

LOGISTIC COSTS OPTIMIZATION OF SILAGE CORN HARVEST BY DISCRETE EVENT SIMULATION.

Amiama Ares, Carlos; Barrasa Rioja, Martín; Pereira González, José Manuel; Bueno
Lema, Javier

Universidad de Santiago de Compostela

The overall goal of this paper is to simulate the silage harvest system in order to performing the strategic planning at the beginning of the harvest season, and in daily decision making, in order to determine the right combination of resources according to fields to harvest.

In order to provide a real example of the usefulness for strategic planning by the tool developed, the harvesting of several fields of corn will be simulated. The model obtained has made it possible to determine the impact that the combination of equipment has on the costs and on the length of the harvest season for each of the harvesters analysed. The SPFH occupation has been analysed distinguishing between activity, waiting and travelling times. The sensitivity of the system to the variation of each type of equipment used has been determined.

Keywords: Fleet management; harvest cost; Simulation

OPTIMIZACIÓN DE COSTES LOGÍSTICOS EN LA RECOLECCIÓN DEL MAÍZ FORRAJERO MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

En este trabajo simulará el proceso de cosechado de maíz forrajero para realizar la planificación estratégica de la campaña, antes del inicio de las tareas de recolección del forraje, transporte y ensilado. La simulación también será de utilidad en la toma de decisiones diaria, al permitir determinar la combinación más adecuada de recursos para la recolección de las parcelas programadas.

Con el objeto de poder evaluar la utilidad de la herramienta desarrollada, para la planificación estratégica de la campaña, se simulará la recolección de una serie de parcelas. El modelo obtenido ha permitido determinar la incidencia que la combinación de equipos tiene sobre los costes y sobre la duración de la campaña, para cada una de las cosechadoras. Se ha analizado el grado de ocupación de la cosechadora, distinguiendo entre los estados de cosecha, en espera y los tiempos de desplazamiento entre parcelas. La sensibilidad del sistema a la variación para cada uno de equipos utilizados ha sido determinada.

Palabras clave: Gestión flotas; Coste cosechado; Simulación

1. Introducción

La cosecha de maíz forrajero para silo es un proceso que implica numerosos equipos. Participan varias cosechadoras, camiones para el transporte del forraje y equipos para la compactación del forraje en el silo. Todos estos equipos deberán de estar coordinados y su número deberá de ser ajustado de acuerdo con la capacidad efectiva de trabajo de las cosechadoras. Todo ello encajado en un cronograma muy ajustado debido al poco tiempo disponible para cosechar un elevado número de parcelas. Consecuentemente el sistema puede llegar a colapsarse, al superarse la capacidad de transporte de forraje o bien la capacidad de compactado en el silo, reduciéndose en ambos casos la eficiencia del sistema (Buckmaster, 2006).

La simulación ha demostrado su utilidad como sistema de análisis para predecir los costes del sistema, así como para la planificación del número óptimo de recursos en orden a evitar que el sistema colapse. En esta línea Amiama, Pedrido y Álvarez (2012) han desarrollado un modelo que simula el proceso de recolección, transporte y compactado del maíz forrajero. El desarrollo de herramientas de ayuda a la decisión como la que nos ocupa es imprescindible para la realización de una planificación estratégica que permita una asignación eficiente de los recursos.

En este trabajo se pretende, una vez desarrollado y depurado el modelo que refleja el proceso de cosechado del maíz forrajero, comparar el comportamiento del sistema utilizando cosechadoras con diferentes anchuras de cabezal. Se evaluarán además diferentes combinaciones de vehículos de transporte, así como diferentes capacidades de compactado en el silo, con el fin de buscar una configuración que minimice los costes totales de cosechado. Por último se realizará un análisis de sensibilidad con el objeto de determinar a que equipos tienen un mayor peso en el comportamiento del sistema.

2. Material y métodos

Para la realización del estudio se ha partido de los datos de una campaña de 40 días de duración en la que han participado 4 cosechadoras de forraje de la misma marca y modelo (New Holland FX 58). En la simulación se ha mantenido la asignación de cosechadoras a parcelas establecida en la realidad, ya que el objetivo del trabajo es predecir el comportamiento del sistema con distintos equipos, y no la gestión de rutas.

