



TESIS DOCTORAL

**CARACTERIZACIÓN DE LA COSECHA
MECANIZADA DE MAÍZ FORRAJERO
EN GALICIA. ESTUDIOS DE CASO Y
DESARROLLO DE HERRAMIENTAS
DE AYUDA A LA DECISIÓN**

Noelia Cascudo Cao

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
AGROFORESTAL

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

LUGO

SEPTIEMBRE 2016





TESIS DOCTORAL

**CARACTERIZACIÓN DE LA COSECHA
MECANIZADA DE MAÍZ FORRAJERO
EN GALICIA. ESTUDIOS DE CASO Y
DESARROLLO DE HERRAMIENTAS
DE AYUDA A LA DECISIÓN**

Fdo.....

Noelia Cascudo Cao

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
AGROFORESTAL

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

LUGO

SEPTIEMBRE 2016



AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

D. CARLOS AMIAMA ARES profesor del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Escuela Politécnica Superior de Lugo

D. JAVIER BUENO LEMA profesor del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Escuela Politécnica Superior de Lugo

Como Directores de la Tesis Doctoral titulada “CARACTERIZACIÓN DE LA COSECHA MECANIZADA DE MAÍZ FORRAJERO EN GALICIA. ESTUDIOS DE CASO Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE AYUDA A LA DECISIÓN”

Presentada por Dña. NOELIA CASCUDO CAO, alumna del Programa de Doctoramiento en Ingeniería para el Desarrollo Rural, reglado por el R.D. 1393/2007

Autorizan la presentación de la tesis indicada, considerando que reúne los requisitos exigidos en el artículo 34 del reglamento de Estudios de Doctorado, y como Directores de la misma no incurre en las causas de abstención establecidas en la ley 30/1992.

Fdo.: CARLOS AMIAMA ARES

Fdo.: JAVIER BUENO LEMA



AGRADECIMIENTOS

Desde estas líneas pretendo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que durante estos años de trabajo han estado a mi lado, amigos, familia y compañeros, y que de una forma u otra han contribuido a que esta tesis haya llegado a buen fin.

Considero que todo aquel que ha tenido alguna relación conmigo durante el desarrollo de esta tesis merece mi total agradecimiento, ya que estoy segura de que en algún momento ha escuchado estoicamente quejas y lamentaciones, alegrías y satisfacciones o entusiastas explicaciones de los avances en los estudios realizados.

Especialmente quisiera mostrar mi gratitud a D. Carlos Amiama Ares por tener siempre la puerta abierta para resolver dudas, por sus consejos, paciencia, directrices y, en general, solucionar todo tipo de problemas que han surgido en el desarrollo de los trabajos. Para mí no sólo ha sido el mejor Director de Tesis que he podido tener, sino que me ha demostrado en todo momento que es un gran compañero al que siempre podré recurrir.

Quisiera agradecer a D. Javier Bueno Lema su apoyo y la gran confianza que ha depositado en mí como Director de esta Tesis y a lo largo de todas las tareas que, bajo su dirección, he realizado en el Departamento de Ingeniería Agroforestal, de la Escuela Politécnica Superior, contando siempre con su inestimable consejo y experiencia.

Agradecimiento especial a D. Xan Carlos López Hermida por su desinteresada ayuda y su apoyo durante el trabajo diario. Su estrecha colaboración, aportación de ideas y conocimientos de informática han hecho más amena la realización de muchos de los trabajos llevados a cabo.

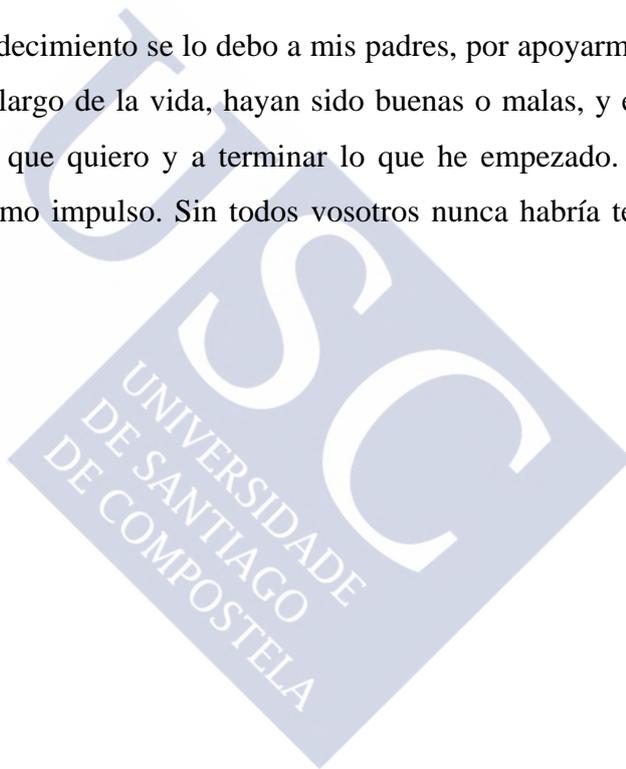
La realización de esta tesis no sería posible sin la colaboración del Departamento de Mecanización y Cultivos de la Cooperativa Os Irmandiños que ha permitido el acceso a la mayor parte de los datos necesarios para los estudios realizados. En especial, quisiera agradecer a D. Santiago Sousa Lema su estrecha colaboración en muchas de las tareas realizadas, así como su completa disposición a resolver cualquier duda o problema que se haya podido plantear.

Al Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Santiago de Compostela agradecerle la buena disposición, amabilidad y paciencia mostrada durante esta colaboración que ha permitido llevar a cabo esta tesis.

Agradecimiento al Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Escuela Politécnica Superior por la orientación y asesoramiento en la realización del trabajo, así como por el préstamo de todos los recursos necesarios.

Agradecimiento a todos mis compañeros, Luis Alberto Mazoy, Jorge Gil, Juan Carlos Fernández, Daniel Expósito, Cesar Agra, Yolanda Campa y Clara M^a Barcia, por su colaboración y disposición.

Finalmente, mi mayor agradecimiento se lo debo a mis padres, por apoyarme en todas las decisiones que he tomado a lo largo de la vida, hayan sido buenas o malas, y especialmente por enseñarme a luchar por lo que quiero y a terminar lo que he empezado. Gracias a mi pareja y a mi hijo por este último impulso. Sin todos vosotros nunca habría terminado esta Tesis Doctoral.







Resumen

En los últimos años el precio de la leche ha seguido estancado y/o con bajadas de precios, mientras que las materias primas para la fabricación de concentrados han experimentado una fuerte subida de precios. Esto, ha llevado a que muchos ganaderos busquen estrategias para reducir los costes de producción. Las explotaciones deben realizar una gestión eficiente y un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles. Sin duda el coste de ensilado del maíz forrajero es un elemento clave en la cuenta de resultados de las explotaciones de vacuno de leche en el Noroeste español. En este trabajo se han analizado aspectos fundamentales de este proceso en aras de una mejora de los rendimientos obtenidos. Para ello se ha realizado un análisis exhaustivo del proceso de ensilado, evaluando distintas alternativas existentes en la actualidad y proponiendo herramientas y procedimientos que contribuirán a mejoras en la eficiencia del proceso.

El elevado coste de los equipos de cosechado exige que los agricultores se agrupen en cooperativas que poseen parques de maquinaria. El proceso de ensilado de maíz forrajero requiere una coordinación perfecta entre varios elementos (cosechadoras de forraje, vehículos de transporte y equipos de extendido y compactado) con el objeto de evitar cuellos de botella. Para el análisis y diagnóstico de las condiciones de trabajo, en nuestro ámbito de estudios se han realizado análisis de ciclos de cosecha. Los datos obtenidos nos han permitido extraer conclusiones sobre la idoneidad de los equipos utilizados, detectando aquellas operaciones en las que se producen ineficiencias, derivados de un incorrecto dimensionamiento del sistema. En general puede concluirse que es necesario prestar una mayor atención al correcto dimensionamiento de los equipos de transporte utilizados.

En este trabajo se ha analizado además el comportamiento de las dos cosechadoras autopropulsadas de forraje más utilizadas en el Noroeste español, con tolva y sin tolva. La diferencia principal entre ambas está en el método de almacenamiento de forraje, una lo transfiere directamente a la tolva que lleva incorporada, mientras que la segunda necesita trabajar de forma simultánea, al menos, con un transporte donde poder descargar el material recolectado. Se han analizado parámetros como la capacidad efectiva de trabajo, distancia recorrida, trayectoria más habitual para la cosecha de las parcelas, la velocidad de campo y el coste de la cosecha. Los resultados obtenidos muestran como la necesidad de coordinación con el vehículo de transporte determina la actividad de la cosechadora sin tolva. La ausencia

de esta interacción permite a la cosechadora con tolva obtener una mayor capacidad efectiva de trabajo, debido fundamentalmente al menor tiempo de maniobra. Sin embargo, las diferencias entre los procesos no son, generalmente, suficientes para concluir que hay diferencias significativas en los aspectos analizados.

Otro aspecto analizado en este trabajo es el proceso de llenado del silo, con el objeto de determinar la incidencia que aspectos tales como la anchura del silo, el nivel de llenado y la pendiente de la rampa de acceso tienen sobre la capacidad de extendido y compactado de los equipos. Fruto del estudio realizado se ha concluido que para una correcta gestión del proceso es necesario coordinar adecuadamente los vehículos de extendido y compactado, así como evitar pendientes excesivas en la rampa de acceso.

Los estudios realizados revelan que las cosechadoras autopropulsadas son el componente que más afecta al coste del proceso. Por lo tanto, la gestión eficiente de las cosechadoras disponibles es esencial. Se ha observado, que hay, básicamente, dos maneras de mejorar el rendimiento de las cosechadoras: reducir las distancias de desplazamiento entre fincas y diseñar una planificación eficiente para los vehículos de transporte. En este trabajo se han desarrollado herramientas de ayuda a la decisión para las operaciones de ensilado que inciden en estos dos aspectos. Por una parte se persigue la obtención de las rutas que proporcionen menores distancias de viaje para la cosechadora, dando prioridad a la fecha de recolección. Paralelamente se pretende dimensionar adecuadamente los equipos de transporte y compactación, de forma que se minimice el coste total del ciclo de ensilado de maíz.

Las herramientas diseñadas se han evaluado en un escenario real y los resultados muestran que, mediante la adecuada gestión de rutas y coordinación de equipos, se pueden obtener ahorros significativos en comparación con las programaciones elaboradas sin herramientas de ayuda a la decisión. Bajo las condiciones ensayadas podemos concluir que la recolección de ensilado es más sensible a una correcta gestión del número de transportes que a una gestión eficiente en la ruta de las cosechadoras.

Palabras clave: Cosechadoras de millo, análisis de ciclos, logística, gestión de flotas.

Resumo

Nos últimos anos o prezo do leite seguiu estancado e/ou con baixadas de prezos, mentres que as materias primas para a fabricación de concentrados experimentaron unha forte subida de prezos. Isto, levou a moitos gandeiros a buscar estratexias para reducir os custos de produción. As explotacións deben realizar unha xestión eficiente e un mellor aproveitamento dos recursos dispoñibles. Sen dubida o custo do ensilado de millo forraxeiro é un elemento clave na conta de resultados das explotacións de vacún de leite no Noroeste español. Neste traballo analizáronse aspectos fundamentais deste proceso en aras dunha mellora dos rendementos obtidos. Para elo realizouse unha análise exhaustiva do proceso de ensilado, avaliando distintas alternativas existentes na actualidade e propoñendo ferramentas e procedementos que contribuirán a melloras na eficiencia do proceso.

O elevado custo dos equipos de recolleita esixe que os agricultores se agrupen en cooperativas que posúen parques de maquinaria. O proceso de ensilado de millo forraxeiro require unha coordinación perfecta entre varios elementos (colleitoras de forraxe, vehículos de transporte e equipos de estendido e compactado) co obxecto de evitar embotellamentos. Para a análise e diagnóstico das condicións de traballo, no noso ámbito de estudos, realizáronse análises de ciclos de colleita. Os datos obtidos permitíronnos extraer conclusións sobre a idoneidade dos equipos empregados, detectando aquelas operacións nas que se producen ineficiencias, derivadas dun incorrecto dimensionamento do sistema. En xeral pode concluírse que é preciso prestar unha maior atención ó correcto dimensionamento dos equipos de transporte empregados.

Neste traballo analizouse, ademais, o comportamento das dúas colleitoras autopropulsadas de forraxe mais empregadas no Noroeste español, con caixa e sen caixa. A diferenza principal entre ambas está no método de almacenamento de forraxe, unha transfíreo directamente á caixa que leva incorporada, mentres que a segunda necesita traballar de forma simultánea, al menos, cun transporte onde poder descargar o material recollido. Analizáronse parámetros como a capacidade efectiva de traballo, distancia percorrida, traxectoria mais habitual para a colleita das parcelas, a velocidade de campo e o custo da colleita. Os resultados obtidos mostran como a necesidade de coordinación co vehículo de transporte determina a actividade da colleitadora sen caixa. A ausencia desta interacción permite á colleitadora con caixa obter unha maior capacidade efectiva de traballo, debido

fundamentalmente ó menor tempo de manobras. Nembargantes, as diferenzas entre os procesos non son, xeralmente, suficientes para concluír que hai diferenzas significativas nos aspectos analizados.

Outro aspecto analizado neste traballo é o proceso de enchido do silo, co obxecto de determinar a incidencia que aspectos tales como a anchura do silo, o nivel de enchido e a pendente da rampa de acceso teñen sobre a capacidade de estendido e compactado dos equipos. Froito do estudo realizado conclúese que para unha correcta xestión do proceso é necesario coordinar adecuadamente os vehículos de estendido e compactado, así como evitar pendentes excesivas na rampa de acceso.

Os estudos realizados revelan que as colleitadoras autopropulsadas son o compoñente que máis afecta ó custo do proceso. Polo tanto, a xestión eficiente das colleitadoras dispoñibles é esencial. Observouse, que hai, basicamente, dous xeitos de mellorar o rendemento das colleitadoras: reducir as distancias de desprazamento entre leiras e deseñar unha planificación eficiente para os vehículos de transporte. Neste traballo desenvolvéronse ferramentas de axuda a decisión para as operacións de ensilado que inciden nestes dous aspectos. Por unha parte perséguese a obtención das rutas que proporcionen menores distancias de viaxe para a colleitadora, dando prioridade á data de recolección. Paralelamente pretendese dimensionar adecuadamente os equipos de transporte e compactado, de forma que se minimize o custo total do ciclo de ensilado de millo.

As ferramentas deseñadas avaliáronse nun escenario real e os resultados mostran que, mediante a axeitada xestión de rutas e coordinación de quipos, pódense obter aforros significativos en comparación coas programacións elaboradas sen ferramentas de axuda á decisión. Baixo as condicións ensaiadas podemos concluír que a recolección de ensilado é mais sensible a unha correcta xestión do número de transportes que a unha xestión eficiente da ruta das colleitadoras.

Palabras clave: Cosechadoras de maíz, análisis de ciclos, logística, gestión de flotas.

Abstract

In recent years the price of milk has continued with stagnant and / or price reductions, while raw materials for the production of concentrate have experienced a sharp rise in prices. This has led many farmers to seek strategies to reduce production costs. Dairy farms should make efficient management and better use of available resources. Unquestionably the cost of forage maize silage is a key element in the income of dairy farms in the Northwest of Spanish. In this paper we have analysed fundamental aspects of this process in the interest of improving yields. To this end it has conducted a thorough analysis of the ensiling process, evaluating different alternatives at present and proposing tools and procedures that contribute to improvements in process efficiency.

High costs of harvesting equipment requires farmers grouped in cooperatives that own equipment. The process of harvesting corn silage requires perfect coordination between various elements (harvesters, vehicles for transport and equipment for spreading and packing) in order to avoid bottlenecks. For analysis and diagnosis of working conditions in our field studies we have been conducted harvest cycle analysis. Data obtained have enabled us to draw conclusions about the suitability of the equipment used, detecting those operations where inefficiencies resulting from incorrect sizing of the system occur. In general it can be concluded that it is necessary to pay greater attention to proper sizing of transport vehicles.

