

# Evaluación de políticas de reemplazo en granjas de explotación porcina de gran escala usando simulación

---

Marco A. Montufar Benítez\* +<sup>1</sup>  
Marco A. Serrato García\*  
Luis M. Plá Aragonés\*\*  
Diego Braña Varela\*\*\*



## RESUMEN

En este trabajo se presenta una aplicación de la simulación de eventos discretos (SED) usando ARENA™ en la administración de granjas reproductoras de gran escala. El objetivo principal del modelo de simulación es encontrar una política de remplazo que garantice el mejor desempeño económico de la granja. La única variante analizada en la política de remplazo fue el número de ciclos que se establece como permanencia para una cerda dentro del hato. Los ingresos considerados se producen por la venta de lechones y cerdas improproductivas, los costos son debidos a la alimentación de animales, compra de cerdas de remplazo, y a los gastos de operación de la granja. La naturaleza estocástica y la interdependencia entre varios elementos del sistema hacen idónea la aplicación de la técnica SED. El proceso productivo en estas granjas se dividió para su análisis en cuatro estados principales llamados: apareamiento, gestación, lactación y receso. El paso de las cerdas por cada uno de dichos estados fue modelado por probabilidades de transición no estacionarias (dependientes del ciclo). Las corridas de simulación se ejecutaron con datos de entrada recopilados en granjas españolas, además, el modelo fue validado y verificado con expertos del área de ciencia animal. Considerando la variable de respuesta *valor presente neto* (VPN), entre las políticas analizadas, la de mantener a las cerdas seis ciclos resultó la mejor. La flexibilidad del modelo para ser ajustado a distintas situaciones y su capacidad gráfica para visualizar los resultados son muy prometedoras en el proceso de gestión y de toma de decisiones en estos sistemas.

---

<sup>1</sup> marco.montufar@itesm.mx

\* Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Toluca, Estado de México, C.P. 50110, México

+ Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Estado de Hidalgo, C.P. 42184, México

\*\* Departamento de Matemáticas, Universidad de Lleida, 73, Jaume II, 25001, España

\*\*\* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Querétaro, C.P. 76280, México

## ABSTRACT

Through this research project, a discrete-event simulation (DES) on ARENA™ is performed. Such simulation is made on a large sow farm. The main objective of this research initiative is to identify the replacement policy that guarantees the best possible economic scenario for the farm under analysis. The main decision variable is the number of cycles allowed for the sows to remain within the herd. The incomes produced by this system correspond to the piglets and culled sows sales, while the outcomes correspond to the costs incurred by feeding the animals, acquisition of gilts and the operating costs incurred in the farm. The stochastic nature and interdependence between several factors in this system, position DES as an adequate tool for such analysis. The process was modeled through four stages, and the sow's movement between them is modeled through nonstationary transition probabilities, which are dependent on the cycle considered. The simulation was run by using data from Spanish farms, and the output data was evaluated through a Net Present Value (NPV) analysis. The results shown that considering six cycles is the best alternative in the farm management.

---

**Palabras clave:** Simulación, software ARENA™, administración de granjas, cerdas de reemplazo

**Keywords:** Simulation, ARENA™, Farm management, Sows replacement

## Introducción

La administración de una granja tecnificada multiplicadora de animales, es parte fundamental para el éxito de la cadena de abastecimiento de productos cárnicos. Las prácticas operativas llevan al éxito o fracaso a este sistema (Chavas et al, 1985). Una pregunta fundamental en dicha administración es, ¿qué secuencia de acciones producen el máximo desempeño del sistema de acuerdo a una cierta medida? (Glen, 1987) muestra algunos modelos matemáticos representativos de la dinámica de rebaños así como de su comportamiento reproductivo. (Huirne et al, 1993) muestra distintos modelos que se han usado en la producción lechera, pero no así en la producción de cerdos. [Plá, 2007] menciona que la programación lineal se ha utilizado con mayor frecuencia en la administración de rebaños vacunos, pero no es el caso en rebaños porcinos. La simulación (Singh, 1986) y modelos de cadenas semi-Markovianas (Plá, 2004) se han usado para planificar las instalaciones de alojamiento de cerdos, pero sin incluir consideraciones económicas. (Kristensen et al, 2004) propusieron un modelo markoviano de optimización del reemplazo basado en una formulación jerárquica útil para la solución exacta de modelos de gran tamaño. Por último, (Plá, 2009) plantea una formulación de programación lineal para un modelo semi-Markoviano que trata de resolver el problema de la planificación de instalaciones, donde el reemplazo de cerdas se hace bajo una política instantánea. En la actualidad existe dos políticas de reemplazo de cerdas comúnmente usadas, una consiste en reemplazar a la cerda improductiva de manera inmediata ya sea comprando la de reemplazo o incorporándola desde una camada criada en la misma granja y adecuada para tal propósito, el

principal inconveniente de esta política es que las operaciones en la granja se tornan diversas en un mismo periodo de tiempo. La segunda política de reemplazo consisten en hacer un reemplazo por “bandas” o lotes ya que las operaciones en la granja se vuelven más homogéneas en el tiempo. Cualquier cambio en la política de reemplazo impactará en el potencial productivo de la manada y en su comportamiento poblacional, por lo que interesará evaluar la robustez de las soluciones antes de implantarlas en la realidad a través de medidas que permitan considerar políticas suficientemente buenas, aunque no óptimas.

## Desarrollo: Formulación del problema y conceptualización del modelo

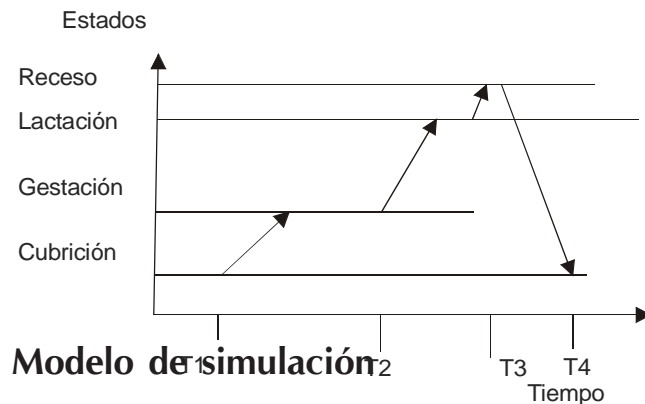
La toma de decisiones en la planeación de sistemas pecuarios de producción en México no ha sido ampliamente soportada por métodos cuantitativos dinámicos y estocásticos hasta la fecha (Braña, 2010). La descripción de la dinámica de la granja por medio de un modelo de simulación fue la manera seleccionada en este trabajo para entender el sistema que nos interesa, ya que este tipo de modelación tiene la característica de ayudarnos a representar relaciones complejas entre los elementos del sistema, además de permitirnos seguir su evolución a través del tiempo por medio de la animación. La construcción de un modelo de simulación (Law, 2008 y Kelton, 2010) es útil para comparar y validar los resultados de modelos analíticos, pero en muchas ocasiones es la única manera de resolver el problema, dada la robustez y flexibilidad de esta herramienta. (Goldsman, 2010) ha dicho “lo lamento

mucho, pero la simulación ha demostrado por mucho tiempo ser una de las herramientas de mayor uso, incluso que las técnicas tradicionales de optimización”.

En esta sección nuestra intención es comprender y resolver un problema comúnmente planteado en granjas porcinas, a saber, el encontrar una política óptima de remplazo de cerdas madre, entendiéndose esto como la determinación del número de ciclos a mantener a una cerda en el hato porcino. Por lo tanto, iniciamos con una descripción general del proceso productivo en las granjas multiplicadoras de cerdos. El ciclo productivo de una cerda multiplicadora en esencia consta de cuatro estados: cubrición o apareamiento, gestación, lactación y receso (véase la Fig.1), por los cuales una cerda irá transitando según lo indican las flechas, si no hay una baja por enfermedades, muerte o mal desempeño. El tiempo que las cerdas permanecen en cada uno de dichos estados pueden ser descritos por variables aleatorias continuas.

**Figura 1.**

Estados normales en los cuales se puede encontrar una cerda en su ciclo de vida.



