86	75.00	78.50	82.93	91.47
22	52.14	61.29	66.03	69.79	73.15	76.41	79.77	83.53	88.28	97.45
23	54.58	64.42	69.51	73.54	77.15	80.65	84.27	88.30	93.41	103.26
24	56.71	67.22	72.67	76.98	80.84	84.58	88.44	92.76	98.22	108.76
25	58.59	69.72	75.48	80.05	84.14	88.10	92.20	96.77	102.55	113.71
26	59.85	71.66	77.77	82.61	86.96	91.16	95.50	100.36	106.49	118.34

Tabla 4. Peso de canal por partición en función de las semanas del periodo de engorde.

BIBLIOGRAFÍA

Agüero Monedero Juan Antonio (2003), Situación actual de los mercados porcinos: UE ampliada y terceros países, Ministerio de agricultura, pesca y alimentación de España (MAGRAMA) . Disponible en el sitio web:

http://www.coag.org/rep_ficheros_web/3b5a74c0037562a252e7e3f3b280bec4.pdf.

Babot D., Soldevila C., Cortés A., Álvarez J., García E., Lerrosa K., Noguera L., Contreras D., Blanco G. (2011), Informe del sector porcino informe 2011, Grupo gestión porcina Departamento de Producción Animal, Univesidad de Lleida. Disponible en el sitio web:http://www20.gencat.cat/docs/DAR/DE_Departament/DE02_Estadistiques_observatoris/08_Observatoris_sectorials/04_Observatori_porci/Informes_anuals/Fitxers_estatics/OP_In_f_Anual_2011_cast.pdf

Balogh, P., Ertsey, I., Fenyves, V., & Nagy, L. (2009). Analysis and optimization regarding the activity of a Hungarian Pig sales and Purchased Cooperation. *Studies in Agricultural Economics*, 109, 35-54.

BackUs, G., & Dijkhuizen, A. A. (2002). Kernkamp lecture: The future of the European pork chain. *Allen D. Leman Swine Conference*, Minnesota, USA, 8-11.

Boland, M. A., Preckel, P. V., & Schinckel, A. P. (1993). Optimal hog slaughter weights under alternative pricing systems. *Journal of Agriculture and Applied Economics*, 25(2), 148-163.

Bowersox, D. J. and D. J. Closs (1996). *Logistical Management (The integrated Supply Chain Proces)*. USA: Mc Graw Hill.

Boys, K. A., Li, N., Preckel, P. V., Schinckel, A. P., Foster, & K. A. (2007). Economic replacement of a heterogeneous herd. *American Journal of Agricultural Economics*, 89, 24-35.

Broekmans, J. E. (1992). Influence of price fluctuations on delivery strategies for slaughter pigs. *Dina Nota* no. 7, Copenhagen., 1-24.

Braña Varela, Diego (2001). Variación, Calidad y uso de Ractopamina en la cadena de producción de carne de cerdo, *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*.

Castro, R. d. X. Puigvert et al. (1999). “Un sistema de Ayuda a la Decisión para el análisis técnico económico de la Fase de Crecimiento en Ganado porcino.” *Información Técnica Económica Agraria* 20, pp 223-225.

Castro, R. d., X. Puigvert, et al. (2000). Economic Modelling of the fattening stage to make comparisons between different pig meat markets. Dins L. M. Pla and J. Pomar (Eds): *Symposium on pig herd management modeling and information technologies related*, Lleida, Irta - UdL.pp 9-16

Chavas, J. P., Kliebenstein, J., & Crenshaw, J. D. (1985). Modeling dynamical agricultural production response: The case of swine production. *American Journal of Agricultural Economics*, 67(3), 636-646.

de Castro Vila, Rodolfo. *Optimització del procés productiu d'engreixament del porcí. Un enfocament operatiu*. Directores: Dr. Joan Tibau I Font, Dr. Joaquim De Ciurana I Gay. Tesis doctoral. Universitat de Girona, Departament D'endinyeria Industrial, Àrea D'organització D'empreses. Mayo 2001.

Faostat (2012). Statistics of livestock primary in the section of Production. Downloadable from the webpage <http://faostat.fao.org/site/573/default.aspx#ancor>. Last access February 23th, 2012.