This paper has also analysed the behaviour of the two self-propelled harvesters forage most used in the Northwest of Spain, with hopper and without hopper. The main difference between the two harvesters is the forage storing method. Harvesters with hopper transfer the forage directly to the hopper, while the second kind needs to work simultaneously, at least, with a transport where it can download the harvested forage. We have analysed parameters such as the effective field capacity, distance travelled, field patterns, speed and harvest cost. Results show the need for coordination with the transport vehicles determines the activity of the harvester without hopper. The absence of this interaction allows the harvester with hopper get more effective field capacity, mainly due to reduced manoeuvring times. However, differences between processes are generally not sufficient to conclude that there are significant differences in the aspects analysed.

Another aspect analysed is the process of forage handling in the silo, in order to determine the impact that aspects such as the width of the silo, the fill level and the ramp

slope have on the equipment ability for spreading and packing. The result of the study conducted has concluded that for suitable process management is necessary to coordinate the spreading and packing vehicles and avoid excessive slopes on the access ramp.

Our research has concluded that harvesters are the component that most affects the cost of the process. Therefore, the efficient management of harvesters is essential. It has been observed that there are basically two ways to improve harvester performance: reduce travelled distances and design an efficient planning for transport vehicles. In this work we have developed decision support tools for silage corn process that involve these two aspects. On the one hand it seeks routes that provide shortest distances between fields for the harvest, prioritizing the collection date pursued. At the same time it expected to properly size transport and packing equipment, so that the total cost of corn silage cycle is minimized.

Designed tools have been tested in a real scenario and results show that, through proper route management and equipment coordination, significant savings can be achieved compared to the scheduling performed without decision support. Under the conditions tested, we can conclude that the silage harvest is more sensitive to a proper management of the transports than to an efficient route management of the harvesters.

Keywords: corn harvesters, cycle analysis, logistics, fleet management.





INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	LA IMPORTANCIA DEL MAÍZ FORRAJERO EN EL SECTOR GANADERO GALLEGO	7
2.2	MECANIZADO DE LA RECOLECCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO	10
2.2.1	<i>Caracterización del parque de cosechadoras de Galicia</i>	10
2.2.2	<i>Aspectos relativos a las operaciones mecanizadas en la cosecha de forraje</i> 12	
2.2.3	<i>Monitorización del proceso de cosechado</i>	16
2.2.4	<i>Caracterización del proceso de llenado del silo</i>	18
2.3	CARACTERIZACIÓN DE LAS OPERACIONES DE ENSILADO. ANÁLISIS DE CICLOS.	20
2.3.1	<i>El proceso de ensilado como sistema</i>	20
2.3.2	<i>Metodología para el análisis de ciclos</i>	22
2.4	ANÁLISIS DE RUTAS.....	24
2.4.1	<i>Análisis y planificación de rutas</i>	24
2.4.2	<i>Problema matemático del enrutamiento</i>	26
2.4.3	<i>La gestión de flotas en el campo agrario. Otras experiencias</i>	29
3	OBJETIVOS	33
4	MATERIAL Y MÉTODOS	35
4.1	GENERALIDADES	35
4.1.1	<i>CAVI</i>	35
4.1.2	<i>Equipos utilizados</i>	37
4.1.3	<i>Localización de las parcelas analizadas y base cartográfica</i>	46
4.1.4	<i>Descripción del proceso de cosecha</i>	51

4.2	ANÁLISIS DE CICLOS EN LA COSECHA DE MAÍZ FORRAJERO	55
4.2.1	<i>Metodología para el análisis de ciclos</i>	55
4.2.2	<i>Diseño experimental</i>	73
4.3	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE DISTINTAS COSECHADORAS AUTOPROPULSADAS EN LA RECOLECCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO	74
4.3.1	<i>Metodología</i>	74
4.3.2	<i>Diseño experimental</i>	76
4.4	ESTUDIO DEL PROCESO DE DESCARGA EN EL SILO	78
4.4.1	<i>Metodología</i>	78
4.4.2	<i>Diseño experimental</i>	79
4.5	GESTIÓN DE RUTAS	81
4.5.1	<i>Mecánica de los algoritmos genéticos</i>	81
4.5.2	<i>Metodología empleada para la gestión de rutas</i>	83
4.5.3	<i>Diseño experimental</i>	93
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	99
5.1	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLOS DE LA COSECHA DE MAÍZ FORRAJERO	99
5.1.1	<i>Determinación de la capacidad efectiva de la cosechadora</i>	99
5.1.2	<i>Resultados del análisis de ciclos: método Buckmaster y análisis individual</i> <i>100</i>	
5.1.3	<i>Análisis de los tiempos invertidos por la cosechadora en cada jornada</i> <i>laboral durante la campaña 2008.</i>	101
5.1.4	<i>Número de transportes necesarios en función de la capacidad efectiva de la</i> <i>cosechadora (t h⁻¹) y de la distancia al silo (km)</i>	106
5.1.5	<i>Variación del coste de la operación de recolección del ensilado de maíz en</i> <i>función de la distancia y del número de camiones empleados</i>	108

5.1.6	<i>Número de transportes necesarios para la cosecha de maíz forrajero, considerando características de la parcela, rendimientos de cultivo, y distancia a silo</i>	112
5.2	RESULTADOS OBTENIDOS COMPARANDO COSECHADORAS AUTOPROPULSADAS CON TOLVA Y SIN TOLVA INCORPORADA	118
5.2.1	<i>Comparación de las capacidades efectivas de trabajo</i>	118
5.2.2	<i>Evaluación de las trayectorias</i>	124
5.2.3	<i>Evaluación económica</i>	127
5.3	CAPACIDAD DE EXTENDIDO Y COMPACTADO EN LOS SILOS.....	129
5.4	EVALUACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA GESTIÓN DE RUTAS	137
5.4.1	<i>Determinación de los valores óptimos de iteraciones, población inicial y % de mutación</i>	137
5.4.2	<i>Evaluación de la aplicación</i>	140
5.4.3	<i>Determinación del número óptimo de camiones</i>	147
5.4.4	<i>Evaluación económica de los ahorros conseguidos</i>	148
6	CONCLUSIONES	151
7	BIBLIOGRAFÍA	155



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VISTA GENERAL DE LOS SILOS DEL CAVI	36
FIGURA 2. COSECHADORA NEWHOLLAND FX58	38
FIGURA 3. COSECHADORA CLAAS JAGUAR 950	39
FIGURA 4. PALA Y TRACTOR TRABAJANDO EN EL SILO	40
FIGURA 5. MONITOR TÁCTIL INSTALADO EN UNA DE LAS COSECHADORAS.....	41
FIGURA 6. RECEPTOR GPS DATALOGGER.....	43
FIGURA 7. VISOR DE FINCAS CON PARTE DE LA TRAYECTORIA SEGUIDA	44
FIGURA 8. PANTALLA PROCESAMIENTO DE DATOS DE LA COSECHADORA	45
FIGURA 9. LOCALIZACIÓN DE PARCELAS DE LOS MUNICIPIOS DE BARREIROS, RIBADEO Y TRABADA USADAS EN EL ESTUDIO	47
FIGURA 10. TRASPASE DE FORRAJE DE LA COSECHADORA CON TOLVA.	53
FIGURA 11. IMAGEN DE UNA PARCELA DE RIBADEO COSECHADA PARCIALMENTE	56
FIGURA 12. IMAGEN DE UNA PARCELA DE TRABADA EN LA QUE LA SUPERFICIE COSECHADA COINCIDE CON LA ALMACENADA EN LA BASE CARTOGRÁFICA	57
FIGURA 13. TRAYECTORIA DE LA COSECHADORA EN UNA FINCA DE TRABADA, LOS PUNTOS EN AZUL REPRESENTAN LAS PARADAS DE LA COSECHADORA.	66
FIGURA 14. EVOLUCIÓN DE LOS COSTES DE LA RECOLECCIÓN (€ H^{-1}) EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CAMIONES ($K=6,30$ $C=50$ €) PARA $C_e=1$ HA H^{-1}	69
FIGURA 15. EVOLUCIÓN DE LOS COSTES DE LA COSECHA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CAMIONES Y DEL RATIO ENTRE EL COSTE HORARIO DEL CAMIÓN Y EL COSTE HORARIO DE LA COSECHADORA (K).....	71
FIGURA 16. CICLO COSECHADORA CON TOLVA	74
FIGURA 17. CICLO COSECHADORA SIN TOLVA.....	75
FIGURA 18. ESCALAS EN LAS PAREDES DEL SILO.....	78

FIGURA 19. RUTA PROPORCIONADA POR APLICACIÓN GESTIÓN DE RUTAS (DIFERENTES COLORES EN LAS PARCELAS A COSECHAR INDICAN QUE SON DE DISTINTO SOCIO).....	86
FIGURA 20. INTERFACE DE LA APLICACIÓN DE GESTIÓN DE RUTAS	88
FIGURA 21. PANTALLA PARA INTRODUCIR LOS DATOS DE LA JORNADA DE TRABAJO.....	88
FIGURA 22. PANTALLA “TABLA RESULTADOS”	90
FIGURA 23. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS TIEMPOS DE ACTIVIDAD DE LA COSECHADORA	103
FIGURA 24. VARIACIÓN DE LOS COSTES DE CADA JORNADA DE LA COSECHADORA Nº 7, EN FUNCIÓN DEL Nº DE TRANSPORTES EMPLEADOS.	104
FIGURA 25. VARIACIÓN DE LOS COSTES DE CADA JORNADA DE LA COSECHADORA Nº 7, EN FUNCIÓN DEL Nº DE TRANSPORTES EMPLEADOS.	105
FIGURA 26. TRANSPORTES NECESARIOS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA FINCA-SILO, PARA UNA VELOCIDAD MEDIA DE 20 KM H ⁻¹	107
FIGURA 27. VARIACIÓN DE LOS COSTES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA, ENTRE FINCA Y SILO, PARA UNA CAPACIDAD EFECTIVA DE LA COSECHADORA (C _{M,H}) DE 51,90 T H ⁻¹	109
FIGURA 28. VARIACIÓN DE LOS COSTES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA, ENTRE FINCA Y SILO, PARA UNA CAPACIDAD EFECTIVA DE LA COSECHADORA DE 67,47 T H ⁻¹	110
FIGURA 29. COMPARATIVA DE LOS COSTES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA, CAPACIDAD DE LA COSECHADORA Y Nº DE CAMIONES.....	111
FIGURA 30. VARIACIÓN DE LOS COSTES EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE TRANSPORTE, PARA C _{M,H} =51,90 T H ⁻¹	111
FIGURA 31. TIEMPO DE COSECHA SEGÚN SUPERFICIE DE LA PARCELA	120
FIGURA 32. TIEMPO DE COSECHA SEGÚN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO	121
FIGURA 33. DISTANCIA RECORRIDA EN FUNCIÓN DE LA SUPERFICIE DE LA PARCELA.....	122
FIGURA 34. SOLAPE PRODUCIDO EN LAS PARCELAS EN FUNCIÓN DE LA SUPERFICIE DE LA PARCELA.....	123
FIGURA 35. TRAYECTORIA SEGUIDA POR LA COSECHADORA CON TOLVA	125

FIGURA 36. TRAYECTORIA 1, SEGUIDA POR LA COSECHADORA SIN TOLVA EN FINCAS MÁS O MENOS RECTANGULARES	125
FIGURA 37. TRAYECTORIA 2, SEGUIDA POR LA COSECHADORA SIN TOLVA.....	126
FIGURA 38. COSTE TOTAL DE LA OPERACIÓN DE ENSILADO FRENTE A LA SUPERFICIE COSECHADA	128
FIGURA 39. DÍA 19/09/2012. FLUJO DE ENTRADA DE FORRAJE EN SILO 11.....	129
FIGURA 40. DÍA 19/09/2012. EVOLUCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL (M) EN SILO 11	130
FIGURA 41. DÍA 20/09/2012. FLUJO DE ENTRADA DE FORRAJE EN SILO 11.....	130
FIGURA 42. DÍA 20/09/2012. EVOLUCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL (M) EN SILO 11	131
FIGURA 43. DÍA 21/09/2012. FLUJO DE ENTRADA DE FORRAJE EN SILO 11.....	132
FIGURA 44. DÍA 21/09/2012. EVOLUCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL (M) EN SILO 11	132
FIGURA 45. DÍA 06/10/2012. FLUJO DE ENTRADA DE FORRAJE EN SILO 12.....	133
FIGURA 46. DÍA 06/10/2012. EVOLUCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL (M) EN SILO 12.....	133
FIGURA 47. DÍA 07/10/2012. FLUJO DE ENTRADA DE FORRAJE EN SILO 12.....	134
FIGURA 48. DÍA 07/10/2012. EVOLUCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL (M) EN SILO 12.....	134
FIGURA 49. DÍA 08/10/2012. FLUJO DE ENTRADA DE FORRAJE EN SILO 12.....	135
FIGURA 50. DÍA 08/10/2012. EVOLUCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL (M) EN SILO 12.....	135
FIGURA 51. INFLUENCIA DEL NÚMERO DE ITERACIONES EN LA LONGITUD DE LA RUTA Y EN EL TIEMPO REQUERIDO PARA OBTENER UNA SOLUCIÓN.....	138
FIGURA 52. INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LA POBLACIÓN INICIAL EN LA LONGITUD DE LA RUTA Y EN EL TIEMPO REQUERIDO PARA OBTENER UNA SOLUCIÓN.	139
FIGURA 53. DISTANCIAS OBTENIDAS EN LA COSECHADORA N°6 CON CADA UNO DE LOS ALGORITMOS EVALUADOS FRENTE A LA SOLUCIÓN REAL	140
FIGURA 54. DISTANCIAS OBTENIDAS EN LA COSECHADORA N°7 CON CADA UNO DE LOS ALGORITMOS EVALUADOS FRENTE A LA SOLUCIÓN REAL	141

FIGURA 55. DISTANCIAS OBTENIDAS, PARA LA COSECHADORA N°6, CON CADA UNO DE LOS ALGORITMOS EVALUADOS AGRUPANDO SEMANAS..... 142

FIGURA 56. DISTANCIAS OBTENIDAS, PARA LA COSECHADORA N°7, CON CADA UNO DE LOS ALGORITMOS EVALUADOS AGRUPANDO SEMANAS..... 143



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VARIACIÓN DE LA OCUPACIÓN DE LA COSECHADORA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE TRANSPORTES	70
TABLA 2. NÚMERO DE SOCIOS Y PARCELAS COSECHADAS POR SEMANA	96
TABLA 3. CAPACIDAD EFECTIVA DE LA COSECHADORA PARA CADA UNA DE LAS FINCAS ANALIZADAS	99
TABLA 4. VALORES MEDIOS OBTENIDOS CON LOS DOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CICLOS	100
TABLA 5. TIEMPOS MEDIOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE LA CAMPAÑA 2008 DE LA COSECHA DE MAÍZ FORRAJERO.....	102
TABLA 6. DATOS Y RESULTADOS OBTENIDOS APLICANDO LA FUNCIÓN DE REGRESIÓN	112
TABLA 7. NÚMERO DE TRANSPORTES NECESARIOS SEGÚN LA FUNCIÓN DE REGRESIÓN.....	113
TABLA 8. COMPARATIVA DEL N° DE TRANSPORTES OBTENIDO EN FUNCIÓN DE LA FIGURA 26, QUE RELACIONA LA CAPACIDAD REAL DE LA COSECHADORA Y LA DISTANCIA Y A TRAVÉS DEL ANÁLISIS INDIVIDUAL DE CICLOS.....	116
TABLA 9. DATOS GENERALES.....	118
TABLA 10. RESULTADOS MEDIOS DE LAS COSECHADORAS ANALIZADAS.....	119
TABLA 11. RESULTADOS MEDIOS DE CAPACIDAD EFECTIVA Y DISTANCIA RECORRIDA POR RANGOS DE SUPERFICIE	120
TABLA 12. RESULTADOS DE VELOCIDAD MEDIOS POR RANGOS DE SUPERFICIE	124
TABLA 13. COMPARATIVA DE COSTE MEDIO DISCRIMINADO POR SUPERFICIE.....	127
TABLA 14. DISTANCIAS Y AHORROS OBTENIDOS CON LOS DISTINTOS ALGORITMOS, COSECHADORA N°6.....	144
TABLA 15. DISTANCIAS Y AHORROS OBTENIDOS CON LOS DISTINTOS ALGORITMOS, COSECHADORA N°7.....	144
TABLA 16. COMPARACIÓN DE LAS DISTANCIAS OBTENIDAS CON DISTINTOS NIVELES DE TOLERANCIA CON EL ALGORITMO PGC.....	145

TABLA 17. COMPARACIÓN DE LAS DISTANCIAS OBTENIDAS CON DISTINTOS NIVELES DE TOLERANCIA CON EL ALGORITMO PG	146
TABLA 18. COMPARACIÓN DE LAS DISTANCIAS OBTENIDAS CON DISTINTOS NIVELES DE TOLERANCIA CON EL ALGORITMO CG.....	147
TABLA 19. ANÁLISIS DE LOS TIEMPOS DE ESPERA DE LA COSECHADORA	148
TABLA 20. AHORROS CONSEGUIDOS CON EL ALGORITMO PGC	149



1 INTRODUCCIÓN

Tanto el sector agrícola como el ganadero, están experimentando desde las últimas décadas un cambio de cara a la intensificación en los procesos de producción, dejando atrás los sistemas tradicionales. Se abandona una economía de subsistencia de tipo familiar para producir de cara al mercado.