La representación mediante un diagrama de flujo de la estructura más simple del sistema a simular está esquematizada en la Figura 2 y sirve para explicar el modelo a los interesados o tomadores de decisiones (Laguna y Marklund, 2005)

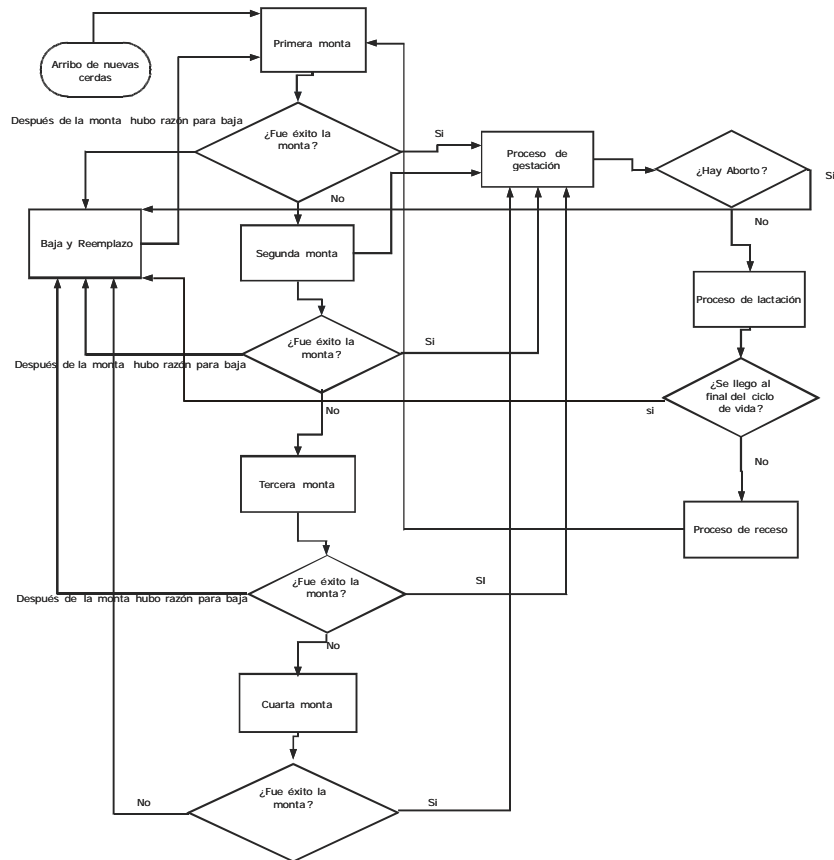
El proceso comienza con la introducción a la granja de un lote de cerdas listas para aparearse; este apareamiento en la actualidad es través de inseminación artificial y sólo los verracos son usados con fines de estimulación de las cerdas. La aplicación de semen se hace cada doce horas, hasta cumplir con tres aplicaciones, después de esto la cerda es analizada para ver si quedó preñada, si no fue así, este proceso se repetirá hasta tres o cuatro veces, si al final la cerda no queda preñada ésta se reemplazará por un animal nuevo. Durante la etapa de apareamiento algunas cerdas desarrollan enfermedades que hacen que también sean desechadas del hato. Las cerdas que quedaron preñadas van posteriormente a la etapa de gestación, si hubiera un evento de aborto en este estado la cerda será reemplazada. La etapa siguiente es la de lactación, ahí la cerda permanece junto con su camada aproximadamente 21 días. La etapa final del ciclo es el receso, ahí la cerda permanece hasta que su ciclo biológico la hace de nuevo entrar en “calor” y recibir el semen artificial nuevamente. El número de ciclos que debe permanecer una cerda en el hato ha sido una interrogante, ya que cada vez que una cerda se reemplaza perdemos a una unidad productiva de lechones, después de que ha costado alimentarla y llevarla a ciertos niveles de productividad, pero si la dejamos que permanezca más ciclos en el hato, se vuelve más vieja e improductiva. Tradicionalmente, tanto en México como España no se

sobrepasa el número de ocho ciclos en el hato. Por lo tanto, las causas del retiro de una cerda son: el máximo número de ciclos permitidos, infertilidad, baja productividad, abortos, accidentes o enfermedades. La política seguida en este modelo para los reemplazos es la de una reposición inmediata, es decir, cuando una cerda se retira del hato, una nueva es introducida inmediatamente.

Siguiendo el enfoque dado por (Rossetti, 2010), el siguiente intento por trasladar el modelo a un ambiente computacional (simulador) fue generar el pseudocódigo mostrado en la Esquema 1, con el que se simplifica el trabajo de codificación en ARENA™.

Con el fin de facilitar la traducción del modelo conceptual a un programa computacional de simulación, es necesario definir las variables de estado, los parámetros y las variables de desempeño (salidas). Las variables aleatorias de entrada en este modelo se suponen dependientes del número de ciclo en que se encuentre la cerda, lo cual es lógico suponer ya que su fertilidad y demás características de desempeño se ven afectados conforme la cerda envejece. Todo el conjunto de variables de entrada en el modelo de simulación se caracterizan en las tablas 1-4. Las pruebas de bondad de ajuste para las variables aleatorias se llevaron a cabo con el software BestFit de

**Figura 2.**  
Diagrama de flujo tomado como base para la simulación.



Palisade (versión 4.5) y se reportan en el trabajo de (Hernández, 2010).

### Variables de estado

$X_{ti}$  : Número de cerdas madre en la granja en el tiempo  $t$ , y en el estado  $i$

$Y_t$  : Número de lechones producidos hasta tiempo  $t$

$EP_t$  ; Edad promedio de las cerdas madre en el tiempo  $t$

$CP_t$  ; Número de ciclos promedio que han permanecido las cerdas en el tiempo  $t$

$CR_t$  : Número acumulado de cerdas reemplazadas en el tiempo t

**Parámetros**

$P_{cr}$  : Probabilidad de transición del estado cubrición a reemplazo

$P_{lr}$  : Probabilidad de transición del estado lactación a reemplazo

$P_{gl}$  : Probabilidad de transición del estado gestación a lactación

$P_{gr}$  : Probabilidad de transición del estado gestación a reemplazo

$P_{cg}$  : Probabilidad de transición del estado cubrición a gestación

$PM_{ij}$  : Probabilidad de pasar del intento de monta i al intento j,  $j = i + 1$

$C_m$  : Costo alimento cubrición (€/animal-día)

$C_g$  : Costo alimento gestación (€/animal-día)

$C_l$  : Costo alimento lactación (€/animal-día)

$C_r$  : Costo alimento receso (€/animal-día)

$CR$  : Costo mientras espera para reemplazo (€/animal-día)

$C_{al}$  : Costo alimento lechón (€/animal-día)

$C_v$  : Costos variables de operación (€/animal-día)

$C_{le}$  : Costo del reemplazo (€/animal)

$C_{ia}$  : Costo inseminación artificial (\$/animal)

$V_c$  : Precio de venta de la cerda (\$/kg)

$V_l$  : Precio de venta de lechón (\$/animal)

**Variables de respuesta:**

$I_t$  : Ingresos totales acumulados en el tiempo t = venta acumulada de lechones + venta acumulada de nodrizas

$C_t$  : Costos acumulados en el tiempo

t = costos acumulados de alimentación + costos acumulados de operación + costos acumulados de compra de nuevas cerdas

$U_t$  : Utilidad acumulada en el tiempo t = ingresos acumulados –costos acumulados (\$)

$UL_t$  : Utilidad/lechón en el tiempo t (\$/lechón nacido)

$UD_t$  : Utilidad acumulada por unidad de tiempo en el instante t

$UT_t$  : Utilización de la granja en el tiempo t

**Variables Aleatorias**

N: Número de lechones nacidos por parto

TG: tiempo de gestación

TL: Tiempo de lactación

TC: Tiempo en apareamiento

TR: Tiempo en receso

**Tabla 1**

Proporción de cerdas que quedan preñadas dependiendo de la monta y ciclo

Numero de monta	1	2	3	4
Ciclo				
1	89.68	81.57	75.0	100
2	92.01	84.37	80.0	100
3	91.72	90.47	75.0	100
4	93.92	84.90	87.5	100
5	91.80	86.66	100	100
6	92.34	89.13	80.0	100
7	94.05	93.10	100	100
8	91.12	96.96	100	100

**Tabla 2.**

Proporción de cerdas que se dan de baja después que quedaron preñadas y proporción de aborto.