Para el análisis se han considerado dos cabezales distintos para las cosechadoras, un cabezal de 8 líneas (6 m de ancho de trabajo) y un cabezal de 6 líneas (4,5 m. de ancho de trabajo). Los camiones considerados tienen una capacidad de carga equivalente, o ligeramente superior, a la capacidad de almacenamiento de la tolva de la cosechadora. La operación de compactado en el silo se lleva a cabo con tractores y palas cargadores. La capacidad de compactación viene determinada por el peso del vehículo utilizado. Se han considerado palas cargadoras de 13.5 t y tractores de 6.5 t, obteniendo una capacidad de compactación de $81.0 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ y $39.0 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente, para un contenido de materia seca de un 33 %. Los costes considerados para los distintos equipos se han obtenido consultando los valores reales de contratación de los mismos (véase tabla 1).

La descripción del modelo, así como la implementación en el software de simulación de eventos discretos se han definido en trabajos anteriores (Amiama, Pedrido & Álvarez, 2012). En el modelo confluirán cosechadoras autopropulsadas de forraje, camiones y vehículos de compactado, que interaccionarán acorde a sus capacidades de trabajo, permitiendo detectar paradas en el sistema por una inadecuada asignación de recursos.

Tabla 1. Costes estimados de las operaciones

Operación	Coste horario (€h ⁻¹)
Cosechado (6 líneas)	265
Cosechado (8 líneas)	305
Transporte (camión)	40
Compactado (tractor)	50
Compactado (pala cargadora)	60

Para cada cosechadora considerada (6 y 8 líneas) se ha analizado la configuración que proporciona una solución menos costosa, por aproximaciones sucesivas. El número óptimo de camiones involucrados (los camiones son los elementos más variables en el sistema) se ha determinado considerando que la capacidad de compactado es de 3.35 t.min⁻¹, que se corresponde con la desarrollada por dos palas cargadoras y un tractor, combinación utilizada habitualmente.

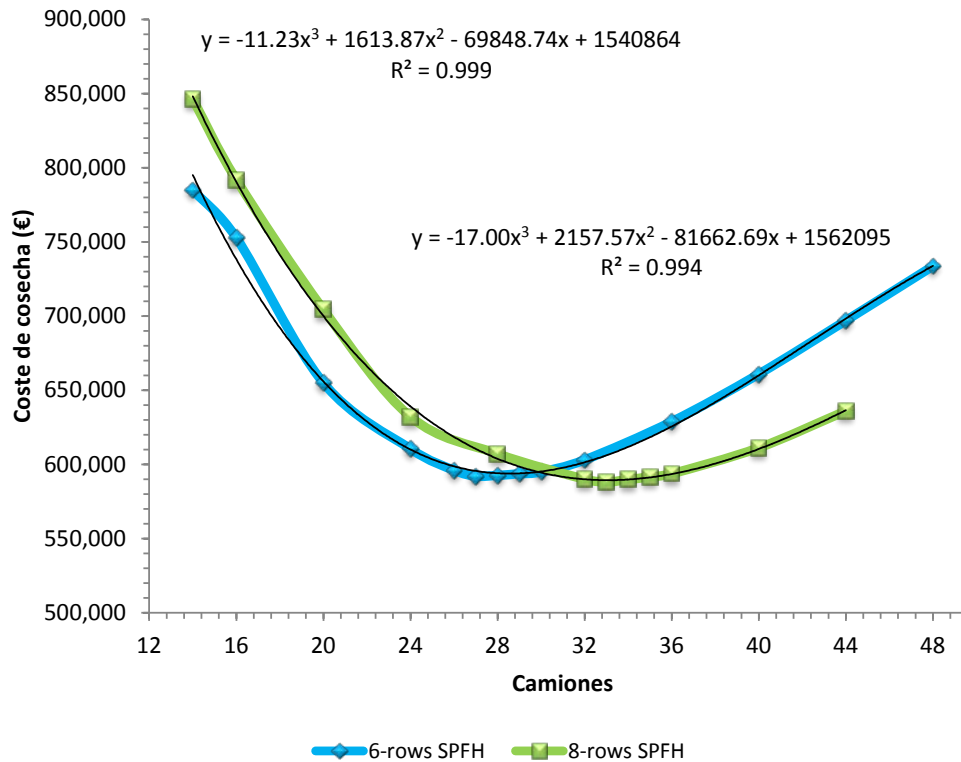
Se ha determinado el impacto del número de camiones utilizado sobre la duración de la campaña, así como la distribución de los tiempos de actividad y espera de la cosechadora, obtenidos como consecuencia de la falta de camiones para realizar el transporte o bien por haber excedido la capacidad de extendido y compactado en el silo. Se ha realizado además un análisis de sensibilidad de las variables clave.