En Galicia las explotaciones agrarias están equipadas con unos sistemas del más alto nivel de modernización, encontrando el punto más elevado de modernización en las explotaciones lecheras de ganado vacuno, ya que estas requieren más tecnificación en su proceso de producción que las explotaciones de carne.

En los últimos años el precio de la leche ha seguido estancado y/o con bajadas de precios, mientras que las materias primas para la fabricación de concentrados para la alimentación del ganado han experimentado una fuerte subida de precios. Esto, ha llevado a que muchos ganaderos busquen estrategias para reducir los costes de producción, aumentando la producción de forrajes y también se ha visto un aumento del asociacionismo entre ganaderos, con el objetivo de mantener la actividad en el sector lácteo.

Galicia es la comunidad con mayor producción de maíz forrajero, representando los últimos años el 58,6 % de la producción nacional de maíz forrajero. Y la producción de silo representa el coste de mayor importancia en la producción de leche y, a su vez, el coste más grande de la producción de silo está relacionado con la maquinaria empleada. La mayor parte de la maquinaria de la que disponen los ganaderos tan sólo se utiliza en las campañas de recolección de forrajes, lo que conlleva pocas horas de uso y consecuentemente plazos de amortización muy elevados.

Por este motivo, muchos agricultores optan por contratar la cosecha de maíz forrajero a cooperativas de maquinaria agrícola con el fin de reducir los gastos derivados de los costes fijos de los equipos y los costes de mano de obra, y mejorar los rendimientos al poder optar a equipos de mayor capacidad y mayores capacidades de trabajo. Esto les permite obtener productos de mayor calidad para la alimentación del ganado y reducir los tiempos de recolección de forrajes, algo que a título individual sería impensable.

La cosecha de maíz forrajero debe considerarse como un sistema en el que interactúan distintos procesos (recolección, transporte y extendido en el silo). Dentro de cada proceso se desarrollarán una serie de actividades (cosecha propiamente dicha, alineamiento con los transportes, transporte propiamente dicho, esperas por transporte, descarga en silo, extendido del forraje, ...).

La selección y dimensión de los equipos son aspectos de suma importancia a la hora de tratar de reducir los costes e incrementar la eficiencia. Por este motivo es necesario conocer lo mejor posible todas las operaciones a realizar, para poder luego identificar y estudiar en detalle aquellas actividades que son susceptibles de mejorar, incrementando en consecuencia los rendimientos de la cosecha.

El análisis de los ciclos de cosecha de maíz y capacidad efectiva de trabajo es algo ya estudiado por otros autores, pero que deberemos adaptar a las características específicas de las fincas en Galicia, puesto que estaremos hablando de fincas de un tamaño mucho menor y en algunos casos con pendientes acusadas y formas irregulares que pueden condicionar los tiempos de cosecha. Este análisis redundará en una optimización de los equipos empleados, detectando aquellas operaciones que no están optimizadas, por no contar con un número de equipos adecuadamente dimensionado.

Analizar el ciclo de la cosecha de maíz forrajero nos facilitará la comprensión de las interrelaciones existentes entre las distintas máquinas que intervienen en el sistema y favorecerá la creación y evaluación de soluciones alternativas a las deficiencias que se puedan encontrar. Conocer el tiempo que invierte cada componente del sistema en realizar una actividad permitirá ajustar la planificación y optimizar los recursos. De este modo podremos minimizar los tiempos de espera de aquellos elementos que representan los costes más grandes para la cosecha de maíz forrajero.

Para la realización del presente trabajo se ha contado con la colaboración de la Cooperativa Os Irmandiños, situada en la Mariña Lucense, y que dispone, en la actualidad, de cinco cosechadoras autopropulsadas de maíz forrajero. La actividad de ensilado, ya sea de maíz o hierba, afecta a unos 1080 socios, trabajando una superficie de aproximadamente 1500 hectáreas, repartidas por las provincias gallegas de Lugo y A Coruña y algunos municipios de la zona occidental del Principado de Asturias.

Para realizar la labor de recolección del maíz, se han estudiado dos tipos de cosechadoras autopropulsadas: cosechadoras de tolva o cosechadoras sin tolva. La principal diferencia entre ambos tipos de máquinas, es que las cosechadoras de tolva, integran en su chasis una tolva que forma parte del conjunto, en el que se almacena el forraje procesado hasta alcanzar su máxima capacidad. En este momento transfiere su carga a un vehículo de transporte, no siendo necesaria la interacción del vehículo durante la cosecha, ya que esta se realiza de forma autónoma.

Las cosechadoras sin tolva requieren del trabajo en paralelo de un vehículo de carga, ya que no tienen opción a autoportarla. El sistema de trabajo de las cosechadoras sin tolva, requiere la presencia de al menos dos vehículos de carga, preferentemente tractores con remolque, para que el forraje que procesa la cosechadora pueda almacenarse al tiempo que esta lo cosecha. Una vez que el primer vehículo está totalmente cargado, este debe ser relevado por otro, para que la cosechadora no deba permanecer parada y siga realizando la cosecha.

En este sistema, la capacidad de carga del remolque y la distancia entre la finca y el punto de acopio, van a determinar el número mínimo de vehículos de transporte para que la cosecha sea continúa.

Las cosechadoras son las máquinas más importantes del parque de maquinaria, en cuanto a inversión, mantenimiento, etc. Son máquinas de alto valor de adquisición, en las que las averías que pueden presentar suponen costes elevados. Las averías que presentan son, sobre todo, debidas a que durante las campañas de recogida de forrajes las cosechadoras tienen que dar su máximo rendimiento y trabajan al 100%. Se dispone de pocos días en los cuales los cultivos están en el punto óptimo en cuanto a maduración y calidad. Además, se necesitan buenas condiciones climáticas, ausencia de lluvias, durante el proceso de recolección, lo que exige una mayor planificación debido a que su actividad se reduce a cuatro meses en los que es necesario dar servicio a todos los socios de la cooperativa.

El grado máximo de externalización en la producción de forraje y alimentación del ganado, se alcanza en lo que denominamos “Central de Mezcla Húmeda”, una instalación de la Cooperativa Os Irmandiños en la que se transforma el forraje para ensilado y su posterior mezcla con demás ingredientes y piensos, a fin de conformar la ración alimentaria del ganado.

La planificación se centra en la correcta gestión de la superficie disponible, la aptitud productiva de las fincas y la distancia de los puntos de producción, los volúmenes de producción y sus ciclos. Se pretende en todo momento, cubrir las necesidades de forraje según los consumos previstos, la minimización de los costes de transporte produciendo los máximos volúmenes en los puntos más próximos a la central, y la optimización de las rutas de cosecha y transporte.

El compactado de los silos se logra a base de que los vehículos destinados a este fin, dispongan en capas de espesor no superior a 15 cm. el forraje y las pisen continuamente, cambiando la trazada de forma paralela y repetitiva. La capacidad de compactación disponible es de un total de 36480 kg. Esta capacidad de extendido y compactación, puede incrementarse o reducirse en función de las necesidades derivadas del ritmo de entrada de forraje en la planta.

Dadas las magnitudes de este sistema centralizado, la correcta gestión está condicionada por una serie de incidencias, derivadas de los altos ritmos de trabajo, al ser el tiempo disponible en la campaña de cosecha de forraje un período corto y muy intenso. La gestión del conjunto requiere de un ajuste entre el número de cosechadoras procesando el forraje en finca, el número de vehículos de transporte para que los tiempos de espera de las cosechadoras sea el mínimo y que haya una sincronización directa con el equipo de extendido y compactado del forraje.

Si hay desajustes en el sistema, se producirán atascos de los equipos de transporte en la zona de descarga de la planta, que derivarían en una peor calidad en la conservación del forraje por un pisado deficiente. Si la compactación no es la correcta, el proceso de descarga y extendido se ralentiza, ya que ni los vehículos de transporte pueden acceder a la rampa de descarga, ni los de extendido y compactado pueden trabajar a pleno rendimiento. Esto se traduce también en que el tiempo de espera de las cosechadoras aumentaría notablemente, ya que la demora de los transportes implica retrasos en la transferencia de la carga de forraje desde la cosechadora a la planta.

Dado que el periodo efectivo para realizar la cosecha es muy limitado y está condicionado por las inclemencias meteorológicas, es fundamental reducir al mínimo los tiempos perdidos por los equipos de cosecha. En este sentido reducir los tiempos de espera de la cosechadora

por no disponer de transporte, los tiempos de descarga y optimizar los recorridos del transporte, es crucial para avanzar al máximo ritmo posible en la cosecha de forraje.

Por lo general las parcelas a cosechar están muy dispersas, existiendo además restricciones adicionales (“clusterización” de las parcelas de los socios, equipos de transporte limitados, dificultad de tránsito por determinadas vías públicas, debido a su gran tamaño y lentitud en el desplazamiento, ...) por lo que la planificación de la actividad de las cosechadoras es una tarea muy ardua y compleja.

Considerando todos estos factores, combinados con los múltiples caminos y carreteras que hay en la zona, dan como resultado un gran número de posibilidades y combinaciones de rutas que cumplen con las restricciones planteadas, siendo muy difícil saber de forma precisa y rápida cuál de las rutas planteadas es la más idónea. Una planificación adecuada de la ruta a seguir por las cosechadoras será de suma importancia para evitar pérdidas de tiempo en los desplazamientos que afectarán al tiempo disponible para la actividad de las cosechadoras.

Generalmente esta planificación se realiza de manera manual, de forma que los técnicos responsables de la logística asignan una cosechadora a una determinada zona y, en función de las solicitudes de cosecha, elaboran planificaciones semanales. Esta planificación puede variar en función de las averías, climatología, baja de solicitudes y peticiones de nuevos agricultores.

Los técnicos de la cooperativa basan su planificación en un gran conocimiento de las carreteras de la zona, unido a la experiencia de campañas pasadas y al conocimiento de la ubicación de las parcelas de los socios, pero a pesar del tiempo invertido no tienen la certeza de que la ruta planificada sea la más idónea.

Nos encontramos ante un problema de asignación de rutas, de extrema dificultad, lo que origina que su resolución matemática exacta sea muy compleja y necesite de un gran esfuerzo computacional. Se trata de problemas conocidos como NP (no determinista en tiempo polinómico), es decir, no existen algoritmos con esfuerzos computacionales de tipo polinomial para encontrar la solución óptima. En estos casos lo frecuente es recurrir a la utilización de técnicas heurísticas, proporcionan buenas soluciones con un esfuerzo computacional razonable y cada vez están siendo más utilizadas para la planificación de tareas agrícolas.

En los últimos años ha habido un crecimiento espectacular en el desarrollo de procedimientos heurísticos para resolver problemas combinatorios complejos. El auge de las técnicas heurísticas se debe, sin duda, a la necesidad de disponer de herramientas útiles, que permitan ofrecer soluciones rápidas a problemas reales. Es importante destacar el hecho de que los algoritmos heurísticos por sí solos no garantizan el buen comportamiento de la solución obtenida, pero sí suelen proporcionar una solución próxima a la óptima en un tiempo razonable.

Estos algoritmos requieren esfuerzos combinatoriales pequeños pero, al no proporcionar la solución óptima al problema, únicamente podremos evaluar la “bondad” de las soluciones proporcionadas por la comparación entre ellas y a su vez con la situación real.

Nuestro estudio proporciona una herramienta de ayuda a la decisión para las operaciones de ensilado que facilita el orden de las parcelas a cosechar, minimizando los tiempos de desplazamiento de la cosechadora, poniendo especial atención en las peticiones de cosecha realizadas por los socios. Además, una vez que la programación ha generado la ruta, esta herramienta proporciona el número óptimo de vehículos de transporte que son necesarios para llevar a cabo la cosecha, con el objetivo de minimizar los costes totales del ciclo de cosecha de ensilado.

Esta herramienta es específica para la cosecha de ensilado de maíz, pero puede adaptarse fácilmente a otros cultivos forrajeros (raigrás, alfalfa ...).

También se ha analizado el impacto que tiene la variación en la fecha de recolección de partida (nivel de tolerancia). Debido a que la herramienta no es una herramienta de simulación, en particular, se ha hecho énfasis en la calidad de los datos de entrada. Con el fin de determinar su utilidad se ha llevado a cabo una comparación entre la situación real y la programación proporcionada por la herramienta de sistema de soporte de decisiones.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 LA IMPORTANCIA DEL MAÍZ FORRAJERO EN EL SECTOR GANADERO GALLEGO

La zona norte de España, desde Galicia al País Vasco, produce un 57% de la leche de bovino, siendo Galicia la principal zona con un 39% del total y algo más de la mitad de las explotaciones que se dedican a esta actividad (MAGRAMA, 2012).

El sector productor de vacuno de leche tiene una importancia económica y social fundamental para el medio rural gallego. Es, con diferencia, el subsector que más contribuye a la producción agraria gallega, aporta el 30,5 % de su valor (IGE, 2008) y ocupa al 17 % de las explotaciones agrarias de Galicia (INE, 2008).

Los pastos en Galicia representan el 12% de la superficie total y el 44% de la superficie agraria útil y, de estos, el 37% son praderas. Estas se destinan principalmente a la producción de ensilado, con importantes pérdidas tanto físicas como de calidad (González *et al.*, 2007), de ahí la importancia de aprovechar los recursos disponibles al máximo.

Según datos de una encuesta realizada entre las explotaciones del Programa de Gestión técnico-económica de la Consellería de Política Agroalimentaria y Desarrollo Rural de Galicia, sólo un 13% de las explotaciones utiliza los forrajes en pastoreo, junto con la conservación de los excedentes de primavera en forma de ensilado. En el otro extremo un 30% opta por el denominado "cero pastoreo" es decir, las praderas se emplean en forma de ensilado (Barbeyto, 2001). En los últimos años, las granjas de leche del Noroeste de España intensificaron la producción de forraje, tratando de reducir el uso de concentrados, lo cual les ha permitido incrementar los márgenes netos de beneficio (Bueno *et al.*, 2006). Entre 1996 y 2006 se ha observado un incremento del número de explotaciones que ensilan forrajes en general, pasando del 67% al 94%, de las que ensilan hierba, del 61,2% al 64,8%, y especialmente de las que ensilan maíz, que aumenta del 20,7% al 50,1% (Fernández *et al.*, 2009). El maíz forrajero ha sido el principal cultivo de verano elegido para ensilado en las explotaciones lecheras de Galicia durante mucho tiempo, así los datos obtenidos por Fernández *et al.*, (2009) muestran que la intensificación productiva de las explotaciones gallegas se ha visto acompañada de una mayor ocupación de la SAU por el cultivo del maíz

forrajero para ensilar, motivo por el cual cada vez resulta más importante tratar de reducir los costes derivados de la cosecha de forrajes.