Ciclo	Proporción de baja	Proporción de aborto
1	8.94	2.44
2	10.89	1.66
3	8.26	2.06
4	6.77	1.72
5	7.11	1.77
6	7.00	2.16
7	8.41	2.46
8	7.83	2.97

**Tabla 4**

Parámetros económicos del modelo

a) Costos variables por día

COSTOS	Unidades: €/animal-día
Alimento cerdas en monta	0.8
Alimento cerdas en gestación	0.8
Alimento cerdas en lactación	1.0
Alimento cerdas en receso	0.6
Alimento lechón en lactación	0.12
Costos de operación	0.5

b) Costos e ingresos por animal  
(no dependientes del tiempo)

Compra Cerda Nueva	150 €
Inseminación Artificial	6 €
Venta de lechón	30 € lechón, 7-9kg (21-28 días)
Venta de cerda	120 €

103

**Tabla 3.**

Distribuciones de probabilidad del tiempo de permanencia en los estados de: apareamiento, gestación, lactación y receso, y distribución del número de lechones vivos dependiendo del número de ciclo

Ciclo	Apareamiento (primera monta) $k + \text{LOGN}(\alpha, \beta)$	GestaciónNormal ( $\mu, \sigma$ )	LactaciónTRIA (a, b, c) o Normal ( $\mu, \sigma$ )	RecesoNormal ( $\mu, \sigma$ )	Lechones vivos-Triangular discreta ( $\lambda, \omega, \theta$ )
1	$k=15.5, \alpha=13, \beta=14.1$	$\mu=113.6, \sigma=6$	$a=12.8, b=19, c=20$	$\mu=25, \sigma=4$	$\lambda=1, \omega=16, \theta=20$
2	$k=12, \alpha=25.7, \beta=44.9$	$\mu=113.4, \sigma=7.2$	$a=14.9, b=19, c=20$	$\mu=25, \sigma=4$	$\lambda=1, \omega=16, \theta=20$
3	$k=17.5, \alpha=16.1, \beta=28$	$\mu=113.3, \sigma=8.1$	$a=10, b=15, c=21$	$\mu=25, \sigma=4$	$\lambda=1, \omega=17, \theta=20$
4	$k=15.5, \alpha=13, \beta=14.1$	$\mu=113.6, \sigma=5.7$	$\mu=24.1, \sigma=5.6$	$\mu=25, \sigma=4$	$\lambda=1, \omega=17, \theta=20$
5	$k=12, \alpha=27.5, \beta=44.9$	$\mu=113.5, \sigma=6.6$	$a=13.9, b=20, c=21$	$\mu=25, \sigma=4$	$\lambda=1, \omega=18, \theta=20$
6	$k=17.5, \alpha=16.1, \beta=28$	$\mu=113.9, \sigma=4.6$	$a=9.94, b=20, c=22$	$\mu=25, \sigma=4$	$\lambda=1, \omega=16, \theta=20$
7	$k=12, \alpha=25.7, \beta=44.9$	$\mu=113.7, \sigma=6.9$	$a=14.8, b=20, c=21$	$\mu=25, \sigma=4$	$\lambda=1, \omega=16, \theta=20$
8	$k=17.5, \alpha=16.1, \beta=28$	$\mu=112.9, \sigma=9.8$	$\mu=23.5, \sigma=4.8$	$\mu=25, \sigma=4$	$\lambda=1, \omega=17, \theta=20$

**Esquema 1.**

Pseudocódigo del modelo del sistema de producción

```

CREATE lote de cerdas listas para apareamiento
X: ASSIGN costos de alimentación, precios de venta y compra, y ciclo
B: ASSIGN tiempo en el proceso de la monta (1, 2, 3, o 4), costo
    incurrido en monta, costo total.
PROCESS la cerda de acuerdo al ciclo y siguiendo la respectiva
    distribución de tiempo de monta
SEPARATE las cerdas que se dan de baja (etiqueta A), las que siguen a
    la siguiente monta (etiqueta B) y las que se van a gestación
    (etiqueta C)
A: ASSIGN costo de reemplazo, costo total
    ASSIGN tiempo de estancia en la granja
    ASSIGN incremento de uno al ciclo
    ASSIGN ciclo de salida
    ASSIGN incremento unitario al contador de ciclo de salida
    ASSIGN valor cero al ciclo
    GO TO X
C: ASSIGN tiempo de gestación, costo de gestación, costo total
    PROCESS la cerda de acuerdo al ciclo y su tiempo de gestación
    SEPARATE las cerdas que se dan de baja (etiqueta A) de las que siguen
        al proceso de lactación (etiqueta D)
D: ASSIGN tiempo y costo de lactación de las cerdas madre
    ASSIGN tiempo y costo de lactación de lechones
    PROCESS las cerdas madre y los lechones de acuerdo a al tiempo de
        lactación
    ASSIGN el ingreso producto de los lechones
    SEPARATE las cerdas que se dan de baja (etiqueta A) de las que se van
        a receso (etiqueta E)
E: PROCESS las cerdas en receso de acuerdo el tiempo asignado
    ASSIGN el costo del receso de las cerdas madre
    ASSIGN el incremento unitario al ciclo
    GO TO X
    
```

La información estocástica (distribuciones de probabilidad y probabilidades de transición) de entrada al modelo fue construida con datos históricos proporcionados por la Universidad de Lleida en España y recopilada en granjas de Cataluña. Debido a condiciones de espacio en esta publicación, sólo mencionamos a continuación

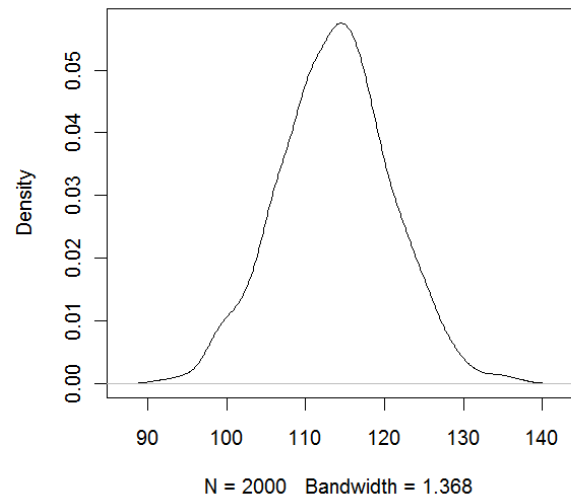
algunos aspectos relevantes de estas distribuciones.

- El número de lechones en cada parto se ajustó a una distribución discreta triangular, por ejemplo, para el ciclo uno la función masa de probabilidad resultó con una media de 12.33, desviación estándar de 4.08, y valores mínimo y máximo de 1 y 20 respectivamente.
- El tiempo entre monta y monta está descrito por una variable aleatoria continua lognormal con desplazamiento y dependiente del número de monta, por ejemplo, para la segunda monta los parámetros de media y desviación estándar resultaron 28.47 y 13.7 respectivamente.
- La distribución ajustada para el tiempo de gestación resultó ser una distribución normal cuyos parámetros dependieron del número de ciclo, por ejemplo, para el segundo ciclo la media fue de 113.4 días, y desviación estándar de 7.2 días respectivamente (véase la Fig.3).