3. Resultados y discusión

3.1 Determinación de la combinación de mínimo coste

Con la información recogida en el epígrafe 2 se ha procedido a determinar la combinación de equipos que proporciona el mínimo coste. En la figura 1 se refleja la evolución de los costes de cosechado en función del número de camiones involucrados.

Figura 1: Simulación de costes de cosecha con un capacidad de compactado de 3.35 t.min⁻¹



Como puede observarse en el caso de la cosechadora de 6 líneas el coste mínimo se obtiene utilizando 27 camiones, ascendiendo el coste de cosecha a 592,127.67 €. En el caso de la cosechadora de 8 líneas el coste mínimo se obtiene con 33 camiones, y asciende a 588,152.22 €. Los datos tienen un coeficiente de terminación elevado en el modelo de regresión polinómica, pudiendo predecirse con gran exactitud los costes del proceso al variar el número de camiones.

El cruce de las curvas de coste de ambas cosechadoras se produce con 29.8 camiones, por lo que si el número de camiones de los que se dispone es inferior a 30 es menos costoso utilizar cosechadoras de 6 líneas. En caso contrario la utilización de cosechadoras de 8 líneas ocasionará menores costes.

3.2 Análisis de costes

En la tabla 2 se observa el desglose de costes de los diferentes equipos que intervienen en la cosecha, en la situación de mínimo coste.

Tabla 2. Coste mínimo estimado (€) para la campaña

Tipo cosechadora	Costes cosechadora	%	Coste camiones	%	Coste compactado	%	Costes cosecha
6-rows	266,498	45.0	271,4976	45.9	53,653	9.1	592,127
8-rows	260,403	44.3	282,297	48.0	45,450	7.7	588,152

El transporte supone el elemento de mayor coste en el sistema, derivado del elevado número de camiones necesario. El elemento que supone un menor coste son los compactadores. En la figura 2 se muestra la evolución de costes al variar el número de camiones, considerando una capacidad de compactado de 3.35 t.min^{-1} . Puede observarse como los costes de las cosechadoras son mucho más sensibles a un inadecuado dimensionamiento de la flota de camiones que los compactadores.

3.3 Duración de la campaña

Se ha determinado la incidencia que una correcta gestión de los camiones tiene sobre la duración de la campaña. Con una combinación de costes óptima la duración de la campaña con la utilización de cosechadoras de 6 líneas SPFH asciende a 39.6 días. Este valor se ve reducido a 33.6 días cuando se utilizan cosechadoras de 8 líneas. Si bien, como se puede observar en la tabla 2, la utilización de cosechadoras de 6 u 8 líneas no supone un significativo ahorro económico, se obtienen importantes ahorros en tiempo, considerando el reducido intervalo temporal existente para la realización de esta operación.

En la figura 3 se muestra la variación en la duración de la campaña, en función del número de camiones considerado, con una capacidad de compactado en el silo de 3.35 t.min^{-1} . En general el incremento del número de camiones respecto al óptimo calculado tiene un impacto mucho menor en la duración del proceso que la reducción. En el caso de la cosechadoras de 6 líneas un incremento de 9 camiones respecto al óptimo supone una reducción de 3 días y una reducción de 7 camiones conlleva un aumento de la campaña de 9.5 días. Esta tendencia se mantiene en las cosechadoras de 8 líneas, ya que un aumento de 7 camiones implica una reducción de la campaña de 2.5 días y una disminución de 9 camiones supone un incremento de 7.5 días.