El continuo incremento de los costes de producción hace que una pequeña variación de los precios de insumos, como los vividos en los últimos meses con el empleo de cereales para la producción de biocombustibles y el incremento de precios de los combustibles, deje a los ganaderos al albedrío de un mercado fluctuante. Como ocurre en otros sectores, el ganadero tiene muy poca capacidad para negociar los precios de la leche o de los insumos, por lo que, en la práctica, la única forma de aumentar su cuenta de resultados es mediante el uso eficiente de los factores de producción (Resch, 2002).

Con márgenes de beneficio cada vez más estrechos y crecientes restricciones ambientales, la planificación estratégica de los sistemas de producción agrarios se está volviendo cada vez más importante y difícil (Rotz, 2004).

En los programas de gestión económica realizados por la Xunta de Galicia se detectaron mejoras en la rentabilidad y eficiencia económica de las explotaciones que basan su modelo productivo en conseguir forrajes de alta calidad como principal fuente de alimentación del ganado (Barbeyto *et al.*, 2010). De ahí que las explotaciones que hacen un mejor uso de sus recursos propios y que por tanto tienen una menor dependencia del exterior sean las que alcanzan unos mayores niveles de rentabilidad, a pesar de obtener producciones significativamente más bajas (López, 2000).

Por otro lado, la desaparición del sistema de cuotas, previsto para el año 2015, junto con la reducción de las tasas arancelarias y las restituciones acordadas en el marco de la Organización Mundial del Comercio, hacen prever un aumento del comercio internacional de leche y de la competitividad (Comisión Europea, 2009a y 2009b). En este contexto, resulta necesario conocer los sistemas de producción de las explotaciones y sus mudanzas recientes, para predecir el impacto de los futuros cambios y diseñar políticas efectivas de apoyo al sector.

La supresión del sistema de cuotas puede llevar a una redistribución regional de la producción de leche hacia zonas más competitivas, bien debido a la proximidad a los grandes centros de consumo, a la fortaleza de su sector industrial o a sus recursos naturales propios (Chalellier *et al.*, 2006). Galicia no puede competir por su situación geográfica, ni por su

industria de transformación, pero sí podría aumentar su producción de leche en base a su capacidad para la producción de forrajes (Fernández *et al.*, 2009).



2.2 MECANIZADO DE LA RECOLECCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO

2.2.1 Caracterización del parque de cosechadoras de Galicia

Cada provincia española, dispone de un Registro Oficial de Maquinaria Agrícola (ROMA), regulado por el Real Decreto 1013/2009, de 19 de junio, sobre caracterización y registro de la maquinaria agrícola, actualizando y complementando una antigua orden ministerial del año 1987.

En la actualidad, es obligatoria la inscripción en el ROMA de todas las máquinas automotrices de cualquier tipo y categoría empleadas en la actividad agraria. En consecuencia, puede afirmarse que los datos registrados referidos a las máquinas automotrices reflejan casi con total fiabilidad la situación del mercado.

El parque de cosechadoras autopropulsadas gallego está formado por un total de 1126 máquinas, registrándose, desde el año 2000 hasta el 2009, un aumento del 26,19 % en el número de cosechadoras inscritas (IGE, 2011). De las cuatro provincias gallegas, Lugo es sin duda la que cuenta con un mayor número de máquinas, casi la mitad de las cosechadoras gallegas están registradas en esta provincia, seguida de A Coruña con un 32 % de máquinas inscritas. Sin embargo, cuando centramos el estudio en el número de cosechadoras de forraje, los porcentajes se invierten en el caso de las provincias de Lugo y A Coruña, pues es en esta última donde hay registradas un mayor número de cosechadoras de forraje.

Un indicativo de la mecanización de las actividades llevadas a cabo por las explotaciones, con el fin de reducir costes y aumentar competitividad, es el incremento del número de cosechadoras automotrices de forraje en el periodo comprendido entre los años 2005 y 2010, siendo este incremento más acusado entre el año 2005 y 2008 y tendiendo en la actualidad a estabilizarse. Además, y como era de esperar el incremento fue mayor en las dos provincias donde ya había un mayor número de máquinas (Casado, 2011).

Por contra, determinar el número de picadoras arrastradas que componen el parque de maquinaria es una tarea muy difícil, pues su inscripción en los ROMA no es obligatoria salvo que superen los 750 kg de peso máximo autorizado o hayan percibido alguna ayuda oficial para su adquisición.

El porcentaje de maquinaria arrastrada o suspendida inscrita, en relación con la realmente vendida, oscila enormemente según el tipo de máquina, pues mientras que en el caso de determinadas empacadoras este porcentaje llegó al 100%, en el caso de las máquinas de preparación del terreno no llega al 15 %. Según la información que baraja el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MAGRAMA, 2011), se estima que se inscriben el 70 % de las máquinas adquiridas para recolección de forraje.

Galicia es la comunidad donde más picadoras de forraje arrastradas se inscribieron en los últimos años, de las 28 nuevas inscripciones registradas en España, 10 fueron efectuadas en Galicia (Casado, 2011).

Tal y como se desprende de lo comentado anteriormente, aun hoy y a pesar de su antigüedad y menor capacidad de trabajo también se siguen utilizando picadoras arrastradas, gracias a la versatilidad que tienen para engancharse a cualquier tipo de tractor (potencia mínima del tractor recomendada entre los 50 y 100 kW, lo que hace que sean utilizadas, principalmente, por explotaciones o pequeñas SAT que no contratan la cosecha a terceros.

Las cosechadoras de forraje autopropulsadas son la solución más interesante por su manejo, versatilidad, visibilidad de trabajo, elevado rendimiento de trabajo, etc. El rango de potencia en la serie más reciente de cosechadoras de los principales fabricantes de maquinaria generalmente va de 300 a 800 kW, con motores diesel de 6 a 12 cilindros, pudiendo incorporar cabezales de hasta 10 líneas. Los modelos comerciales tienen un peso sin carga (sin cabezal) de 11 a 18 t. Pero sus elevados costes de adquisición y mantenimiento hacen que su adquisición sea fundamentalmente para cooperativas de maquinaria o empresas de servicios especializadas. En los últimos 5 años los modelos con mayor número de inscripciones han sido de la marca CLAAS: JAGUAR 860, JAGUAR 960 DT y JAGUAR 950 DT.

Aunque se está aumentando la competitividad con la adquisición de cosechadoras automotrices, la capacidad de cosecha de las explotaciones podría ser mayor, ya que hay que contar que el 36 % de las cosechadoras inscritas en los ROMA de Galicia cambiaron de titular desde su primera inscripción en estos registros. Lo que significa que, una parte muy importante de las cosechadoras que hoy se emplean en nuestra comunidad son de segunda mano, pues a este 36 % deberemos añadir aquellas cosechadoras que se han inscrito por

primera vez en un registro gallego pero fueron adquiridas a un titular de otra comunidad o país (Cascudo, 2011).

Las cosechadoras de nueva inscripción comparten las siguientes características:

- Potencia nominal entre 254 y 458 kW (345 y 623 CV) según ECE R24 con 1800 rpm.
- Potencia máxima entre la 2000 rpm entre 312 y 606 kW
- Par máximo ESO 14396-ECE R120 a 1500 rpm (Nm) entre 1820 y 3533
- Cabezal de maíz independiente; entre 10 y 6 filas, 7,5 y 4,5 m de ancho
- Anchura de la carcasa de alimentación (mm): 730, 860
- Nº de rodillos de alimentación: 4
- Afilado automático de las cuchillas

2.2.2 Aspectos relativos a las operaciones mecanizadas en la cosecha de forraje

Para conseguir un excelente picado del forraje se necesitan máquinas de gran potencia, y en el caso del maíz deben tener además un sistema de machacado de granos. En un principio surgieron máquinas que se enganchaban al tractor, y que tenían una anchura de trabajo pequeña debido al gran requerimiento de potencia del proceso. Con el aumento del tamaño de las explotaciones y la necesidad de realizar las tareas de ensilaje en el menor tiempo posible, han ido cobrando importancia las grandes cosechadoras de forraje autopropulsadas.

Hoy en día tenemos esencialmente dos opciones para la recogida de maíz cosechado: que la cosechadora mediante el tubo de descarga, vierta directamente el forraje en un camión o en un remolque, que la acompaña paralelamente por toda la finca o, la segunda opción, es que la propia cosechadora disponga de una tolva incorporada, de gran tamaño, en la que ir acumulando el forraje procesado.

La eficiencia en consumo de combustible de la maquinaria agrícola ha ido en aumento de forma constante desde la década de 1980 (Grisso *et al.*, 2010). No obstante, las cosechadoras de forraje, además de tener un potente motor, arrastran mucho peso sobre todo si tienen la tolva incorporada, y mucho más aún si la tolva está llena de forraje, pudiendo llegar a cargar 14 toneladas, lo que repercute en un elevado consumo de combustible. Debido a la

arquitectura de estas máquinas, disponen de transmisión hidrostática para el avance, aunque no estén cosechando, el motor está trabajando a elevadas revoluciones; consecuentemente el consumo de combustible es bastante elevado aunque la máquina sólo esté desplazándose por carretera. Considerando los elevados precios actuales del carburante, y su tendencia al alza, es fácil deducir la importancia que este coste representa en el coste horario de la cosechadora (Ward *et al.*, 1985).

El poder determinar de forma precisa los costes derivados del uso de la maquinaria siempre ha sido un tema de interés para los investigadores (Audsley *et al.*, 1978; Morris, 1988). En los sistemas de producción de agricultura intensiva, la inversión en maquinaria es la segunda inversión más grande en la mayoría de las explotaciones, mientras que el coste anual de la maquinaria es una parte importante del total de los costes anuales de una granja (Kay *et al.*, 2008; Mazzetto *et al.*, 2010). En particular, para las granjas, los costes de mecanización pueden suponer entre el 15% y el 50% del total de costes de la producción de cultivos (datos medios relacionados con los cultivos de campo, Anderson, 1988; E. U. FADN, 2007).

Los costes de reparaciones, mantenimiento, combustible son fundamentales para poder estimar adecuadamente el coste operacional de las cosechadoras. En una buena gestión de la maquinaria este punto tiene una gran importancia, puesto que una estimación a la baja podría redundar en menores ingresos, o en casos extremos en pérdidas; por lo contrario una sobreestimación de los costes llevaría consigo un precio muy elevado a cobrar a los clientes lo que podría disminuir la demanda de los servicios por los potenciales clientes.

La introducción de las nuevas tecnologías de agricultura de precisión, en las actividades agrícolas comunes, ha proporcionado a los agricultores y técnicos la oportunidad de hacer frente a la variabilidad en el campo, pudiendo manejar y administrar eficientemente una gran cantidad de información disponible (Aubert *et al.*, 2012; Fountas *et al.*, 2006). Estas técnicas buscan una reducción de costes, pero se centran básicamente en reducir los costes de fertilizantes y fitosanitarios. Se ignora que uno de los mayores costes es el coste de la maquinaria, lo que implica que una utilización más eficiente de la maquinaria redundará en un ahorro significativo para el agricultor (Yule *et al.*, 1999).

Una comparación de porcentajes típicos de operaciones de cosecha de forrajes ilustra la importancia del correcto dimensionamiento de la maquinaria. La cosechadora y los costes de

personal asociados son los costes más importantes en la operación de producción de silo (Buckmaster, 2006).

El rendimiento efectivo de cada máquina se define cómo la proporción de tiempo que una máquina realiza su trabajo en la parcela entre el tiempo total transcurrido en la parcela (Hunt, 1995). Un rango normal en la eficiencia de campo para cosecha de forraje está comprendido entre el 60 % y el 85 % (ASAE Standards, 2001). El rendimiento o la productividad horaria de las máquinas está determinado por las condiciones naturales en que trabajen, el aprovechamiento de estas, de factores organizativos, económicos–sociales y del nivel de desarrollo de los medios de producción entre otros (Almarales *et al.*, 1999; Osorio *et al.*, 2002).

Cuatro factores diferentes pueden limitar la capacidad de una máquina, dependiendo de las condiciones del campo y de la actividad a realizar. Estos factores son capacidad, rendimiento específico, velocidad, y la fuerza motriz. En los sistemas donde interactúan distintas máquinas (cosecha, transporte, descarga), la capacidad de algunas máquinas puede estar limitada por otras (Buckmaster, 2006). Los cuellos de botella dentro de las operaciones de transporte o de descarga pueden reducir la capacidad del sistema por debajo de la capacidad de la cosechadora.

El rendimiento de las cosechadoras, se ve afectado por varios parámetros, entre ellos la superficie y la forma de la parcela (González *et al.*, 2007; Landers 2000). El solape de las trayectorias en una parcela tiene un efecto significativo sobre el tiempo perdido en el campo debido a la distancia recorrida sin trabajar y maniobras excesivas (Hunt, 2001). El impacto negativo de convertir el tiempo en la eficiencia de campo ha sido verificado experimentalmente en la cosecha de grano (Hansen *et al.*, 2003; Taylor *et al.*, 2002) o en las operaciones de cultivo (Sørensen *et al.*, 2005), además de en simulaciones (Benson *et al.*, 2002).

En Galicia, el reducido tamaño de las fincas y el relieve, algunas veces escarpado con pendientes empinadas, origina la necesidad de considerar variables nuevas que caracterizan mejor el rendimiento efectivo. Los efectos negativos por la forma irregular de las parcelas son debidos, fundamentalmente, al tiempo extra de giro y el mantenimiento de los bordes de la parcela. El tiempo de giro es un elemento no productivo incluido en todas las operaciones realizadas en una parcela (Witney, 1995). Taylor *et al.* (2002) monitorizaron el

funcionamiento de una cosechadora y observaron como el rendimiento efectivo estaba muy condicionado por los tiempos de giro. Años más tarde, Hansen *et al.* (2007) presentaron un estudio que analizaba los patrones de ruta de una cosechadora, poniendo especial énfasis en los giros. Las vueltas las describieron de forma matemática con el fin de crear un modelo que pudiese usarse para proporcionar comparaciones entre diferentes escenarios de cosecha. Aunque el número de giros puede ser reducido utilizando aperos más anchos y creando parcelas más anchas, nunca pueden ser eliminados completamente.

Una forma de mejorar la eficiencia de las operaciones consiste en planificar un trazado que la máquina debe seguir, minimizando los giros y las distancias a recorrer en la parcela (Palmer *et al.*, 2003). Estudios realizados por Grisso *et al.* (2004) también avanzaron en la línea de relacionar las trayectorias con las capacidades efectivas de trabajo.

El tiempo consumido de giro depende de la distancia recorrida durante el giro (es decir, la longitud de la maniobra) y la velocidad de giro media. Algunos tipos de maniobra son fáciles de ejecutar a velocidades más altas, mientras que otros tipos requieren de manejos más hábiles o cambios de dirección que causan una velocidad media reducida. Además, algunas maniobras influyen desfavorablemente en las condiciones del suelo (Ansorge *et al.*, 2007; Keller, 2005). En consecuencia, el área de la cabecera constituye un "área de campo de baja productividad" (Witney, 1996). Además, las maniobras afectan al consumo de combustible y las maniobras complejas requieren más tiempo de conducción.

El incremento en la superficie de las parcelas no solo se traduce en un menor número de giros, sino que además se incrementa la efectividad de las máquinas y se pueden alcanzar velocidades de trabajo mayores. En estudios realizados por Witney (1995) y Van Dijk (2000) se demuestra cómo la proporción de tiempo gastado en trabajo productivo se incrementa sustancialmente con el tamaño de la parcela y la cantidad de tiempo perdido debido a la forma de la parcela, disminuye con un aumento en el tamaño del campo. Además este incremento de trabajo productivo se hace más significativo a medida que aumenta la anchura de trabajo de la máquina. Sin embargo, segundo Taylor *et al.* (2001) el rendimiento neto no se ve afectado por el tamaño de la parcela, en ensayos realizados con varias sembradoras de maíz. Es necesario considerar no obstante que las parcelas más pequeñas superaron los 5000 m², situándose la mayoría de las parcelas ensayadas entre 2 y 20 has.