**Figura 3**

Distribución ajustada al tiempo de gestación

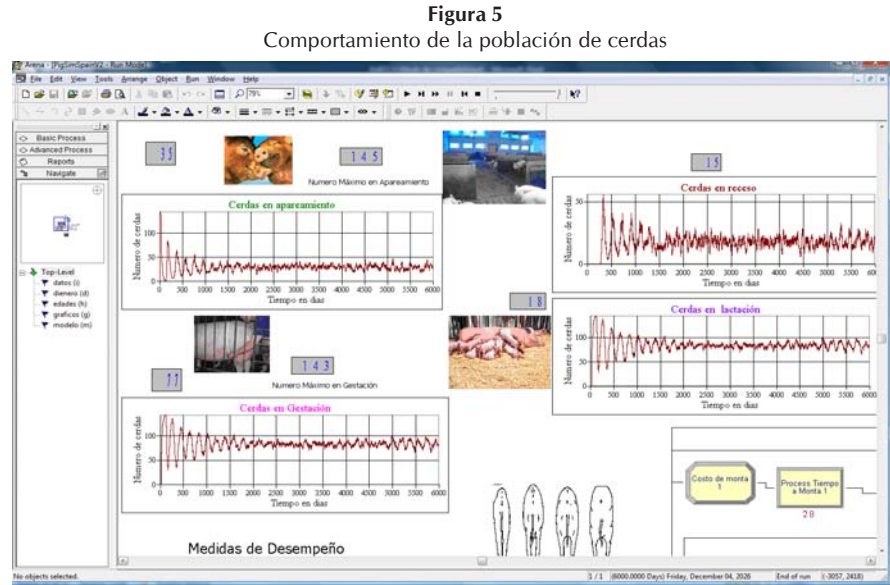
**density.default(x = x)**





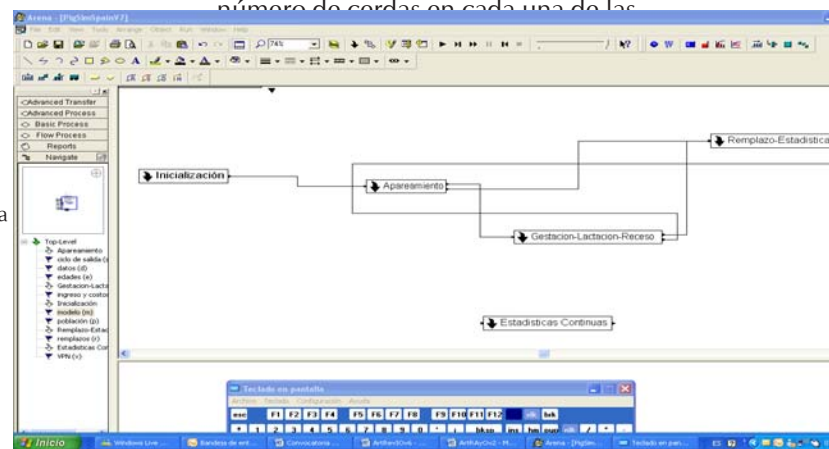
## Resultados

Se construyó un conjunto de submodelos en ARENA™, capaces de representar al sistema total (ver Fig. 4). El propósito inicial de este modelo es reproducir las características actuales de operación de las granjas españolas, y analizar cuál es número de ciclos de permanencia que mejor desempeño económico provoca al sistema. Todas las características antes mencionadas se incorporaron al modelo en ARENA para simular la situación actual de una granja típica en España. El modelo fue ejecutado para un tiempo de 6000 días (aproximadamente 16 años) para estudiar su comportamiento en el estado estable. La Figura 5 muestra el



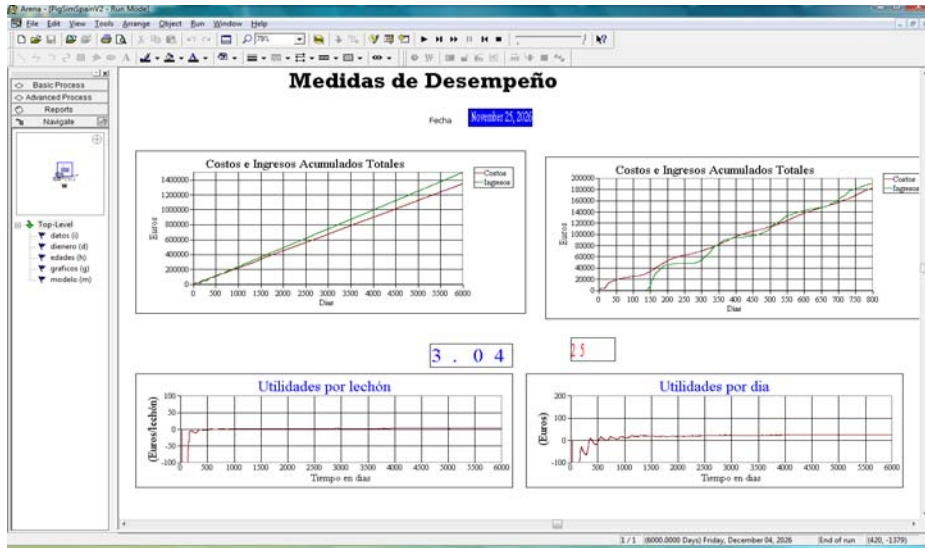
105

**Figura 4**  
Vista de los submodelos en ARENA™ que conforman el sistema



perdura por el resto de la simulación. También observamos que el sistema alcanza valores estables de 3.04  $\square$  por lechón y una utilidad por día de 25  $\square$ .

Figura 6  
Medidas de desempeño económico.



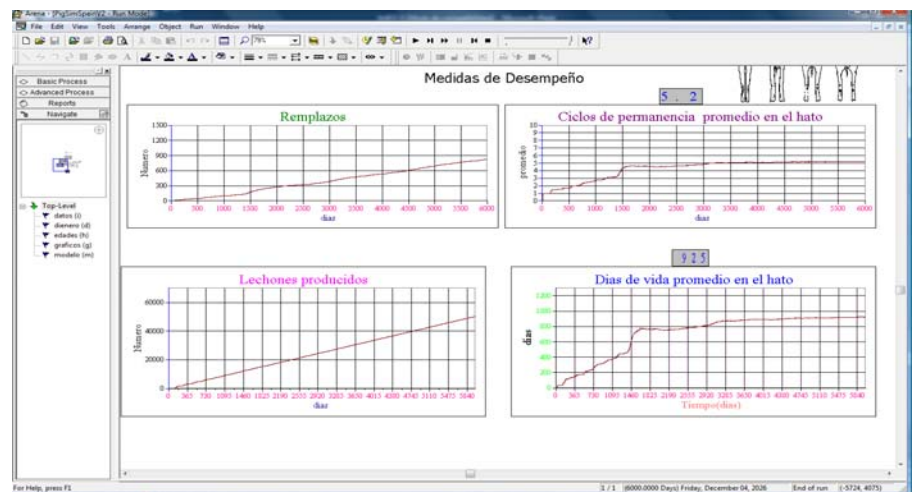
106

En cuanto al desempeño poblacional de la granja se generó la Figura 7, aquí observamos que aproximadamente se reemplazan 900 cerdas, y se venden 50 000 lechones durante todo el tiempo de 16 años. Se generaron valores estables de 5.2 ciclos de permanencia promedio en el hato, así como una estancia promedio de 925 días en la granja desde su llegada.

Una gráfica que nos describe el número de reemplazos de acuerdo al ciclo en que fue reemplazada la cerda la podemos observar en la Figura 8, ahí es

notorio que durante un periodo largo de tiempo las cerdas que han cumplido los ocho ciclos son las que más se reemplazan, seguidas por las de uno y dos ciclos, esto parece muy natural ya que a la larga las cerdas más viejas se reemplazarán, pero es interesante que las cerdas relativamente jóvenes (uno y dos ciclos de vida) se estén reemplazando en grandes cantidades, esto nos da una señal de que algo desfavorable está pasando desde el punto de vista genético.

Figura 7  
Medidas de desempeño de la población del hato.



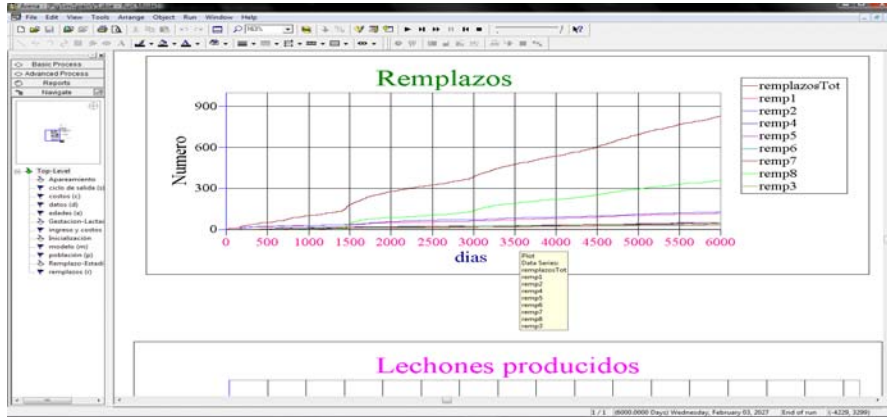
El primer experimento con el modelo actual fue cambiar el número de ciclos que se decide mantener a la cerda en el hato y comparar algunas medidas de desempeño, por ejemplo, la utilidad por día y la utilidad por lechón. A este respecto los resultados que se muestran en la Tabla 5 corresponden a una sola réplica en el estado estacionario.