3.4 Análisis de la ocupación de la cosechadora

En la figura 4 se muestran la distribución porcentual de los tiempos medios consumidos por cada una de las cosechadoras analizadas. En ambos casos los tiempos de cosecha son elevados, en torno al 87.5 %. Los tiempos de desplazamiento oscilaron en torno al 4.0 %, lo que denota una adecuada gestión de las rutas. Los tiempos de espera por camión son superiores en la cosechador de 6 líneas (9.00 % frente al 8.16 %), debido al mayor valor de K. En los tiempos de espera de la cosechadora los camiones están mayoritariamente desplazándose, justificándose el retraso en muy pocas ocasiones por colapso en el compactado.

Figura 2: Análisis de costes de la campaña con cosechadoras de 6 líneas (arriba) y de 8 líneas (abajo), considerando una capacidad de compactado de 3.35 t.min⁻¹

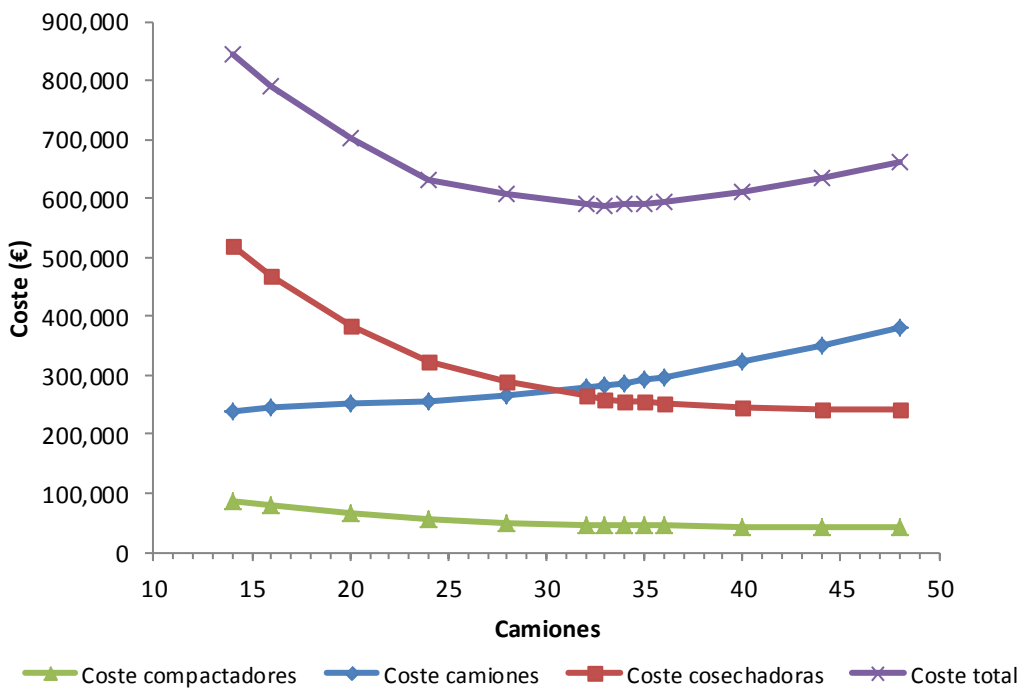
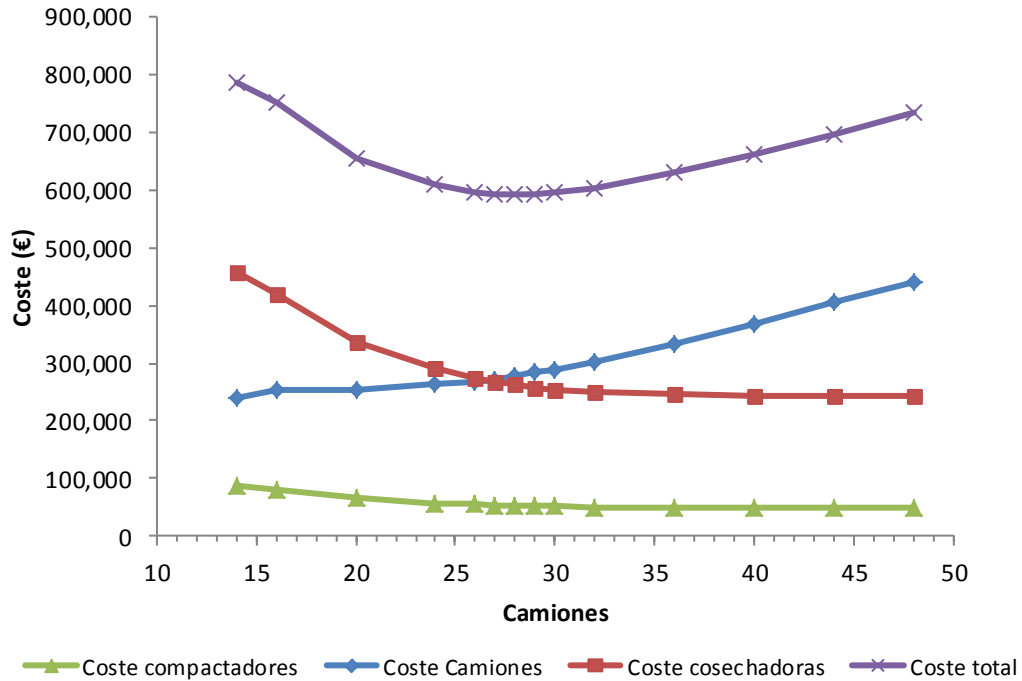