Así en estudios realizados por Landers (2000) en parcelas de 10 ha, con diferentes morfologías y una máquina de 3 m. de anchura, se observó que los mejores rendimientos se obtenían en parcelas rectangulares, siempre que las operaciones fueran realizadas paralelas a las caras más anchas. Las diferencias son mayores cuando el tamaño de la parcela disminuye y tienden a desaparecer en parcelas de gran tamaño.

Varios autores han comprobado que la forma perfecta de un campo en términos de eficiencia es un rectángulo con un 4: 1 entre las longitudes de sus lados (Landers 2000, Witney 1995) y que los valores más bajos de eficiencia están relacionados con parcelas de forma irregular debido al tiempo extra que se necesita para su cosechado (Taylor *et al.*, 2002). Para determinar la incidencia de la forma de la parcela en el rendimiento de la cosechadora González (2002) propuso un índice de forma, obtenido a partir del ratio de la superficie de la parcela y su perímetro al cuadrado. Este índice permite realizar caracterizaciones morfológicas independientemente de la superficie que tenga cada parcela. Sin embargo, el índice tiende a primar las parcelas con formas más compactas (circulares, triangulares, cuadradas, etc.).

Sin embargo, la influencia de estos parámetros puede diferir en relación con el tipo de cosechadora considerada, ya que el camino seguido por cada cosechadora cambia para la misma forma de parcela, debido a la diferente cantidad de espacio que necesita cada máquina para maniobrar. En consecuencia, la variación de la trayectoria recorrida dará como resultado diferentes capacidades efectivas de campo (Grisso *et al.*, 2004), debido a la variación de la distancia recorrida sin trabajar (Bochtis *et al.*, 2008).

Estudios previos (Amiama *et al.*, 2008b) llevados a cabo en el mismo entorno geográfico y con parcelas de características orográficas y morfológicas similares a las ahora analizadas, concluyen que el rendimiento del cultivo es la variable que mejor explica el rendimiento de la cosechadora y que la siguiente variable con mejor correlación es la superficie de la parcela.

2.2.3 Monitorización del proceso de cosechado

El paso previo a cualquier análisis y o comparativa es conocer el tiempo que invierte cada uno de los elementos del sistema en realizar las distintas actividades que lo componen. Necesitaremos ir contabilizando máquina por máquina y actividad por actividad todos los

tiempos invertidos, además también se debe contabilizar el tiempo de iteración entre las distintas máquinas.

Cuando no se disponía de la información de funcionamiento de las máquinas de una forma fácil, se utilizaban diferentes métodos para calcular estos parámetros de funcionamiento (Colvin *et al.*, 1989). Estos métodos eran a menudo tediosos y requerían una gran cantidad de tiempo y esfuerzo, además de ser tareas muy poco precisas, puesto que se precisa la intervención de varias personas para contabilizar el tiempo de cada uno de los elementos del sistema y cuanto mayor sea el número de datos a capturar y el número de personas que intervienen en el proceso mayor será el error cometido.

Disponer de un sistema de adquisición de datos automático además de facilitar la tarea permitirá la obtención de un mayor número de datos y al mismo tiempo reducirá los errores que se puedan cometer mediante la adquisición manual. Muchos mensajes están ahora disponibles a través del conector de diagnóstico de la máquina. Éste se ha convertido en una fuente común para los fabricantes, así como para los institutos de investigación para ganar conocimiento del funcionamiento de la máquina y de su eficiencia (Darr, 2012; Fountas *et al.*, 2015; Pitla *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2011; Udompetaikul *et al.*, 2011).

Dentro de la agricultura, el uso creciente de los sistemas de posicionamiento que usan señal satélite (GPS, GLONASS, GALILEO) es una realidad. Sin embargo, estos sistemas centraron la atención principalmente en técnicas de agricultura de precisión (Linseisen, 2001; Renschler *et al.*, 2002; Sparovek *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2002). Esto, junto con la aparición de los sistemas de comunicación GPRS (con cobertura ancha) y los UMTS (en expansión), así como el coste accesible de los sistemas de cómputo, ha llevado a un desarrollo rápido de la telemetría y los sistemas de posicionamiento de vehículos en sectores en los que casi no se habían empleado hasta ahora. Este es el caso de la gestión de flotas de maquinaria en cooperativas agrícolas.

La implementación de estas nuevas tecnologías dará gran cantidad de información georreferenciada que permitirá obtener una trazabilidad de los procesos realizados. Además, la implementación de tecnologías que tienen en cuenta la obtención de datos de numerosos sensores instalados en las máquinas agrícolas contribuirá a una mayor aplicación de los sistemas de telemetría. (Craessaerts *et al.*, 2005; Grenier, 2001; Krallmann *et al.*, 2002).

La combinación de sistemas automáticos de adquisición de datos instalados en la maquinaria agrícola (GPS, sensores, etc.) y el software de análisis que permita compensaciones entre parcelas de tiempos de trabajo, paradas y giros, permitirá cultivar fincas contiguas conjuntamente (transborder –farming). En los ensayos llevados a cabo por Deiglmayr *et al.*, (citado por Rothmund *et al.*, 2002), el uso de este sistema ha supuesto ahorros de hasta un 30% en tiempos de trabajo y de un 25% en costes variables de las máquinas y costes de las labores, si se comparan con los rendimientos obtenidos al trabajar individualmente cada una de las parcelas.

En el año 2005 un equipo de investigadores de la Universidad de Santiago de Compostela implantó un sistema de localización vehicular y telemetría en cosechadoras autopropulsadas de forraje (Amiama *et al.*, 2005), este sistema permite recoger datos de ejecución (velocidad de la operación, número de descargas, estado de actividad, número de transportes que participan, ...) situación de la máquina y señales de advertencia (nivel de aceite, presión, temperatura, ...) y también permite ver el emplazamiento actual de las cosechadoras en el mapa a través de un monitor instalado en la cabina. Con este sistema es posible conocer las horas de trabajo, tiempos de inactividad, localización, etc. de varias cosechadoras. Dado que los datos recogidos están ligados a una determinada posición en el espacio y a un momento de tiempo concreto, la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitará la integración de la información recogida por diversas vías y su tratamiento para una posterior toma de decisiones (Earl *et al.*, 2000).

2.2.4 Caracterización del proceso de llenado del silo

El ensilado es una práctica cada vez más común para la conservación de los cultivos (Muck *et al.*, 2007; Wilkinson *et al.*, 2005). El llenado del silo es un proceso que debe realizarse de forma rápida (en un período no superior a 3 días), con el fin de obtener un ensilado uniforme en humedad y calidad (Muck *et al.*, 2000). En condiciones óptimas, el forraje se debe embalar a razón de 1 a 4 minutos por cada tonelada de forraje (McAllister *et al.*, 2000). No obstante, una operación de llenado ágil exige un dimensionamiento y coordinación adecuada de los equipos implicados en el sistema (cosechadoras de forraje, camiones y vehículos para compactado y extendido del forraje). Se pretende evitar la formación de “cuellos de botella” derivados de la llegada simultánea de varios camiones con

forraje que hagan superar la capacidad de los equipos de extendido y compactación que existen en el silo (Buckmaster *et al.*, 2005c).

Son numerosos los estudios que se centran en analizar la incidencia de factores como el peso de los equipos de compactado, el contenido en humedad del forraje, el tiempo de compactado, el espesor de las capas a compactar, la altura de silo sobre la densidad del forraje ensilado,... (Hoffmann *et al.*, 2013; Messer *et al.*, 1977; Muck *et al.*, 2000; Ruppel *et al.*, 1995).

Los factores que afectan a la densidad del forraje ensilado en silos horizontales son altamente variables y no están bien reconocidos. Extensas investigaciones sobre almacenamiento en silos horizontales han sido realizadas, principalmente, en universidades estadounidense: Wisconsin (Conway 2008), California (Silva-del-Rio 2010), Kansas (Bolsen, 2000) y Florida (Adesogan *et al.*, 2010). La densidad de ensilado en silos horizontales se correlaciona con los siguientes factores (D'Amours *et al.*, 2005, Holmes *et al.*, 2000): contenido de humedad del ensilado, el peso del tractor, la presión de la rueda, velocidad de suministro de ensilaje (toneladas h⁻¹), tiempo de cosecha por día, la profundidad de ensilado, la altura máxima de ensilado, la madurez del cultivo, longitud de corte, contenido de materia seca, espesor de la capa de cubierta del silo y dimensiones del silo.

Un aspecto adicional que debe considerarse en la determinación del ritmo de llenado es la configuración del silo. Sin embargo no consta la realización de ensayos que analicen la incidencia de la geometría del silo sobre el ritmo de llenado. Es una práctica habitual decantarse por varios silos de pequeño tamaño, frente a pocos silos de gran tamaño, para conseguir un llenado más rápido y una menor exposición a los agentes climáticos. Igualmente determinante es la estrategia de llenado. El procedimiento recomendado, en el caso de los silos horizontales, consiste en comenzar a llenarlos por la parte posterior e ir extendiendo el forraje en finas capas (de aproximadamente 15 cm) con una rampa de acceso de pendiente suave. Para mantener una pendiente homogénea en la cuesta de acceso, a medida que el silo va creciendo en altura la cuesta incrementa su longitud.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS OPERACIONES DE ENSILADO. ANÁLISIS DE CICLOS.

2.3.1 El proceso de ensilado como sistema

La producción de silo representa la mayor parte de los costes de producción de leche, y el mayor coste de producción de silo está relacionado con la maquinaria (Rotz *et al.*, 1997). La maquinaria, mano de obra, camión y la pala encargada de extender y compactar el silo pueden costar de 97 € a más de 372 € por hora (Harrigan, 1998). Algunos agricultores acostumbran a contratar las labores de ensilado con el fin de reducir los costes fijos de equipos y los costes de mano de obra, y mejorar la puntualidad de la cosecha, además de poder permitirse el empleo de equipos de mayor capacidad de trabajo.

La labor de ensilar a gran escala es un proceso complejo. Es necesaria una buena coordinación y un apoyo logístico eficaz para cosechar el mayor volumen posible de forraje en el menor tiempo posible. Los factores esenciales para organizar la campaña de ensilado deben incluir la potencia y el número de transportes, el tipo de cosechadoras de forraje, el número y la capacidad de los remolques, el estado mecánico de la maquinaria, la distancia entre el cultivo forrajero a cosechar y el silo, y los equipos e insumos necesarios en las técnicas para preparar y acondicionar el forraje.

Una eficiente planificación del transporte suele ser fundamental, debido al elevado peso que este elemento suele tener en el coste del conjunto de operaciones que se realizan en la recolección de forrajes o cereales. Sokhansanj *et al.* (2002) en un análisis de costes de recolección del rastrojo de maíz cifran el coste de transporte entre el 28 y el 36 % de los costes totales de mecanización, en función del sistema de empaque elegido. Sokhansanj *et al.* (2004) obtienen valores similares en la recolección de trigo y cebada.

De un estudio realizado por Ravula *et al.* (2003) concluyeron que más del 90% del precio de transporte de biomasa de algodón son costes fijos de camión. Para reducir este coste fijo, habrá que aumentar la utilización de los camiones (Ravula *et al.*, 2003). Con seis camiones, el factor de utilización del camión ha sido del 74% y el factor de utilización de la planta ha sido del 77%. Reducir el número de camiones a cinco, aumenta la utilización de los camiones al 86% pero se reduce el factor de utilización de la planta al 70%. Los costes de manejar la

planta son significativamente mayores que los costes de la flota de transporte. Por consiguiente, una reducción del tamaño de la flota de camiones de 6 a 5 no es recomendable.

Los agricultores, técnicos en su gestión de la maquinaria, cada vez más usan información de la capacidad de los equipos para estimar los costes y seleccionar la maquinaria para realizar las operaciones de campo dentro del menor tiempo posible (Harrigan, 2003). Modelos generales de gestión de maquinaria se han utilizado para seleccionar la maquinaria y evaluar los costes y rendimiento de los sistemas agrícolas (Hunt, 1967; Rotz *et al.*, 2007). Los costes puntuales han demostrado ser influyentes en el proceso de selección de la maquinaria (Harrigan, 2003; Rotz *et al.*, 2005).

Un sistema eficiente de ensilado de maíz requiere capacidad de transporte para mantener la cosechadora de forraje siempre trabajando, y palas esparcadoras para impedir que se formen cuellos de botella en el silo. El número de vehículos de transporte necesarios depende del volumen de almacenamiento de cada unidad de transporte, de la distancia del cultivo al silo, de la velocidad del vehículo y del tiempo necesario para realizar la descarga (Harrigan, 1998).

El número de unidades de transporte necesarias para mantener completamente ocupada la cosechadora es función de la distancia a la que hay que transportar el maíz cosechado, potencia de la cosechadora, del transporte y de la velocidad media de transporte (Buckmaster *et al.*, 2005b). Los procesos de cosecha y transporte están intensamente interrelacionados (Busato *et al.*, 2007), por lo que para reducir los costes y aumentar la capacidad efectiva de la cosechadora es necesaria una iteración óptima entre las cosechadoras de forraje y los vehículos de transporte. Varios investigadores han desarrollado aplicaciones para ayudar a determinar el número óptimo de camiones (Crossley, 1987) y para reducir las rutas de transporte (Tan *et al.*, 2006). En general se determina el número de camiones que participan en un ciclo de la cosecha por el componente que más afecta a la rentabilidad del proceso, es decir, el que tiene unos costes de operación más altos (Ravula *et al.*, 2008). Con este supuesto, otros autores han establecido el número de vehículos de transporte, manteniendo la cosechadora de forraje ocupada al máximo de su capacidad de trabajo (Buckmaster *et al.*, 2005a; Harrigan, 2003). Sin embargo, esto no es siempre la mejor manera de minimizar los costos, como se ha señalado por Gunnarsson *et al.* (2008). Puede ser mejor mantener la cosechadora con tiempos de espera en lugar de añadir un camión extra que podría pasar la mayor parte de su tiempo inactivo.

2.3.2 Metodología para el análisis de ciclos

Para seleccionar la maquinaria empleada en operaciones secuenciales son necesarios estudios de oportunidad, capacidad, probabilidad y duración de la jornada laboral (Lavoie *et al.*, 1991; Parmar *et al.*, 1996; Rotz *et al.*, 1983; Siemens *et al.*, 1990). Elegir las máquinas que van a intervenir simultáneamente en la misma actividad implica la necesidad de conocer el ciclo de cada máquina. En la actualidad, los técnicos de la cooperativa asignan de manera manual el número de camiones que van a intervenir en la cosecha de cada una de las fincas de los socios, basándose en la experiencia, conocimiento de la zona, etc.

Un método para evaluar sistemas donde interactúan diversas máquinas o componentes es el análisis de ciclos. El análisis de ciclos permite esclarecer el tiempo que emplea cada máquina en el sistema y puede ser útil para identificar sistemas adecuados de transporte en las operaciones de ensilado (Buckmaster 2006). Los diagramas de ciclo de trabajo fueron presentados por Hunt (1995) y son una herramienta sencilla a modo de esquema para repasar individualmente cada sistema. Los diagramas de ciclo realizados manualmente se usaron en muchas industrias para analizar los sistemas operativos, disponiendo de la iteración entre los equipos.

Los diagramas de ciclo son herramientas relativamente sencillas que pueden proporcionar datos sobre el impacto entre distintos equipos y los cambios operacionales en los sistemas agrícolas dinámicos con componentes que interactúan entre sí. El análisis de ciclo programado consiste en una hoja de cálculo que permite a los usuarios identificar entradas críticas de la máquina y el sistema, completa y sigue los cálculos intermedios y muestra o representa gráficamente las variables relevantes del sistema.

Las entradas y salidas del sistema son fáciles de visualizar pero difíciles de analizar a medida que se modifican. El análisis de sistemas es una herramienta comúnmente empleada para determinar el impacto de cambios y las iteraciones de las máquinas dentro del sistema. El análisis de sistemas puede emplear conjuntos de datos y escenarios operacionales para representar capacidades del sistema, relaciones e iteraciones (Buckmaster *et al.*, 2005a).