Debido a la carencia de información (distribuciones de las variables aleatorias) para ciclos mayores a ocho, no es posible saber la respuesta a esta interrogante ahora.

(Kleijnen, 1992) menciona que después de responder a preguntas estratégicas en un estudio de simulación se deben responder preguntas tácticas como: cuál es el número de réplicas, cuál es el período de calentamiento, y cuál es

el período total de la simulación, aunque éstas son de menor importancia para el tomador de decisiones. Con el deseo de obtener estadísticas representativas en el estado estacionario de las variables de salida: utilidad por lechón y valor presente neto (VPN), se hicieron corridas con varias réplicas para el caso de conservar a las cerdas ocho ciclos en el hato. Es importante mencionar que si el interés está centrado en el análisis en el estado

**Figura 8**  
Número de reemplazos acumulados de acuerdo al ciclo de salida



**Tabla 5.**  
Medidas de desempeño en estado estable (una réplica)

Ciclos en el hato	Utilidad /lechón	Utilidad/día
1	-6.35	-62
2	-0.96	-8
3	0.91	8
4	1.65	14
5	2.19	19
6	2.75	23
7	2.83	24
8	3.04	25

Podemos observar en la tabla anterior que la medida de desempeño seleccionada se mejora conforme el número de ciclo es mayor, pero sigue quedando la interrogante si existe un número de ciclo mayor a ocho mejor todavía.

estacionario se debe determinar tanto el periodo de calentamiento como la longitud total de la corrida. [Banks] ha sugerido una regla empírica de que la longitud total sea al menos 10 veces la longitud del periodo de calentamiento, aunque bien comenta [Rossetti] que ésta es una situación de "cath 22". Se implementó el método de *replica-limpia* (*replication-deletion*) en ARENA con el fin de hacer un análisis en el estado estacionario, y usar el periodo de calentamiento.

Aunque por ahora estamos interesados en estudiar el estado estacionario, el estado transitorio no es menos importante analizarlo, ya que desde el punto de vista del

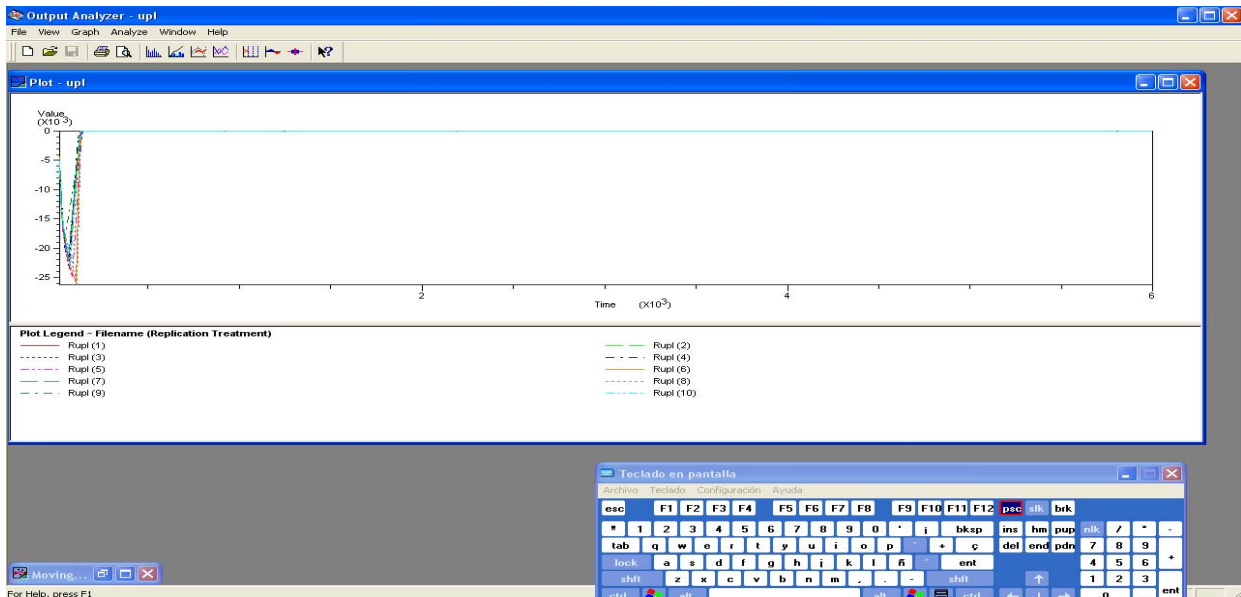
administrador o dueño del negocio, durante este periodo, donde las utilidades frecuentemente se encuentran oscilando entre valores positivos y negativos (véase la Fig. 6) se pueden presentar sentimiento de desánimo, que muchos dueños del negocio no pueden sostener o reconocer, y terminan o bien cerrando el negocio o vendiéndolo.

De acuerdo con la sugerencia de (Rossetti, 2010) se decidió usar la técnica propuesta por (Welch, 1983) para estudiar el periodo de calentamiento y determinar así la longitud total de simulación. La variable de desempeño *utilidad por lechón* fue graficada (véase la Fig. 9) para diez réplicas usando la herramienta de Output Analyzer con el fin de visualizar el estado estacionario, en dicha figura podemos observar que a pocos días de haber iniciado

el funcionamiento del sistema dicha variable toma valores negativos relativamente grandes debido a que en este lapso de tiempo principalmente sólo hay gastos en la granja debido a la alimentación del ganado y operación de las instalaciones.

Ya que el método de Welch no está implementado como tal en el software ARENA, el siguiente paso fue aplicar un procedimiento lo más parecido a dicho método haciendo uso del Output Analyzer de ARENA. Para tal efecto, se hizo un suavizamiento a los datos de salida correspondientes a las réplicas, por ejemplo, podemos observar en la Fig. 10 el promedio acumulado para los datos de la primera réplica, en ella se detecta a primera vista un periodo de calentamiento aproximado de 1500 días (aproximadamente 4 años). Los intervalos a un 95%

**Figura 9**  
Gráfico de la utilidad por lechón para las diez réplicas en Output Analyzer.



de confianza para cada una de las diez réplicas para la misma variable se muestran en la Fig. 11; resultando notorio los valores negativos de dicha variable de respuesta debido a que durante un tiempo relativamente corto las utilidades en la granja son negativas por la ausencia de venta de lechones. Debido a la incapacidad del Output Analyzer para hacer un análisis tipo Welch se construyó un código en MATLAB capaz de semiautomatizar dicho método. Los datos de salida de la variable de respuesta *utilidad por lechón* para varias réplicas y varias longitudes totales de la corrida fueron procesadas mediante dicho código con el fin de generar la gráfica de Welch (véase las Figs. 12-15). En la parte superior se ha graficado el promedio de la variable de respuesta a lo largo de las réplicas (la tercer gráfica de cada conjunto horizontal hace uso de escala logarítmica para la variable *número de observaciones*), el segundo conjunto horizontal de gráficas muestra el suavizamiento obtenido mediante el promedio acumulado. Podemos deducir a primera vista un periodo de calentamiento de 500 observaciones, este valor de observaciones corresponde a 3750 días aproximadamente, valor que se usó como período de calentamiento en el setup de ARENA para proceder a realizar un análisis del estado estacionario. Haciendo uso de la recomendación de (Banks, 2010) de usar una longitud total mayor a diez veces el periodo de calentamiento se realizaron treinta réplicas, obteniendo una utilidad

promedio para la variable de salida *utilidad por lechón* de 4.07 €, como se puede observar en la Fig. 16.