Figura 3: Duración de la campaña con cosechadoras de 6 líneas (arriba) y 8 líneas (abajo), considerando una capacidad de compactado de $3.35 \text{ t}\cdot\text{min}^{-1}$

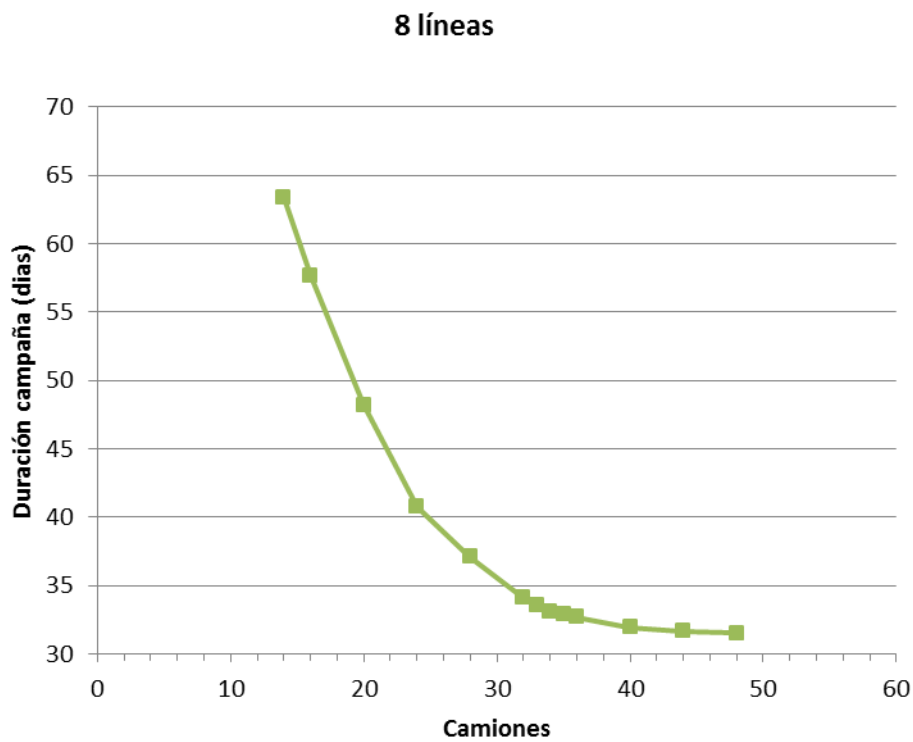
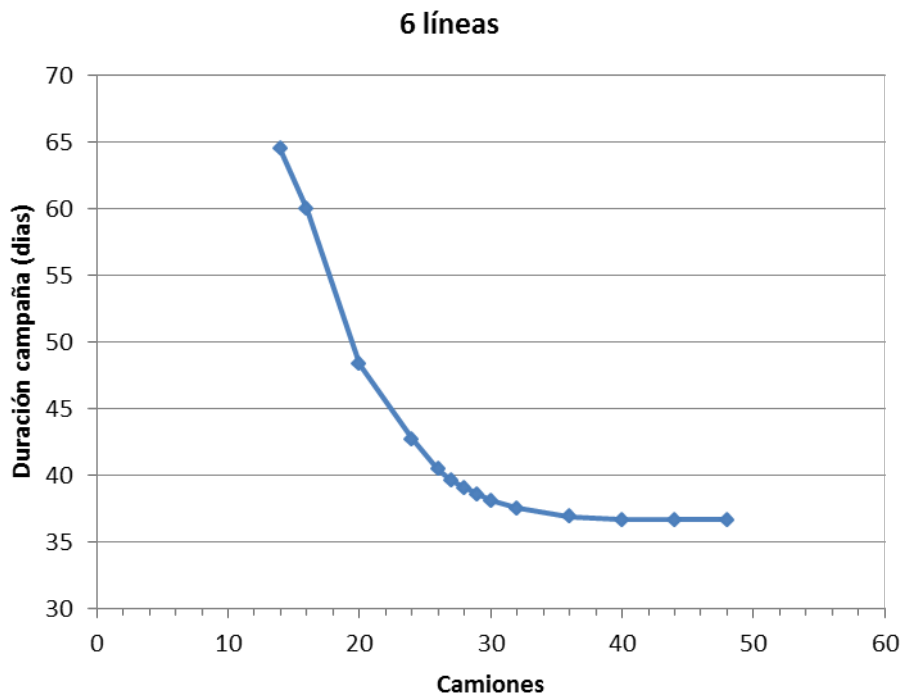
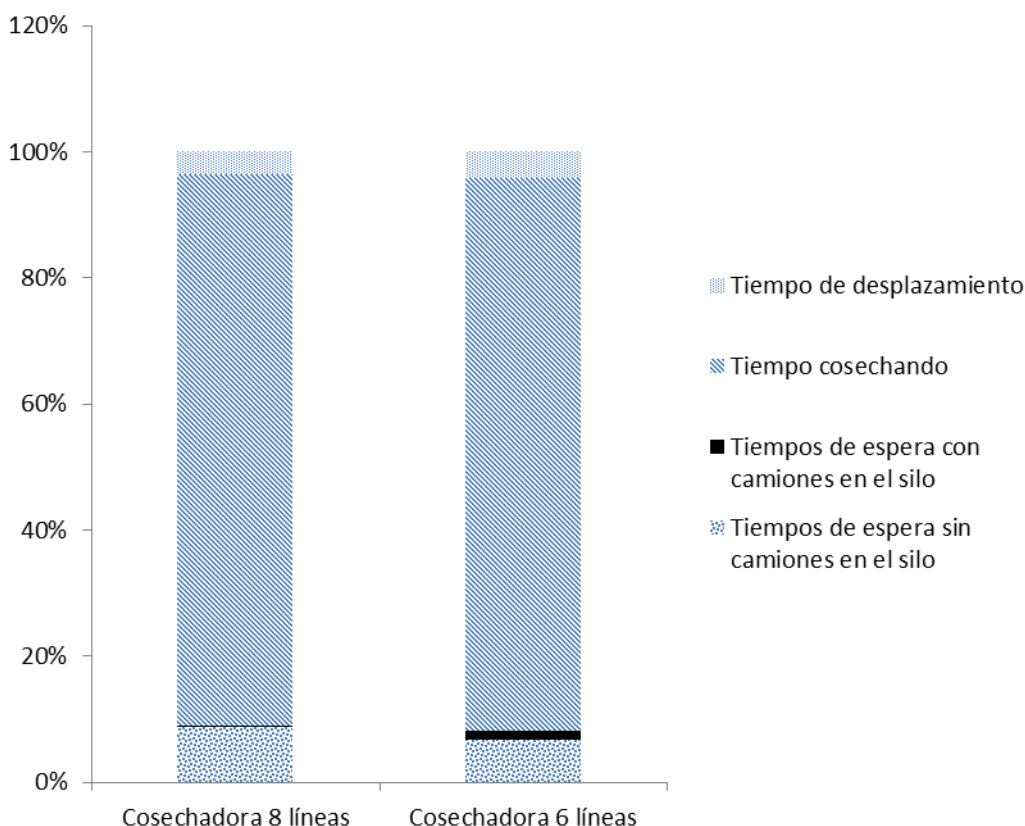