En la cosecha de maíz forrajero hay iteraciones significativas entre los distintos elementos que intervienen, pues la cosechadora necesita interactuar con los medios de transporte y estos a su vez interactúan también con la maquinaria empleada en los silos para extender el forraje.

Los análisis de ciclo de sistemas que incluyen procesos de cosecha, transporte y descarga necesitan conocer las capacidades de cada máquina y parámetros operacionales para poder introducirlos en la hoja contable. Los resultados obtenidos informan sobre el tiempo de ciclo del sistema y el tiempo desocupado de cada máquina. Las medidas de eficiencia de la cosechadora, del transporte y de la pala, y la utilización de la mano de obra pueden ser calculadas. Con frecuencia, la cosechadora es la máquina más cara y una evaluación de su eficiencia real de campo puede ser interesante.

El empleo de la hoja de cálculo permite el análisis rápido de escenarios alternativos diseñados para maximizar el empleo de la cosechadora. Los requisitos de transporte pueden ser estimados y la utilización de los componentes del sistema pueden ser evaluados en situaciones donde la velocidad de trabajo de la cosechadora sea distinta, volumen de las unidades de transporte variable, distintas distancias de transporte, medios de transporte diferentes y capacidad de la pala encargada de compactar el silo también variable.

Los principios y los pasos para el desarrollo y uso de diagramas cíclicos fueron esbozados por Hunt (1995).

De un análisis de ciclo se obtiene como resultado la capacidad del sistema, eficiencia de la mano de obra y las tasas de utilización de cada máquina implicada.

Los análisis de ciclo son teóricos y no incluyen acontecimientos especiales durante la cosecha, como pueden ser las averías, mantenimientos, paradas para desayunar, etc.

Las velocidades medias de campo y los rendimientos de campo son necesarios para este análisis y están disponibles en ASAE Standards (ASAE 2005a, 2005b, 2005c).

2.4 ANÁLISIS DE RUTAS

2.4.1 Análisis y planificación de rutas

Una forma de intentar reducir los costes de la mecanización al máximo posible consiste en contar con la ayuda de aplicaciones informáticas de ayuda a la toma de decisiones. Autores como Recio *et al.* (2004), proponen sistemas que ayudan a la toma de decisiones en cuanto a mecanización de cooperativas y explotaciones individuales. Para ello se basan en la toma de datos de la explotación y del entorno. De este modo, analizando su estructura, se puede hacer una planificación de los recursos necesarios para minimizar los costes derivados de la mecanización, y proponer cambios que redunden en un mayor aprovechamiento de la maquinaria.

Los sistemas de apoyo a las decisiones pueden ayudar a reducir la incertidumbre y mejorar el proceso de toma de decisiones mediante el acceso a datos a través de procedimientos y razonamientos analíticos (Uehara *et al.*, 1993). El diseño y desarrollo de técnicas de ayuda para la toma de decisiones en la agricultura está ganando popularidad, especialmente con el avance en el procesamiento electrónico de datos (Power, 2002)

Varios autores desarrollaron modelos y propusieron herramientas para el apoyo en la toma de decisiones en diferentes escenarios relacionados con la cosecha de los cultivos. Buckmaster (2006) desarrolló un método basado en el análisis del ciclo, pero este es un instrumento estático que no tiene en cuenta la variabilidad en la velocidad, el rendimiento y la distancia de transporte. Otros autores diseñaron instrumentos para las operaciones de cosecha previstas y, por lo general, se hizo un análisis teórico con el uso de un software de simulación para ejecutar su modelo (Bussato *et al.*, 2007; Le Gal *et al.*, 2009; Ravula *et al.*, 2008). Sin embargo, los modelos de simulación no son capaces de detectar las mejores decisiones, aunque sí de predecir el rendimiento de un sistema.

Para mejorar el rendimiento de las cosechadoras hay, básicamente, dos maneras: reducir la distancia entre las parcelas a cosechar y diseñar una planificación eficiente para los vehículos de transporte. La obtención de rutas que minimicen los tiempos de desplazamiento de la cosechadora se resuelve con un problema de enrutamiento, pero existen tres cuestiones principales que distinguen esta configuración de un problema de enrutamiento general. En primer lugar, existe una limitación en cuanto al momento de inicio de cosecha de cada

agricultor, ya que estos períodos de tiempo se definen por las peticiones de los agricultores y un nivel de tolerancia dado en la fecha de partida. En segundo lugar, todas las parcelas de un agricultor tienen que ser cosechadas antes de iniciar el siguiente agricultor. Esto se debe a que los silos en los que se envase el maíz cosechado tienen que estar cerrados en dos o, como máximo, tres días con el fin de garantizar las condiciones de mantenimiento. Por último, cada finca tiene un tiempo de cosecha que influye en los tiempos de la programación.

Los agricultores del norte de España suelen tener un gran número de parcelas de pequeño tamaño (alrededor de 1 hectárea de media), dispersas en una amplia área geográfica. Esta también es una característica común a otras regiones europeas (Bentley, 1990; Keeler *et al.*, 1990; Thomas, 2006; Van Dijk, 2004). Con esta configuración, la gestión adecuada de las rutas de las cosechadoras es de suma importancia, para reducir tiempos de desplazamiento respecto a la cantidad total de actividad de la cosechadora. Trabajos anteriores, llevados a cabo por Escariz *et al.* (2007) estiman que el tiempo de desplazamiento de la cosechadora representa el 21,3% de su actividad total. El gran número de parcelas involucradas también contribuye a que la gestión de rutas de la cosechadora sea un problema más difícil.

Una forma de intentar reducir el tiempo improductivo de la cosechadora es planificando las rutas que deberá seguir para realizar la cosecha de todas las parcelas a trabajar. Además de reducir gastos debido a la reducción de la distancia recorrida, también se consigue que las máquinas recorran el mínimo camino posible por vías públicas, aspecto de gran importancia considerando la elevada anchura de las cosechadoras, lo que condiciona en gran medida el tránsito por vías de escasa envergadura.

La identificación de rutas que garantizan costes mínimos es un problema de ruteo de vehículos (VRP). Bajo estas condiciones, los algoritmos heurísticos proporcionan buenas soluciones con un esfuerzo computacional razonable y son utilizados cada vez más en tareas agrícolas (Caramia *et al.*, 2010; Dooley *et al.*, 2005; Ferrer *et al.*, 2008; Ravula *et al.*, 2008).

Gebresenbet *et al.* (2001) insistieron en la idea de optimizar el transporte minimizando la trayectoria de los vehículos y asignando recursos de forma que ningún vehículo circulara vacío, lo que es bastante común, e incrementar la eficiencia de los vehículos. La recopilación de datos sobre la distribución de bienes y recogida diaria incluyendo la ubicación geográfica de las colecciones de puntos de distribución y las rutas la realizaron utilizando el sistema de posicionamiento global, GPS.

El trabajo con redes monitorizadas con ayuda de GPS y programas de SIG ya ha sido objeto de estudio para otros investigadores. En el año 2002, Tarantilis y Kiranoudis desarrollaron un sistema para el apoyo en la toma de decisiones, basado en el problema de ruteo de vehículos en el que también utilizaron un SIG. Las herramientas SIG también han sido utilizadas por otros autores en problemas que afectan a la recogida de residuos sólidos urbanos (Angelelli *et al.*, 2002; Santos *et al.*, 2008). Muchos de estos sistemas, que dependen de los SIG, incorporan soluciones exactas y algoritmos heurísticos. Estos sistemas se conocen como sistemas de apoyo a las decisiones espaciales (SDSSs) (Jha *et al.*, 2004; Maria *et al.*, 2005) y los resultados se pueden mostrar en una interfaz de Google Maps (Faiz *et al.*, 2014).

Como enunciaban Marzolf *et al.* (2006), partiendo de una red de caminos estructurada, se pueden solucionar de forma eficaz, mediante modelización matemática, problemas de enrutamiento complicados. Por lo que si disponemos de gran cantidad de datos, de una base cartográfica de redes de caminos y fincas georreferenciadas se puede conseguir, con la ayuda de una aplicación de gestión de flotas, una planificación excelente de rutas en el campo de la agricultura, como bien describen Sørensen *et al.* (2010).

En nuestro caso, buscar la ruta óptima de las cosechadoras, empleando el menor número de camiones.

2.4.2 Problema matemático del enrutamiento

Este tipo de problemas de rutas consisten en visitar una serie de puntos predeterminados, cumpliendo unos condicionantes y haciendo el mínimo recorrido posible.

El modelado matemático de estos problemas, hoy en día ya se encuentra bastante estudiado. El principal inconveniente es que su resolución es muy pesada computacionalmente; en lenguaje matemático a esto le llaman problemas de tipo NP hard. Existen distintos nombres y hay distintos ejemplos descritos en la bibliografía como: “Rural postman problem” (Pearn *et al.*, 1995), que es una extensión del “Chinese postman problem” y el “Vehicle routing problem”.

El problema de ruteo de vehículos (VRP) se caracteriza como uno de los grandes éxitos de la investigación operativa, proporcionando y facilitando, desde hace más de cincuenta años, la planificación de soluciones óptimas en aplicaciones de la vida real para flotas de vehículos.

Un VRP puede ser descrito como el problema de determinación de las rutas que implican un menor coste en un conjunto de "clientes" (como ciudades, tiendas, almacenes y escuelas) dispersos en la geografía. VRP constituye uno de los problemas más difíciles de optimización combinatoria. A lo largo de los años se desarrollaron una serie de paquetes de software que están disponibles en el mercado para su resolución. En la agricultura, el VRP se ha aplicado muy recientemente sólo a la planificación y ejecución de las operaciones en campo, a pesar del hecho de que casi todos los trabajos tienen movimientos de vehículos (Bochtis *et al.*, 2009; Bochtis *et al.*, 2010).

La mayoría son muy parecidos en cuanto al problema base y se diferencian en los condicionantes o requisitos que se deben cumplir. Dado que la resolución es muy complicada, para obtener soluciones óptimas es necesario usar computadoras especiales con gran poder de cálculo. A veces si el problema es muy complicado puede que no se encuentre solución.

Como en la mayoría de los casos prácticos no es posible disponer de este tipo de ordenadores, muchos investigadores se centran en buscar métodos que den soluciones aproximadas con mucho menos tiempo de cálculo (Brotcorne *et al.*, 2003; Ghiani *et al.*, 2003). En muchos casos es necesario tomar decisiones en tiempo real por lo que las soluciones han de obtenerse lo más rápidamente posible. Con esta preocupación en mente, muchos investigadores optan por el uso de métodos heurísticos para solucionar estos problemas (Corberán *et al.*, 2000; Corberán *et al.*, 2002; Golden *et al.*, 1983; Pearn *et al.*, 1995; Pisinger *et al.*, 2007). Estos investigadores tratan de conseguir soluciones muy aproximadas y con un tiempo de cómputo razonable.

Existen ejemplos en los que se consiguen soluciones muy buenas a estos problemas, aplicados a otros campos, como la recolección de basura (Amponsah *et al.*, 2004), la recogida de ganado vivo en las explotaciones para ser llevados al matadero (Oppen *et al.*, 2008). Otros ámbitos en que este tipo de problemas combinatorios tiene multitud de aplicaciones prácticas pueden ser la distribución de correo (Corberán *et al.*, 2000; Corberán *et al.*, 2002; Pearn *et al.*, 1995), recogida y reparto para empresas de logística del algodón (Ravula *et al.*, 2003) y de

biomasa (Ravula *et al.*, 2007), transporte y reparto de mercancías perecederas (Osvald *et al.*, 2008), ubicación y reubicación de ambulancias (Brotcorne *et al.*, 2003), entre otras.

Hay estudios hechos que tratan de revisar los avances en este tipo de problemas aplicados a distintos campos y con distintas casuísticas (Ghiani *et al.*, 2006). De estos estudios se pueden sacar conclusiones, observar casos ya resueltos y de este modo pueden surgir nuevas ideas para que otros investigadores consigan más avances en estos temas.

Visto que el uso de algoritmos heurísticos está muy extendido para obtener soluciones rápidas a problemas complicados, un paso importante es la validación del método propuesto comparando los resultados del heurístico con resultados obtenidos de forma exacta (Laporte, 1992). A pesar de que en muchos casos llegar a resultados exactos es realmente complicado o a veces no es posible. Pacheco *et al.* (2009) llegaron a la conclusión de que los resultados obtenidos, a partir de algoritmos de búsqueda local y tabú, eran ligeramente superiores al método utilizado actualmente por las autoridades para el diseño de las rutas del transporte urbano después de comprobar 196 rutas distintas, en el ayuntamiento de Burgos. También, Oppen *et al.*, (2008) emplearon un algoritmo tabú para el diseño de una ruta óptima para el transporte de ganado vivo desde las explotaciones al matadero.

Otra de las técnicas heurísticas, además del algoritmo de búsqueda tabú, utilizada en numerosos campos son los algoritmos genéticos, que son una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Darwin y que ha demostrado ser una herramienta efectiva (Osman *et al.*, 1996). Por imitación de este proceso, los algoritmos genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real, a partir de un conjunto de soluciones “óptimas”, concepto que será análogo al concepto darwiniano de la supervivencia de los individuos mejor adaptados al medio. Medina *et al.* (2003) propusieron una serie de pasos para construir un algoritmo genético destinado a un problema sobre la distribución de pasajeros entre aeropuertos con destinos de baja demanda.

Este tipo de algoritmo también ha sido utilizado en la industria de la fundición, para planificar las ordenes de trabajo a realizar por lo operarios, bajo el criterio de optimización de los tiempos de producción, es decir, se busca minimizar el tiempo total de producción (Contreras, *et al.*).

Una experiencia similar a la que nos ocupa en este trabajo ha sido realizada por Mauttone *et al.* (2003) en la planificación del transporte público urbano de la ciudad de Montevideo. El objetivo era maximizar la calidad del transporte, minimizando los tiempos de viaje y la espera para que la actividad de la empresa fuese rentable y, al mismo tiempo, que el servicio resultase cómodo para los usuarios.

2.4.3 La gestión de flotas en el campo agrario. Otras experiencias.

En nuestro campo de actuación también fueron numerosos los estudios relativos a la consecución de sistemas más eficientes de gestión de maquinaria.

El transporte del material cosechado hasta el lugar de almacenamiento tiene una gran importancia en la eficiencia de todo el proceso; si descuidamos este aspecto podemos perder los avances en tiempos y rendimiento conseguidos con una buena planificación de las rutas de la cosechadora. Con respecto al caso que nos ocupa el transporte del forraje se hace con camiones, en los cuales se hizo una adaptación de la caja de transporte, ampliando la altura de la misma para poder transportar una mayor cantidad de material. Además de los camiones también se usan tractores agrícolas, de la propia cooperativa con remolques de gran tonelaje con el fin de minimizar el número de viajes. Esta alternativa del camión se utiliza sobre todo cuando las distancias desde las parcelas al silo son grandes, dado que los camiones consiguen mayor velocidad que los tractores, reduciendo los tiempos de transporte.

Sobre este tema ya hay experiencias en cuanto a optimizar el tipo de vehículo de transporte para labores agrícolas (Crolla *et al.*, 1984; Dwyer *et al.*, 1987). El aspecto más complicado del transporte consiste en asignar correctamente los recursos para evitar tiempos de espera.

Oppen *et al.* (2008), buscan diseñar una ruta óptima para el transporte de ganado vivo desde las explotaciones al matadero. Establecen una serie de limitaciones para garantizar el bienestar animal e incluyen limitaciones para el tiempo que los animales pueden estar en el vehículo y normativa vigente.

Experiencias anteriores demuestran que estudiando y analizando cada caso particular es posible conseguir buenos resultados. Crossley (1987) estudia la aplicación de un programa informático que analiza el transporte de caña de azúcar, llegando a la conclusión de que se

puede modelar el transporte con buenos resultados. Tan *et al.* (2006) tratan de buscar soluciones para una compañía de logística, mediante algoritmos que minimizan la ruta y el número de camiones a utilizar. Todo esto sometido a restricciones como la disponibilidad de cabinas, remolques e intercambios con otros camiones.