El procedimiento dado aquí para determinar el periodo de calentamiento es tedioso y consumidor de tiempo. La investigación para automatizar este proceso todavía está en proceso (Rossetti, 2010). El trabajo más reciente de Rossetti et al (2005) y Robinson (2005) promete mucho a este respecto; sin embargo permanece la necesidad de integrarlo al software de simulación.

Aunque es una meta de cualquier sistema que funciona en un horizonte infinito encontrar sus medidas de desempeño en el estado estacionario, no resulta de menor importancia encontrar controles o políticas de funcionamiento que amortigüen los efectos del estado transitorio, ya que como se ha mostrado en este trabajo, al inicio de la puesta en marcha de sistemas como éste, existe un periodo de consecuencias negativas en el aspecto financiero, las cuales sin duda tendrán impactos en el estado psicológico de la empresa.

109

Figura 10

Gráfico suavizado con el promedio acumulado para los datos de la utilidad por lechón para la primera réplica en Output Analyzer.

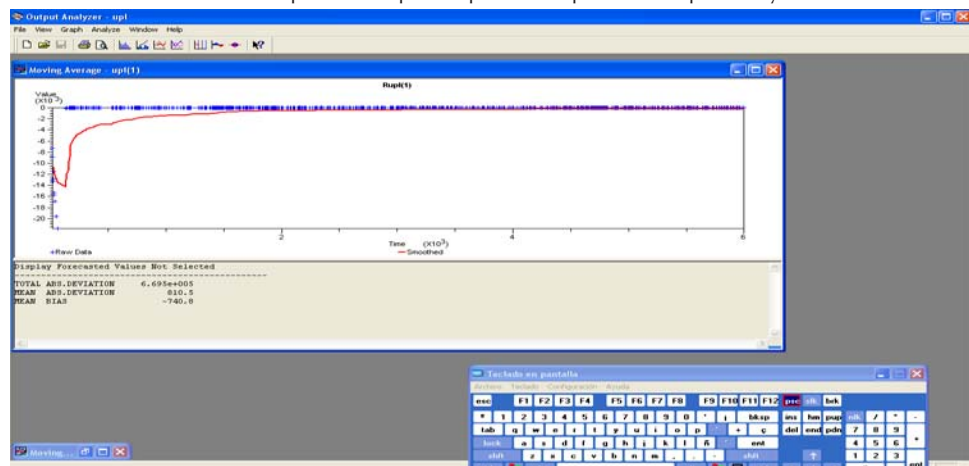
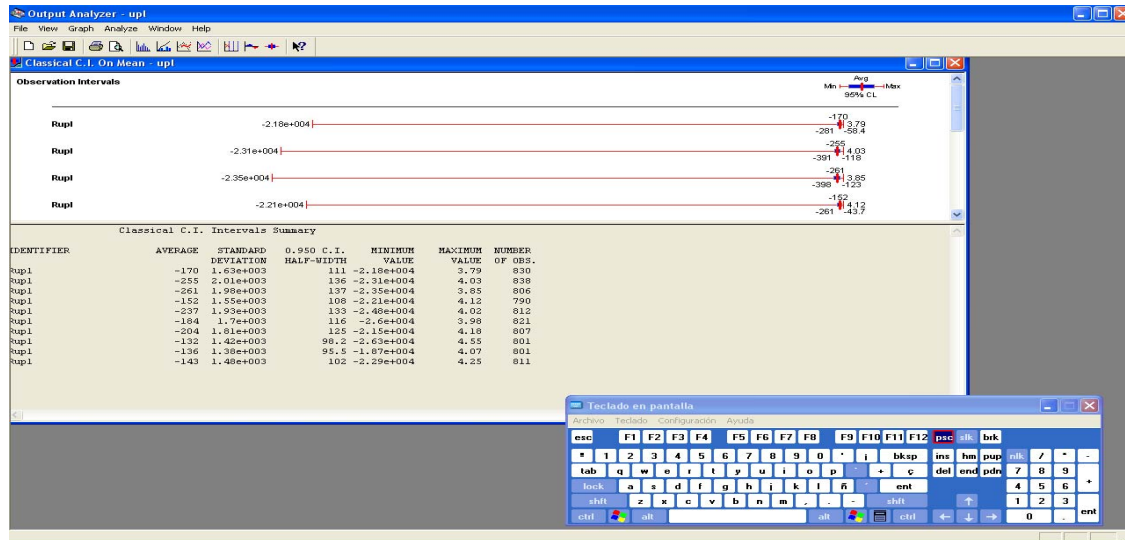


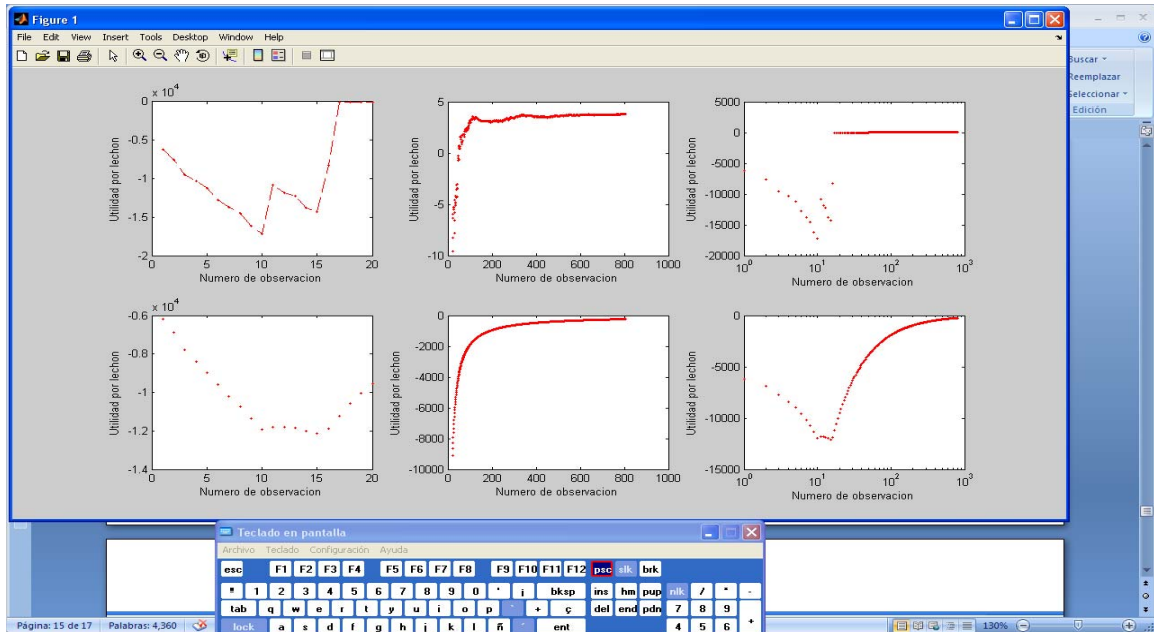


Figura 11  
Intervalos de confianza para la utilidad por lechón generados en el Output Analyzer

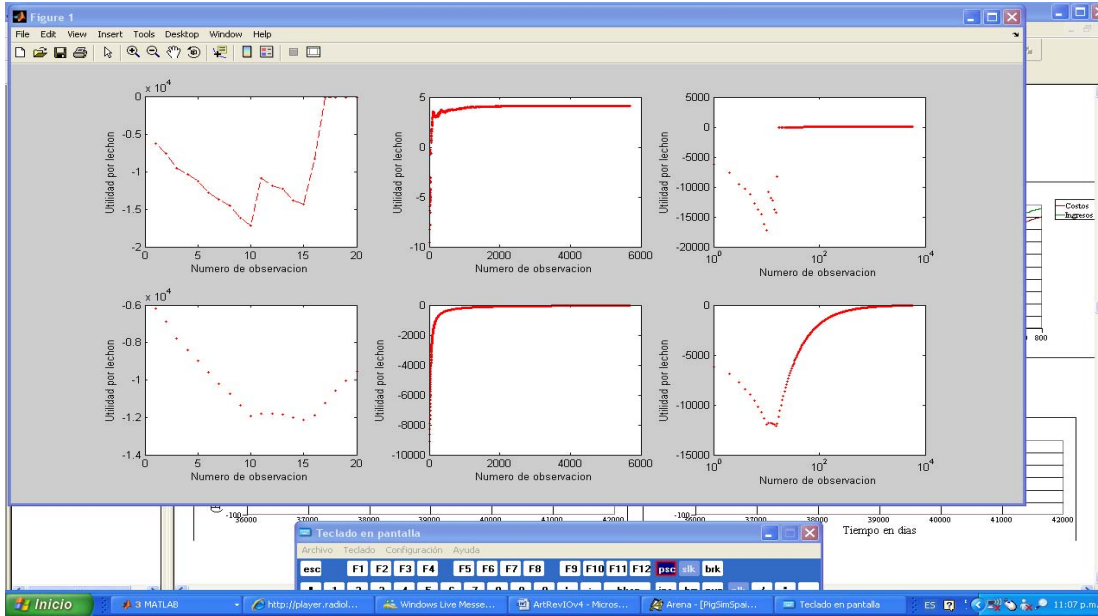


110

Figura 12  
Gráficos de Welch para la variable utilidad por lechón (tres réplicas y 6000 días de simulación).