Figura 4: Porcentajes medios de tiempo para cada cosechadora analizada



3.5 Análisis de sensibilidad

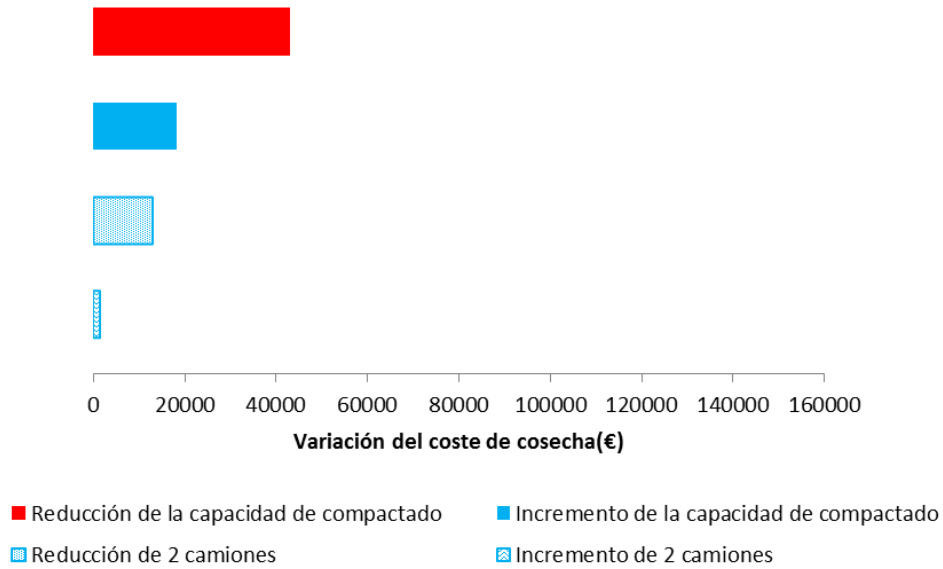
Con este análisis se pretende determinar si el proceso es más sensible a la variación en el número de camiones involucrados, o a la variación en el número de compactadores. Para ello, partiendo de la situación de mínimo coste en cada cosechadora, se ha incrementado la capacidad de compactado en 0.65 t.min^{-1} (considerando un tractor adicional) o se ha reducido 1.35 t.min^{-1} (disminuyendo una pala cargadora), con lo que el coste horario del sistema se incrementa en 50 €h^{-1} o se reduce en 60 €h^{-1} , respectivamente. La variación en costes totales de cosecha ha oscilado entre el 3.07 % y el 7.28 % para la cosechadora de 6 líneas y el 1.53 % y el 23.32 % para la cosechadora de 8 líneas.

Partiendo de la misma situación se ha modificado la flota de vehículos de transporte en 2 camiones, que suponen un incremento o disminución en coste horario de 80 €h^{-1} , ligeramente superior al de los compactadores. Se observa en la figura 5 como la variación en costes totales es inferior a la obtenida modificando la capacidad de los compactadores, oscilando entre el 0.26% y el 2.18% para la cosechadora de 6 líneas y el 0.59 % y el 0.61 % para la cosechadora de 8 líneas.