Bochtis *et al.* (2008) propusieron un problema VRP para la planificación de una flota de cosechadoras que operan en un campo. Ryerson *et al.* (2007) han propuesto algoritmos genéticos para resolver el problema de planificación de ruta de cobertura. Aunque, esta metodología no ha conseguido rutas completamente optimizadas, el enfoque logra el 90% de cobertura del campo. Oksanen *et al.* (2009) propusieron un algoritmo de planificación de zona de cobertura para las operaciones agrícolas. El algoritmo propuesto incluye métodos para la división de la región de cobertura en sub-regiones, la selección de la secuencia de esas sub-regiones, y la generación de un camino que cubre cada sub-región teniendo en cuenta la dirección de trabajo deseada.

Ali *et al.* (2009) reformularon el problema en el campo de la logística para cosechadoras en base a un problema modificado de rutas para vehículos (MVRP) y un problema de flujo de red de coste mínimo modificado (MCNFP), con el fin de determinar las rutas óptimas de recubrimiento para cosechadoras combinadas, así como las posiciones posibles para la transferencia de cereales entre las cosechadoras y tractores

En muchos casos se consiguen soluciones óptimas. Ravula *et al.* (2003) analizan en qué medida el número de camiones incrementa la eficiencia en el transporte de algodón hasta una planta de procesado. Otras investigaciones prueban diferentes estrategias con el fin de optimizar el número de camiones necesarios para el transporte de biomasa a una planta de procesado (Ravula *et al.*, 2007).

Para obtener mayor precisión en el estudio de los tiempos de transporte, además del trayecto por carretera, será necesario fijarse en parámetros como la accesibilidad del lugar de ensilado, comodidad y rapidez en la descarga del silo... Esto nos lleva a un análisis más profundo del sistema de transporte. Con esta intención de optimizar la asignación de recursos para el transporte hay nuevas líneas de investigación abiertas (Carpente *et al.*, 2007).

Nuestro objetivo es garantizar el menor coste de la operación de cosecha, pero dando prioridad a la fecha de cosecha de partida de cada agricultor. Es decir, a ser posible llevar a cabo la recolección de todas las parcelas en la fecha preferida por el agricultor. Además de las rutas, se obtendrá una previsión del número óptimo de transportes necesarios para que no existan tiempos de espera. Esta aplicación facilitaría mucho la toma de decisiones a la hora de asignar los recursos en el transporte.

Para conseguir soluciones lo más eficientes posible hay que tener en cuenta la disponibilidad de transportes y su coste, así como el coste horario de la cosechadora. El objetivo de usar esta aplicación será saber con anterioridad a la recolección cual será el número de transportes que conjugados con el rendimiento de la cosechadora y las características propias de cada lugar de ensilado, minimice el coste del sistema general de recolección.

Para utilizar el sistema de ayuda a la decisión será necesario tener en cuenta parámetros de capacidad efectiva de la máquina y predecir el rendimiento de forraje que se puede obtener en cada parcela. Se necesitan estudios, relacionados con cada tipo de cosechadora de forraje, como los realizados por Amiama *et al.* (2010) para obtener resultados con la mayor precisión posible.

En un futuro no muy distante se espera tener implementados estos sistemas de ayuda a la toma de decisiones, que junto con los automatismos para adquisición de datos que ya están funcionando actualmente, consigan mejorar los rendimientos de la maquinaria de la cooperativa y disminuir los tiempos invertidos por los técnicos en planificación y previsión.



3 OBJETIVOS

El objetivo general es caracterizar exhaustivamente los procesos que interactúan en la cosecha del maíz forrajero, con el objeto de desarrollar sistemas de ayuda a la decisión (SAD) que permitan una planificación idónea de todos los equipos que intervienen en la cosecha. Se persigue en última instancia reducir los costes asociados a la cosecha y ensilado del maíz forrajero.

Para ello será necesario plantear una serie de objetivos específicos:

- Definición de los ciclos de cosecha en función de los distintos tipos de maquinaria empleada, determinando de manera exhaustiva las interrelaciones entre los distintos agentes del sistema y los tiempos invertidos en las actividades de los distintos procesos que confluyen. Este objetivo se pretende conseguir mediante:

1. Análisis y cuantificación de las actividades desarrolladas por las cosechadoras a lo largo de la campaña, determinando los tiempos invertidos en cada actividad (recolección, traslados, tiempos de espera, averías, etc.).
2. Estudio de los tiempos y elementos empleados en cada una de las operaciones de la cosecha de forraje, lo cual nos permitirá clasificar y cuantificar los tiempos de espera de los distintos elementos que intervienen, con el fin de aumentar la eficiencia del sistema y reducir los costes derivados de la recolección del maíz forrajero.
3. Evaluación de la diferencia de costes que puede observarse entre una gestión excelente de los tiempos de cosecha y una menos eficiente.
4. Determinación del número de transportes que hacen más económica la cosecha de maíz forrajero.

- Evaluación de los dos tipos de cosechadoras empleadas para la recolección de maíz forrajero en la zona de estudio. Este objetivo se logrará:

1. Estudiando las capacidades efectivas de trabajo de las cosechadoras en un número significativo de fincas, permitiéndonos obtener capacidades efectivas de trabajo de las máquinas en su entorno y casuísticas habituales de trabajo.
 2. Analizando los tiempos y velocidades de trabajo de la cosechadora con tolva y de la cosechadora sin tolva, con el fin de poder comprobar cuál de las dos máquinas es más rápida cosechando las fincas.
 3. Determinando la forma de ataque de las parcelas con una y otra cosechadora lo que nos permitirá saber si la forma de ataque de las parcelas influye en el rendimiento de la cosecha.
 4. Evaluando la diferencia de costes de cosecha empleando una u otra cosechadora.
- Evaluación del proceso de descarga y llenado de los silos. Con este análisis se pretende:
1. Analizar la incidencia que tiene la anchura del silo, el nivel de llenado y la geometría de la rampa de acceso sobre la capacidad máxima de extendido y compactado de forraje en el silo
- Implementación de heurísticas que minimicen costes (reduciendo tiempos de desplazamiento y optimizando el número de transportes implicados) en el sistema. Este objetivo se logrará:
1. Desarrollando una aplicación basada en algoritmos heurísticos, diseñada en colaboración con el Departamento de Estadística e Investigación Operativa.
 2. Evaluando los resultados obtenidos y depurando la aplicación hasta la obtención de resultados fiables. Dotándola de flexibilidad para poder introducir restricciones o cambios a medida que evoluciona la cosecha.
 3. Comparando los resultados obtenidos, con el uso de la aplicación, con los obtenidos en una campaña real de trabajo, evaluando las diferencias tanto en términos de tiempo como en términos económicos.

4 MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 GENERALIDADES

4.1.1 CAVI

El Centro de Alimentación de Vacuno Irmandiños (CAVI), es una central de mezcla húmeda, que la cooperativa “Os Irmandiños” tiene en el municipio de Barreiros. Esta instalación comienza su actividad de acopio de forraje en septiembre de 2008 y su puesta en marcha como central de fabricación y reparto de ración alimentaria se inicia en enero de 2009. El forraje ensilado procede en el inicio de la actividad de 500 hectáreas de las fincas de los usuarios consumidores, que almacenan el forraje cosechado en el CAVI para que luego sea la cooperativa la encargada de servirlo a las distintas explotaciones en forma de ración diaria, adaptada a las necesidades de los animales de cada explotación. Actualmente CAVI alimenta en torno a 4000 cabezas de vacuno y el forraje procede de 1500 hectáreas, generando un fuerte incremento en las necesidades de acopio de forraje.

CAVI dispone en su sede central de 13 silos horizontales (también denominados silos bunker) para almacenar forraje. Dichos silos tienen diferentes dimensiones, en función del tipo de forraje al que se destinan en su fase de diseño. Los silos identificados y numerados del 1 al 8, ambos incluidos, tienen unas dimensiones de 65 m de largo, 5 m de alto y 14 m de ancho, los silos identificados con los números 9, 10 y 11 conservan las mismas dimensiones de largo y alto pero tienen un ancho inferior, 9 m. Los silos identificados con los números 12 y 13, también tienen las mismas dimensiones de largo y alto, y su anchura es de 18 y 21,5 m, respectivamente. En la figura 1, se pueden apreciar las dimensiones variables en el ancho de los silos.



Figura 1. Vista general de los silos del CAVI

La actividad crítica, dado el número de agentes implicados y la carga de trabajo, tiene lugar durante los meses de ensilado.

En el CAVI, durante la operación de llenado del silo, intervienen un número variable de camiones (determinado por el número de cosechadoras de forraje con actividad y de su distancia al centro) y varios vehículos para el extendido y compactado del forraje. Los vehículos de transporte acceden al silo, realizan la descarga, y los vehículos de extendido y compactado extienden el forraje en finas capas, para su adecuada compactación.

La velocidad del proceso varía en función del nivel de llenado del silo. Cuando el llenado del silo está en un estadio inicial la descarga será rápida, así como el extendido. A medida que aumenta la altura del forraje y la rampa de acceso adquiere una mayor pendiente, el acceso de los camiones se dificulta y en el proceso de vaciado del camión han de adoptarse mayores precauciones para evitar la posibilidad de vuelco. Adicionalmente el proceso de extendido se enlentece al aparecer pendientes transversales que dificultan la operación. Cuando el ritmo de llegada de camiones supera la capacidad del sistema para la descarga, extendido y posterior compactado, se producen esperas de los vehículos de transporte. A su vez estas esperas pueden derivar en esperas de la cosechadora, al no tener vehículos en los que verter el forraje cosechado, con lo que se producirá una disminución en la capacidad efectiva de trabajo de la misma.

Una correcta coordinación y dimensionamiento de los equipos será fundamental para obtener un silo de calidad.

4.1.2 Equipos utilizados

Los datos necesarios para este trabajo han sido obtenidos en distintas campañas de recolección de maíz forrajero llevadas a cabo por la Cooperativa Os Irmandiños S.C.G y para su obtención se ha utilizado la siguiente maquinaria y equipamientos:

4.1.2.1 Maquinaria

4.1.2.1.1 *Cosechadora NewHolland FX58*

Para la realización de este trabajo, se ha contado con las cinco cosechadoras de las que dispone la cooperativa Os Irmandiños en su parque de maquinaria. Los modelos empleados por la cooperativa llevan una tolva incorporado en la que van recogiendo todo el forraje que van procesando para luego transferirlo al camión que se encarga del transporte hasta el silo, bien del socio que lo solicite o hasta las instalaciones que la propia cooperativa tiene para este fin (CAVI).

Las cosechadoras modelo New Holland FX 58, como la mostrada en la figura 2, llevan incorporada una tolva modelo 2025 MR, tienen una potencia nominal de 481 CV y pueden equiparse con un cabezal para maíz de 6 u 8 hileras.



Figura 2. Cosechadora NewHolland FX58

4.1.2.1.2 Cosechadora Claas Jaguar 950

Durante los meses de septiembre y octubre de 2012, coincidiendo con la campaña de recolección de maíz forrajero, también se ha contado con los datos aportados por una cosechadora externa a la cooperativa, que le presta sus servicios en las campañas de recolección de forraje. Esta cosechadora no lleva tolva incorporada, por lo que durante la cosecha necesita trabajar siempre de forma simultánea con un tractor o un camión al que transferir el maíz que va picando. Los datos obtenidos a partir del trabajo de esta cosechadora nos han permitido hacer una comparación de las cosechadoras con tolva y las cosechadoras sin tolva incorporada.

La cosechadora modelo Claas Jaguar 950, mostrada en la figura 3, tiene una potencia nominal de 530 CV y ha estado equipada con un cabezal de 8 hileras.



Figura 3. Cosechadora Claas Jaguar 950

4.1.2.1.3 Vehículos de transporte

Para el transporte del forraje cosechado se han empleado camiones y/o tractores de una capacidad similar a las tolvas de las cosechadoras:

- Tractor modelo Claas Axion 840 CEBIS, con 212 cv de potencia, equipado con un remolque con basculante hidráulico, 2 ejes montados en tándem y con pma de 10000 kg.
- Tractor modelo John Deere 6910 s, con 165 cv de potencia equipado con un remolque con basculante hidráulico, 2 ejes montados en tándem y con pma de 10000 kg.

Además se han empleado distintas marcas de camión dumper con PMA 26000 kg, carga máxima entre 13000 y 14000 kg y camiones bañera de 3 ejes con PMA 41000 K y carga máxima entre 28000 y 29000 kg.

4.1.2.1.4 Vehículos para extendido y compactado

Los vehículos de extendido y compactado son los encargados de extender el forraje, procedente de las fincas, en finas capas para su adecuada compactación. En los silos más anchos, donde las maniobras son más fáciles, cuando el volumen de material pendiente de extender es muy elevado, pueden trabajar simultáneamente dos máquinas, como se muestra en la figura 4.

Para el extendido y compactado del silo se han empleado o bien tractores equipados con un cazo o palas.



Figura 4. Pala y tractor trabajando en el silo

4.1.2.2 Sistemas de captura y procesamiento de datos

4.1.2.2.1 *Sistema de localización vehicular y telemetría*

Las cosechadoras de la cooperativa Os Irmandiños empleadas en el estudio (New Holland FX58), tienen instalado un sistema que permite la obtención de datos de posicionamiento de las cosechadoras vía GPS en todo momento (Amiama *et al.*, 2007), permitiendo conocer, además de la trayectoria recorrida por la cosechadora, tiempo de cosecha, tiempos que esta parada la cosechadora, avisos de mal funcionamiento o avería de la cosechadora, etc. Los datos capturados mediante este sistema y el empleo de programas GIS han permitido llevar a cabo un análisis detallado de los tiempos de ciclo de las cosechadoras.

En cada cosechadora hay instalado un ordenador, al que están conectados una serie de periféricos:

- DGPS: el receptor DGPS se encuentra instalado en el exterior de las cosechadoras. La precisión de funcionamiento se sitúa por debajo de 15 metros sin corrección diferencial, y si recibe la corrección diferencial EGNOS la precisión se situará por debajo de los 3 metros.

Toda la información recopilada puede integrarse en un Sistema de Información Geográfica (GIS), de modo que podremos conocer la trayectoria que ha realizado la máquina en el momento que lo deseemos.

- Sistema de adquisición de datos (DAQ). Este sistema permite captar la información desde 2 hasta de 40 sensores instalados en distintos puntos de las cosechadoras, transformando las señales eléctricas de los sensores en datos que el ordenador puede interpretar. Podremos conocer, por ejemplo, el peso de la tolva, las revoluciones del tambor picador, niveles de aceite, número de descargas y distintos estados de la cosechadora.

- Monitor táctil: cada cosechadora dispone de un monitor táctil (véase figura 5) montado en la cabina, que permite la captura de información que le proporciona el conductor. A través de esta pantalla, el conductor puede marcar el inicio y fin de la actividad para un socio determinado, el inicio y fin de la cosecha en una finca concreta, esperas de camión, repostajes, mantenimientos, etc

Todos los elementos están conectados entre sí, por lo que el conductor desde la pantalla táctil también puede consultar cualquier dato relacionado con la actividad desarrollada hasta el momento (tiempo transcurrido, kg procesados, fincas cosechadas para cada socio, etc).



Figura 5. Monitor táctil instalado en una de las cosechadoras

Este sistema almacena los datos en formato de Access y crea un fichero distinto para cada día de trabajo que registra. De modo que toda la información queda ordenada por la fecha en que ha sido guardada, facilitando su posterior manejo y procesado.

Desde el ordenador de la cosechadora se pueden volcar fácilmente copias de los datos a otro ordenador o a un disco duro.

4.1.2.2.2 *Receptor GPS Datalogger*

La cosechadora Claas Jaguar 950 no dispone del sistema de localización vehicular instalado en las cosechadoras de la Cooperativa, por lo que ha sido necesaria la instalación de un receptor GPS Datalogger en la propia cosechadora y en todos los transportes que la acompañaron durante la campaña de recolección del maíz.