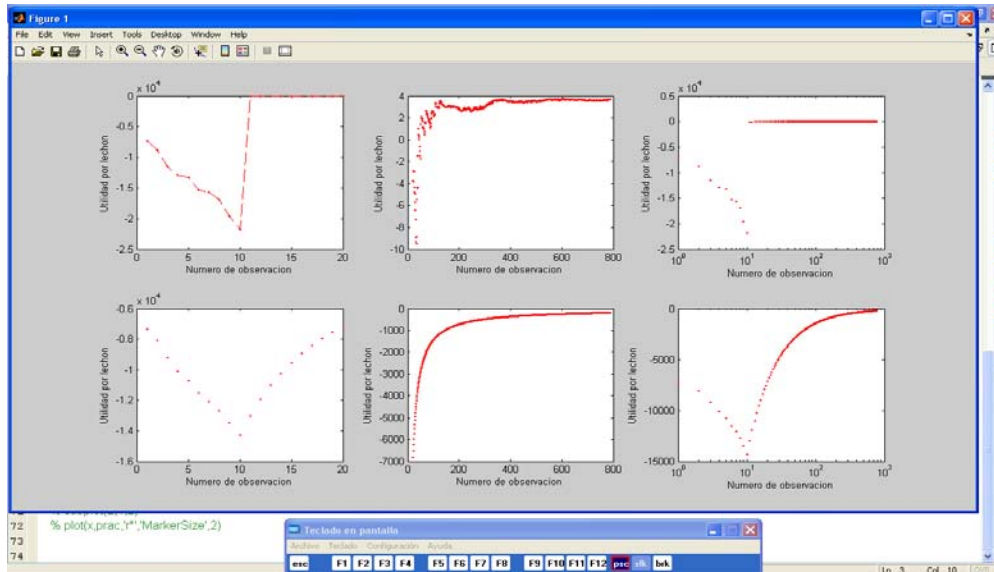


**Figura 13**  
Gráficos de Welch para la variable utilidad por lechón (tres réplicas y 40000 días de simulación).

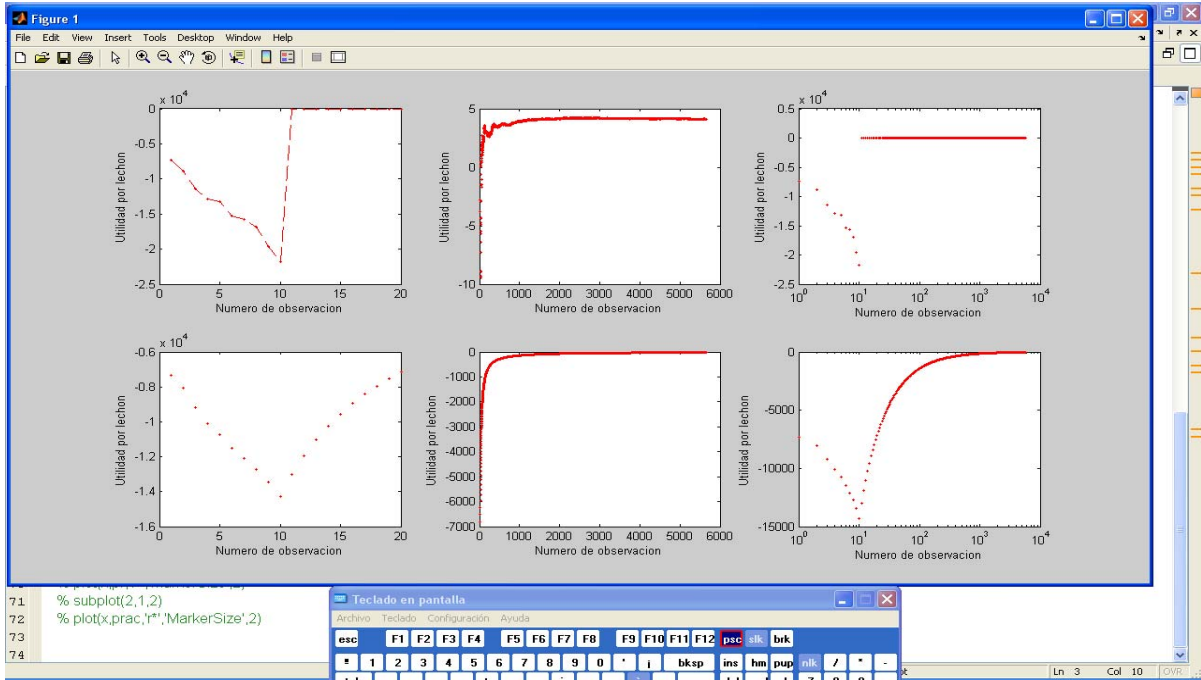


111

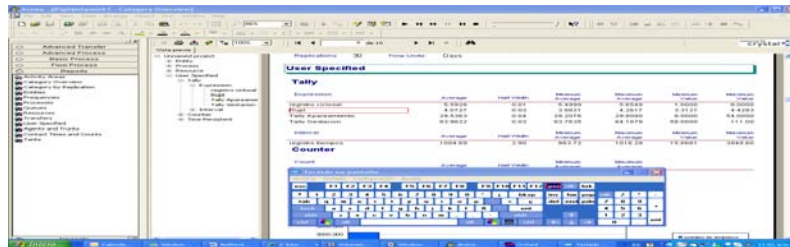
**Figura 14**  
Gráficos de Welch para la variable utilidad por lechón (treinta réplicas y 6000 días de simulación).



**Figura 15**  
Gráficos de Welch para la variable utilidad por lechón (treinta réplicas y 40000 días de simulación).



**Figura 16**  
Estadísticas de tipo discreto para treinta réplicas con calentamiento del sistema.





Dado que la variable de respuesta anteriormente seleccionada de *utilidad por lechón* no es contundente desde el punto de vista financiero, se eligió hacer un análisis desde la perspectiva de la ingeniería económica utilizando el valor del dinero a través del tiempo [Sullivan et al.], para tal efecto se seleccionó el Valor Presente Neto (VPN) como una medida de la rentabilidad económica de la granja. Para hacer dicho análisis fue necesario utilizar un valor para la Tasa de Retorno Mínima Atractiva (TREMA) con el fin de descontar los valores del flujo de efectivo al valor presente (tiempo cero).