Forbes, C., Evans M., Hastings n., Peacock. *Statistical Distributions*, Fourth Edition. Wiley & Sons, Inc., Publication.

B. Fleischmann y H. Meyr. *Planning Hierarchy, Modeling, and Advanced Planning Systems*, volumen 11, Capítulo: Supply Chain Management: Desing, Coordination and Operation, 457-523. ELSEVIER, Amsterdam, Holanda, 2003.

García, F., y Henao F. (1986) Caracteres de importancia económica y su evaluación en porcicultura. *Revista veterinaria y zootecnia de caldas* 5, 54-61.

Giesen, G. W. J., W. H. M. Baltussen, et al. (1988). *Optimalisering van het afleveren van mestvarkens*. Den Haag, Lanbouw-Economisch Institut.

Gribkovskaia, I., Gullberg, B. O., Hovden, K., & Wallance, S. W. (2006). Optimization model for a livestock collection problem. *International Journal of Physical Distribution and Logistic Management*, 36(2), 136-152.

Hobbs, J. E., Kerr, W. A., & Klein, K. K. (1998). Creating international competitiveness through supply chain management: Danish pork. *Supply chain management: An International Journal*, 3(2), 68-78.

Hobbs, J. E., & Young, L. M. (2000). Closer vertical co-ordination in agri-food supply chains: a conceptual framework and some preliminary evidence. *Supply chain Management: An International Journal*, 5(3), 131-143.

Huffman, R.D. (2002), "Current and future technologies for the decontamination of carcasses and fresh meat", *Meat Science*, Vol. 62 No. 3, pp. 285-94.

Jørgensen, E. (1993). The influence of weighing precision on delivery decision in slaughter pig production. *Acta Agriculture Scandinavica, Section A, Animal Science*, 43, 181-189.

Kanis, E. and J. Koops (1990). "Daily Gain, Food Intake and Food efficiency in Pigs During the growing period." *Animal Production* 50, pp 353-364.

Keeler, G. L., Tokach, M. D., Goodband, R. D., Nelssen, J. L., & Langemeier, M. R. (1994). Assisting swine producers to maximize marketing returns. *Journal of Extension*, 32(1).

Kure, H. (1997) Optimal slaughter pig marketing. *Dutch/Danish symposium on Animal Health and Management Economics*, 39-47.

Kristensen, A.R, L.B. Nielsen, M.S. Nielsen (2012). Optimal slaughter pig marketing with emphasis on information from on-line live weight assessment. *Livestock Science*, 145(1), 95-108.

Li, N., Preckel, P., Foster, K., & Schinckel, A. (2003a). Analysis of economically optimal nutrition and marketing strategies for Paylean® usage in hog production. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 28(2), 272–286.

NRC. 1998. Nutrient Requirements of Swine, 10^a Edición revisada. National Research Council, National Academy Press.

Ministerio de agricultura, pesca y alimentación de España (MAGRAMA), El sector de la carne de cerdo en cifras, principales indicadores económicos en 2010. Disponible en el sitio web:

http://www.magrama.gob.es/app/vocwai/documentos/Adjuntos_AreaPublica/INDICADORES%20ECON%20MICOS%20CARNE%20DE%20CERDO%202010.pdf

Moughan, P. J., M. W. A. Verstegen, et al., Eds. (1995). Modelling Growth in the pig. Wageningen, EAAP publications.

Moughan, P.J., W.C. Smith, y G. Pearson (1987). Description and validation of a model simulating growth in the pig (20 – 90 kg liveweight). *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 30(4), 481-489.

Niemi, J. K. (2006). A dynamic programming model for optimising feeding and slaughter decisions regarding fattening pigs. *Agricultural and food science*, 15, 6-121.

Ohlmann, J., Jones, P., 2008. An integer programming model for optimal pork marketing. *Ann. Oper. Res.* 1–17. doi:[10.1007/s10479-008-0466-3](https://doi.org/10.1007/s10479-008-0466-3) URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-008-0466-3>.

Oppen, J., & Løkketangen, A. (2008). A tabu search approach for the livestock collection problem. *Computers and Operations Research*, 35(10), 3213-3229.

Ouden, M., Dijkhuizen, A. A., Huirne, R. B. M., & Zuurbier, P. J. P. (1996). Vertical Cooperation in Agricultural Production Marketing Chains, with special Reference to Product Differentiation in Pork. *Agribusiness*, 12, 277-290.