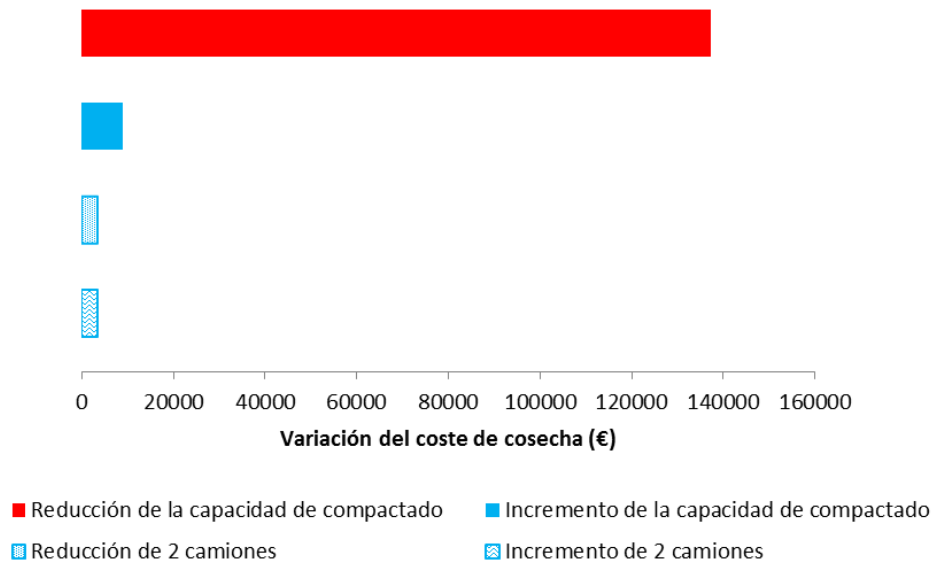
Consecuentemente puede concluirse que el sistema es más sensible a un correcto dimensionamiento de los compactadores que al número de camiones.

Figura 5: Variación en los coste de cosechado con el incremento o reducción en el número de camiones o en la capacidad de compactado, en relación con la combinación de mínimo coste.

Cosechadora 6 líneas



Cosechadora 8 líneas



4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos en este trabajo podemos concluir que la simulación de eventos discretos es una herramienta de utilidad para la simulación de la cosecha de maíz forrajero, permitiendo abordar eficientemente la planificación estratégica de la actividad. La combinación de mínimo coste varía en función del tipo de cosechadora utilizada. Con cosechadoras de 6 líneas la configuración óptima se alcanza con 27 camiones y con cosechadoras de 8 líneas requiere 33 camiones. El cruce en las curvas de coste de ambas cosechadoras se ha producido con 30 camiones. Los costes de cosechado en la campaña han sido similares con el uso de cosechadoras de 6 y 8 líneas, cuando los camiones y compactadores han sido optimizados. Sin embargo si consideramos cosechadoras de 8 líneas, la longitud de la campaña de cosechado se reduce en más de 6 días, aspecto de gran importancia considerando el reducido intervalo temporal para la realización de esta operación. La utilización de un número de camiones inferior al óptimo tendrá un mayor impacto en la duración de la cosecha que el sobredimensionamiento de la flota de camiones.

Como era previsible, en escenarios de mínimo coste, los tiempos de inactividad por esperas de camión son superiores en las cosechadoras de 6 líneas que en las de 8 líneas, derivado del mayor coste horario de estas últimas.

El análisis de sensibilidad demuestra que, para las dos cosechadoras consideradas, el proceso de cosecha es más sensible a desvíos en la capacidad de compactado que en el número de camiones utilizados, respecto al valor óptimo determinado. Consecuentemente ha de prestarse mayor atención a un correcto dimensionamiento de los equipos de compactado que al número de camiones involucrados.

5. Referencias

- Amiama, C., Pedrido, R., & Álvarez, C.J. (2012). Optimización del ciclo de cosecha del maíz forrajero mediante la utilización de software de simulación de eventos discretos. En: Libro de resúmenes del XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. 11–13 Julio. Valencia (España).
- Buckmaster, D.R. (2006). A systems approach to forage harvest operations. En: *American Society of Agricultural Engineers Meetings Papers*. Proceedings of the ASABE Annual International Meeting. 9–12 Julio; Portland, Oregon. ASAE Paper No.061087.