En principio se realizaron treinta réplicas con una longitud total de 6000 días para calcular los intervalos de confianza al 95% para la variable VPN y detectar visualmente el estado estacionario. Las gráficas particulares para cada una de las réplicas se muestran en la Fig. 17; en ésta se detecta visualmente un estado estacionario

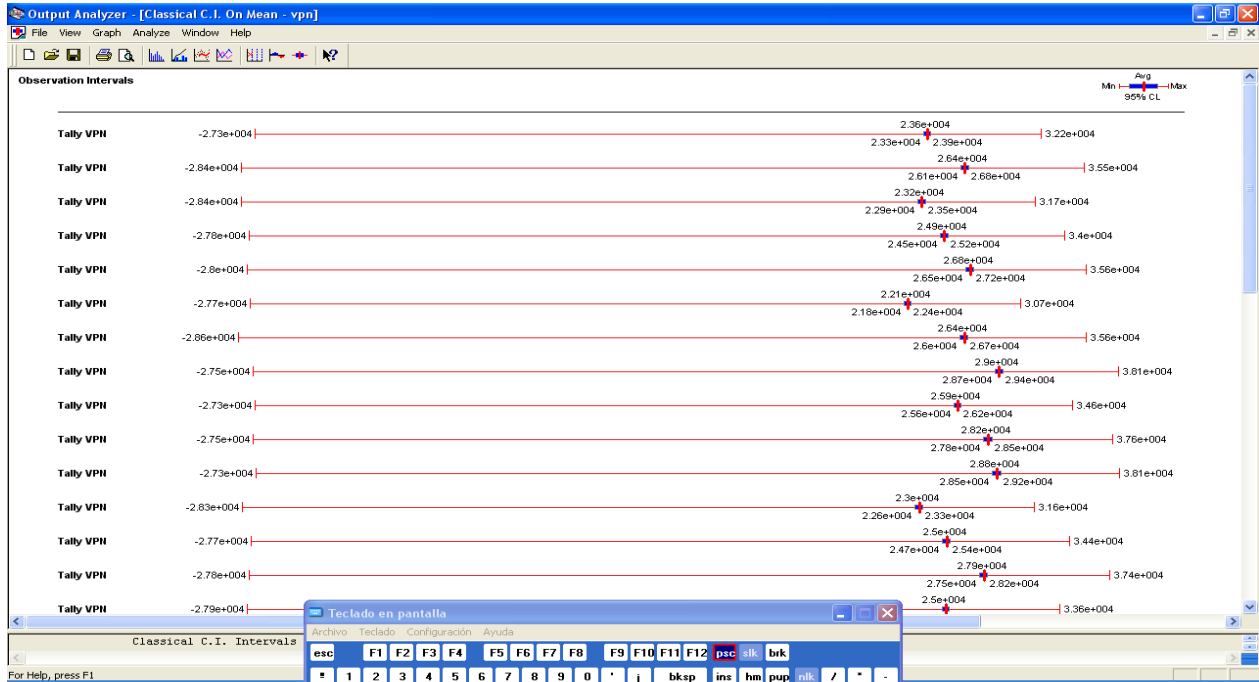
cercano a los 3000 días, además se observa que después de los mil días muy probablemente el VPN sea positivo.

Por otra parte los intervalos de confianza (véase la Fig. 18) dan muestra alentadora del desempeño financiero del sistema. Es interesante observar que los valores negativos del VPN se presentan regularmente antes de los mil días (aproximadamente 3 años), por lo que para el valor de TREMA y demás condiciones introducidas, este proyecto es viable financieramente. El último análisis fue entonces variar el número de ciclos que se le permite permanecer máximo a una cerda en el hato y registrar el promedio del VPN para las treinta réplicas y bajo una duración de la simulación de 6000 días. Estos resultados aparecen en la tabla 6, ahí se puede concluir que el valor máximo del promedio de las réplicas corresponde al caso cuando se dejan permanecer a las cerdas seis ciclos.

Figura 17  
Realizaciones del VPN para treinta réplicas y 6000 días de simulación



**Figura 18**  
Intervalos de confianza para la el VPN con 30 réplicas y 6000 días de simulación



114

Es importante que las modificaciones futuras a este modelo consideren aspectos tales como: tamaño de las instalaciones y producción requerida de lechones, así también adecuaciones para incluir el reemplazo en lotes o por periodos fijos de tiempo.

**Tabla 6**  
Valor presente neto promedio para 30 réplicas y 6000 días de simulación

Ciclos en el hato	VPN (0)
4	25911.17
5	26130.01
6	26180.73
7	25819.11
8	25730.29

## Conclusiones y estudios futuros

Las conclusiones y recomendaciones obtenidas y sugeridas respectivamente hasta el momento son las siguientes:

- 1) La simulación resultó de gran ayuda para el entendimiento de la dinámica del comportamiento del sistema y apto para implantar y evaluar políticas de reemplazo.
- 2) Se puede considerar en un modelo futuro que los precios de los alimentos pueden tener variaciones estacionales.
- 3) Consideramos que el análisis de los datos de salida (VPN) son contundentes, en el sentido que demostraron que el número de ciclos óptimo a conservar una cerda en el hato es seis, sin embargo dependerá de los parámetros de entrada propios de cada explotación, entre ellos la genética de los animales.
- 4) Sugerimos continuar con el proceso de validación tanto del modelo, como de la información arrojada por el mismo con los tomadores de decisiones (granjeros y expertos en el tema)
- 5) Dado que la información usada aquí fue de procedencia española, sugerimos recolectar información correspondiente para México, y desarrollar el modelo correspondiente para las piaras mexicanas con el fin de comparar su desempeño.
- 6) Integrar en el modelo futuro aspectos que tomen en cuenta el crecimiento de los animales y la calidad del producto a lo largo del proceso.
- 7) Incorporar y evaluar políticas de reemplazo consistentes en juntar un número determinado de cerdas, o esperar un lapso de tiempo para reemplazarlas.

## Referencias

- Braña V. Diego (2010) *Comunicación personal*
- Chavas J.P., Kliebenstein J. and Crenshaw TD (1985): Modeling dynamic agricultural production response—the case of swine production. *Am J Agri Econ* **67**: 636–646.
- Glen J.J. (1987): Mathematical models in farm-planning—A survey. *Opns Res* **35**: 641–666.
- Golsman D. (2010) *Comunicación personal*
- Huirne R.B., Van Beek P., Hendriks T.H. and Dijkhuizen A.A. (1993): Stochastic dynamic programming to support sow replacement decisions. *Eur J Opl Res* **67**: 161–164.
- Jalvingh A.W., Dijkhuizen A.A. and van Arendonk J.A.M. (1992): Dynamic probabilistic modeling of reproduction and management in sow herds. General aspects and model description. *Agri Syst* **39**: 133–152.
- Lippus A.C., Jalvingh A.W., Metz J.H.M. and Huirne R.B.M. (1996): A dynamic probabilistic model for planning housing facilities for sows. *Trans ASAE* **39**: 1215–1223.
- Kelton et al. (2010): *Simulation using ARENA*, McGraw Hill.
- Kristensen A.R. and Sollested T.A.(2004): A sow replacement model using Bayesian updating in a three-level hierarchic Markov process I. **biological model.**; **87**:13-24.
- Law (2008): *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw Hill
- Plá L.M (2007). Review of mathematical models for sow herd management. *Livestock Sci* **106**: 107–119.
- Plá L.M., Babot D. and Pomar J. (2004): A mathematical model for designing and sizing sow farms. *Int Trans Opl Res* **11**: 485–494.
- Plà-Aragonès Lluís M., Virginia Flores Marias. and Sara V. Rodríguez-Sánchez: A Simulation Model For Intensive Piglet Production Systems, *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*
- Plá L.M., J. Faulín. and S.V. Rodríguez. (2009): A linear programming formulation of a semi-Markov model to design pig facilities. *Journal of the Operational Research Society* **60**, 619 —625
- Rodríguez Sara V., Victor M. Albornoz, and Lluís M. Plà. (2009): A two-stage stochastic programming model for scheduling replacements in sow farms, *Top* **17**: 171–189, DOI 10.1007/s11750-009-0087-2.
- Singh D. (1986): Simulation-aided capacity selection of confinement facilities for swine production. *Trans ASAE* **29**: 807–815.

• Kleijnen J. and Willen van G. (1992): **Simulation a Statistical Perspective**, John Wiley

• Rossetti M. (2010): **Simulation Modeling and ARENA**, John Wiley.

• Hernandez G. (2010): Desarrollo de un modelo de simulación para el análisis del ciclo reproductivo de una piara, Tesis de maestría, UAEH, México.

• Banks et al. (2010): **Discrete-Event System Simulation**, Fifth Edition, Prentice Hall.

• Welch P. (1983): The statistical analysis of simulations results. In: Lavenberg, S; editor. **Computer Performance Modeling Handbook**. New York: Academic Press. pp 268-328.

• Robinson S. (2005): Automated Analysis of simulation output data. In: Kuhl ME Steiger NM, Armstrong FB, Joines JA, editors. **Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference**. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp 763-770.