Perez, C., de Castro, R., & Font i Furnols, M. (2009). The pork industry: a supply chain perspective. *British Food Journal*, 111(3), 257-274.

Perez Dayan Daniel. Alimentacion hoy y en el año 2050, Simposium de la Carne Nuevo Leon, 2011.

Perez, M. P., Palacio, J., Santolaria, M. P., Aceña, M. C., Chacon, G., Calvo, J. H., Zaragoza, P., Beltran, J. A., & García-Belenger, S. (2002). Effect of transport time on welfare and meat quality in pigs. *Meat Science*, 61, 425-433.

Prida, B. Y G. Gutierrez (1996). *Logistica de aprovisionamientos*, Madrid: Mc Graw Hill.

Puigvert, X., J. Soler, et al. (2001). “The effect of breed slaughter weight and halotane genotype and carcass and health quality from Large White and Landrace Pigs.” *Livestock Production Science* Submitted .

Ridgeon, B. (1993). *The economics of pig production*. London, Farming Press.

Rodríguez, S. V., Albornoz, V., & Plà, L. M. (2009). A two stage stochastic programming model for scheduling replacements in sow farms. *TOP*, 17(1), 171-179.

Rodríguez, S. V. (2010). Models under uncertainty to support sow herd management in the context of the Pork Supply Chain Supply. Ph.D. Dissertation. Department of Mathematics. University of Lleida, Spain.

Schiefer, G. (2002), “Environmental control for process improvement and process efficiency in supply chain management – the case of the meat chain”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 78 No. 2, pp. 197-206.

Schinckel, AP, PV Preckel, ME Einstein. 1996. Prediction of daily protein accretion rates of pigs from estimates of fat-free lean gain between 20 & 120 kilograms live weight. *J. Anim. Sci.* 74:498:503.

Schinckel, A., & Craig, B. (2002). Evaluation of alternative nonlinear mixed effects models of swine growth. *The Professional Animal Scientist*, 18, 219–226.

Steenkamp, J. (1997), *Dynamics in Consumer Behavior with Respect to Agricultural and Food Products. Agricultural Marketing and Consumer Behavior in a Changing World*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Taylor, D. H. (2006). Strategic consideration in the development of lean agri-food supply chains: a case study of the UK pork sector. *Supply Chain Management: An International Journal*, 11(3), 271-280.

Trienekens, J., Petersen, B., Wognum, N., & Brinkmann, D. (2009). European pork chains. *Wageningen Academic Publishers*. ISBN 978-90-8686-103-3.

von Alvensleben, R. (1997), Consumer Behaviour, Agri-Food Marketing, Oxford, pp. 209-24.

Warris, P.D. (1998), "The welfare of slaughter pigs during transport", *Animal Welfare*, Vol. 7, pp. 365-81.

Whittemore, C. T., & Kyriazakis, I. (2006). *Whittemore's Science and Practice of Pig Production*. Blackwell's publishing. London.

Yuván, C., Ojeda, F., Herrera, R., Altunaga, N., Pérez, G., Moliner, J.L. (2008) Comportamiento productivo de cerdos en ceba alimentados con follaje fresco de *Morus alba* como sustituto parcial del concentrado. *Revista electrónica de Veterinaria*, 1695-7504.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Victoria Rebillas Loredo

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias
con especialidad en Ingeniería de Sistemas
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

**OPTIMIZACIÓN EN EL PROCESO DE
ENVÍO DE CERDOS DE ENGORDE AL
MATADERO**

Nací en San Pedro Garza García, Nuevo León el 7 de enero de 1989. Graduada en 2010 de la Universidad Autónoma de Nuevo León en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas como Licenciada en Matemáticas. En el año 2011 ingresé al Posgrado en Ingeniería de Sistemas en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la misma universidad en donde realicé este trabajo de tesis bajo la supervisión de la Dra. Sara Verónica Rodríguez Sánchez. Durante el ciclo agosto-diciembre del 2012 realicé una estancia de investigación referente a esta tesis en la ciudad de Lleida, Cataluña, España con colaboración del Dr. Lluís Miquel Plà Aragonés profesor investigador de la Universidad de Lleida en España.