Los datos que recoge el GPS son guardados en una memoria interna y posteriormente se pueden recuperar mediante una conexión a un ordenador a través de un cable USB, cada punto tendrá una posición en el mapa y la fecha y hora en la que ha sido tomado.

Se emplearon GPS modelo Logger RGM-3800, como el mostrado en la figura 6, que cuentan con las siguientes características principales:

- Receptor SiRF III GSC3f/LP
- 64MB de memoria para 650000 puntos.
- Tres tipos de configuración para la grabación de datos.
- Luz de estado multifunción: batería, memoria y estado de la señal.
- Antena interna
- 20 canales "all in view tracking"
- Tiempo de operación: 10 horas con 2 pilas tipo AAA
- Puerto de carga Mini-USB.
- Compatible WAAS, EGNOS
- Botones para arranque y restablecimiento de la memoria.
- Graba: Hora UTC, Longitud, Latitud, Altitud y Velocidad.
- Intervalos de grabación configurables por el usuario



Figura 6. Receptor GPS Datalogger

Para evitar posibles pérdidas de datos por descarga de las baterías y/u olvido de encendido, los GPS Datalogger han sido conectados directamente a los conectores de mecheros de la cosechadora y de los transportes. De este modo nos aseguramos que el tiempo que la cosechadora y los transportes estuvieron encendidos el GPS ha estado recogiendo datos.

4.1.2.2.3 *Aplicación informática para análisis de maniobras*

Para estudiar la trayectoria de las cosechadoras se ha desarrollado un software que, basándose en los datos de posicionamiento obtenidos vía GPS, permite visualizar la trayectoria seguida por las cosechadoras, mostrando el tiempo y la distancia recorrida en cada momento, tal y como se muestra en la figura 7. Con esta aplicación se puede ver cómo avanza la máquina por la finca como si de un video se tratase, pudiendo parar, volver hacia atrás y continuar cuando lo deseemos, facilitando de este modo el estudio de las maniobras realizadas en cada momento. Las maniobras analizadas quedan registradas en un archivo Excel, que contiene la fecha, hora y la distancia acumulada por la cosechadora, información que facilitará el análisis de las maniobras realizadas por las cosechadoras.

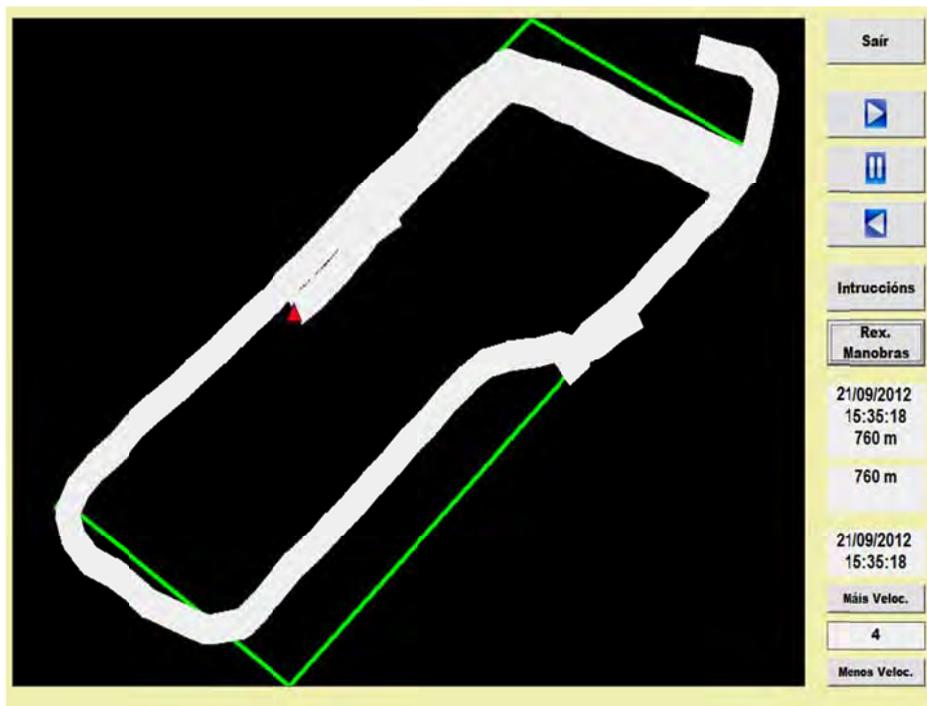


Figura 7. Visor de fincas con parte de la trayectoria seguida

4.1.2.2.4 Aplicación informática para procesamiento de datos

El sistema de localización vehicular y telemetría captura un gran número de información, de la que tan sólo necesitaremos una pequeña parte. Para facilitar el manejo de la información, se ha desarrollado una aplicación que permite seleccionar el intervalo de tiempo que nos interesa analizar y los datos que más nos interesan, proporcionando toda la información en una hoja Excel que nos permitirá trabajar cómodamente con todos los datos capturados durante el cosechado.



Figura 8. Pantalla procesamiento de datos de la cosechadora

Esta misma aplicación, a partir de los datos capturados por el GPS instalado en las cosechadoras, y según el intervalo de tiempo marcado por el operador, también nos proporcionará la trayectoria seguida por las máquinas en formato shape (shp), permitiendo la visualización de las trayectorias en la Base Cartográfica Digital.

Previamente para cada uno de los estudios realizados, se ha hecho una comprobación manual de los datos volcados a la hoja de Excel, comprobando que no había ningún dato que estuviera mal o fuera exagerado en comparación con los que se manejan habitualmente como puede ser la capacidad de la cosechadora, fincas desconocidas, etc., a través de un proceso de revisión que se ha dividido en tres partes:

Tiempo de cosecha:

Para cada cosechadora ha sido necesario comprobar el tiempo de cosecha, ya que este influye directamente en la capacidad efectiva de trabajo de la máquina, que suele estar comprendida entre 0,5 y 2,5 ha h⁻¹. Una capacidad efectiva muy alta o muy baja puede deberse a un error, por parte del conductor, a la hora de anotar el inicio o fin de la cosecha de la finca. A medida que avanza la campaña los errores, por parte de los conductores, tienden a disminuir debido a que se encuentran más familiarizados con el sistema y no se despistan tanto al seguir una rutina de trabajo.

Estos datos han sido comprobados y corregidos a partir de los datos de GPS de cada cosechadora, viendo la trayectoria que ha seguido la máquina, comprobamos si la cosechadora se encuentra en esa parcela, en ese día y en esa hora en concreto.

Número de Descargas:

El número de descargas nos permitirá obtener información para poder saber el número de camiones necesarios para poder llevar a cabo el transporte del forraje.

Cada cosechadora lleva instalado un dispositivo que cada vez que levanta la tolva para realizar la descarga en un camión queda registrado en una tabla de datos, donde vemos a qué hora hizo la descarga. Lo normal es que hagan aproximadamente cuatro descargas por hectárea, y entre descarga y descarga transcurren entre 10-12 minutos. Si hay varias descargas en menos de 4 minutos se considerará una sola descarga.

Debemos comprobar que las descargas se han realizado cuando la máquina realmente estaba trabajando en una determinada parcela ya que podría estar en mantenimiento y en esos casos no se contabilizan.

Fincas Desconocidas:

Al tener rotaciones en las fincas, cada campaña pueden aparecer parcelas que no están identificadas ni dadas de alta en nuestra base cartográfica digital por lo que tenemos que crearlas para después poder trabajar con ellas. Se han creado nuevas parcelas asignándoles un nuevo código de parcela y se ha identificado el propietario o socio de la cooperativa, con el fin de que más adelante se conozcan la totalidad de las fincas del mismo socio trabajadas por la cosechadora.

4.1.3 Localización de las parcelas analizadas y base cartográfica

4.1.3.1 Localización de las parcelas analizadas

Para realizar el análisis de ciclos se ha partido de los datos de la cosecha de maíz forrajero, obtenidos en un total de 19 parcelas, propiedad de socios de la cooperativa Os Irmandiños, que demandaron los servicios de la misma para realizar la cosecha del cereal en las campañas 2006 y 2007. Las parcelas están localizadas en los municipios lucense de Ribadeo, Barreiros y Trabada.

Para el posterior análisis económico y cuantificación de los tiempos de espera de las cosechadoras, se han analizado todas aquellas fincas cosechadas por las dos cosechadoras que en la campaña 2008 ya tenían instalado el referido sistema de localización vehicular y

telemetría. Se han obtenido datos de un total de 207 parcelas ubicadas en los ayuntamientos lucenses de Ribadeo, Barreiros, Trabada, Xermade y Meira.

Los datos de la campaña del año 2009 se han utilizado para desarrollar y comprobar la aplicación de gestión de rutas, centrandó este estudio en los municipios cercanos a la sede de la Cooperativa situada en el municipio de Ribadeo.

Posteriormente, en el año 2012 y en el mismo entorno geográfico se ha llevado a cabo una comparación entre los dos tipos de cosechadoras que ha empleado la Cooperativa durante la campaña de recolección de maíz forrajero, con tolva y sin tolva. Para la realización de este trabajo se seleccionaron 82 parcelas con geometría similar, fundamentalmente rectangular, con el fin de garantizar que la forma de la parcela no fuese una variable condicionante en el rendimiento de la cosechadora.

La figura 9 muestra la distribución espacial de las parcelas cosechadas por la Cooperativa Os Irmandiños, que han sido utilizadas en el estudio. Como puede comprobarse, las parcelas se extienden sobre un área geográfica amplia.

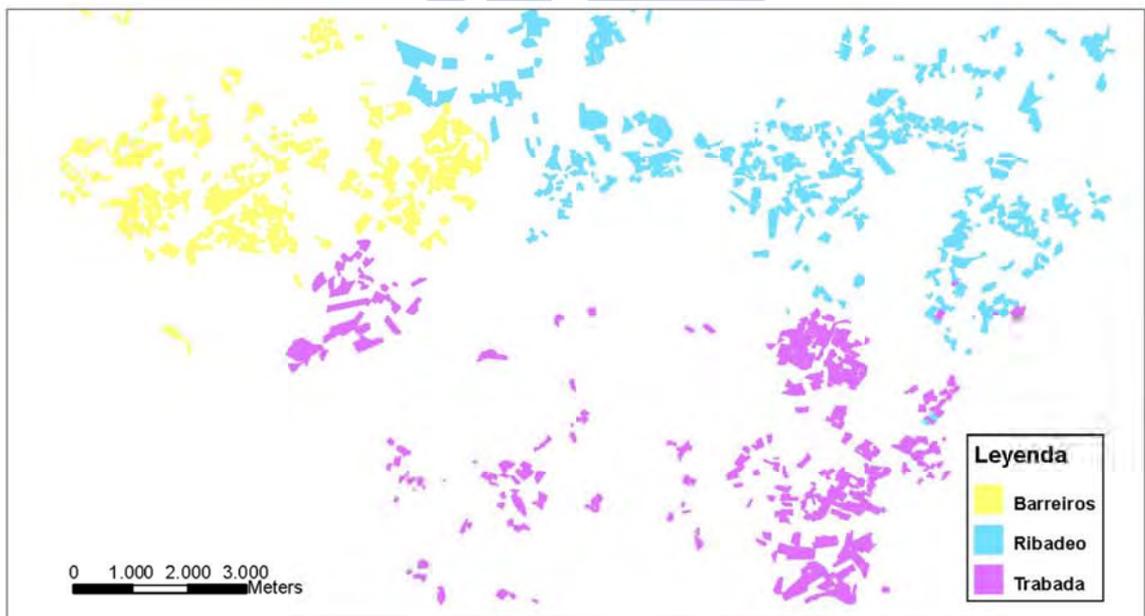


Figura 9. Localización de parcelas de los municipios de Barreiros, Ribadeo y Trabada usadas en el estudio

4.1.3.2 Creación de una base cartográfica digital

El departamento de Ingeniería Agroforestal disponía de información de la cartografía en formato digital, procedente de la Gerencia Territorial del Catastro, de cada una de las provincias afectadas por el estudio y clasificada por ayuntamientos.

Tanto para el procesado de los datos como para la evaluación de la aplicación de Gestión de Rutas se hizo necesaria la construcción de una base cartográfica digital donde tuviésemos representado el posicionamiento, acceso y superficie de las parcelas pertenecientes a los distintos socios, así como las carreteras y caminos de la zona de trabajo, por donde se movieron las cosechadoras de la cooperativa.

Dicha base cartográfica digital está basada en un Sistema de Información Geográfica (GIS) formado por capas vectoriales montadas sobre ortofoto en proyección ED50 UTM. Esta base cartográfica nos permite tener georreferenciadas las parcelas de cada uno de los socios y acceder a datos, almacenados en archivos tipo shape, como son la superficie, perímetro, socio, explotación, municipio, distancia de la finca al silo, etc, facilitando la selección de parcelas para los estudios a realizar. Además, con el Sistema de Información Geográfica (GIS) hemos podido representar o corregir, a partir de la trayectoria seguida por las cosechadoras, las parcelas cosechadas.

Para la creación de la red, se han superpuesto los datos de posicionamiento de las cosechadoras, procedentes de los GPS que llevan instalados, sobre la cartografía existente y se ha depurado eliminando los recorridos que hacía la maquina cuando trabajaba en la recogida de los forrajes dentro de las fincas. Además, se han corregido paradas, intersecciones, y se ha generado la red de manera que no se contabilice el mismo punto más de una vez.

La ventaja de crear la red de carreteras y caminos a partir de los datos de GPS es que nos aseguramos de que por esos caminos o carreteras sí es capaz de pasar la cosechadora. Las cosechadoras autopropulsadas de forraje necesitan de gran anchura de vía para circular, lo que hace que en muchos de los caminos de los ayuntamientos que abarca la cooperativa no puedan pasar. Si tan sólo nos hubiésemos guiado por los caminos y carreteras de la base cartográfica incluiríamos tramos por los que la cosechadora no es capaz de pasar.

Para completar la red, se ha decidido superponer la red existente en ortofotos georeferencias de la zona y con las herramientas de edición del GIS ampliar la red por encima de las carreteras que se consideraban suficientemente anchas como para que la cosechadora hubiese podido utilizarlas.

Para conocer las distancias entre distintos puntos de la red se ha utilizado la extensión Network Analyst del programa de GIS, que nos ha dado como resultado una red de caminos interconectados, donde se puede saber la distancia desde un punto hasta cualquier otro de la red.

4.1.3.3 Aplicación para exportación y transformación de datos

Nos encontramos con que disponemos de una base digital que contiene una gran cantidad de información, pero sin embargo para la aplicación de gestión de rutas sólo se necesitan parte de los datos y el exceso de información complica el trabajo y ralentiza el cálculo, por lo que ha sido necesario depurar toda la información disponible para poder extraer sólo la que se necesita para cada caso.

Un primer paso ha sido crear una base de datos digital ordenada por la fecha de solicitud de cosecha de cada socio, asignando a cada socio las fincas que ha solicitado para cosechar en una fecha concreta. Posteriormente, se ha desarrollado una aplicación de muy sencilla utilización que permite asociar las bases de datos extraídas de la cooperativa a la base creada con las fincas y peticiones de los socios. De esta forma se puede automatizar la extracción y selección de toda la información para poder gestionarla de forma autónoma.

Los datos de las fincas proceden de los registros que ha guardado la cosechadora en anteriores campañas. Cada finca y cada socio están representados por un número único que no da lugar a errores de identificación. Disponiendo de toda esta información, la aplicación puede crear tres tipos de ficheros en formato de texto (txt): un fichero referente a las fechas de solicitud de cosecha, otro fichero que mediante una matriz de números relaciona cada socio con las fincas de su propiedad y otro archivo en forma de matriz que indica el tiempo medio que se tarda en cosechar cada finca seleccionada.

Además, para calcular las rutas necesitamos saber la distancia entre fincas, lo primero que se ha hecho es marcar las fincas en la base cartográfica, y mediante la herramienta “matriz de

costes”, incluida en el programa de GIS, se ha intentado calcular la distancia por carretera de cada finca el resto de las otras fincas.

Para calcular una matriz de costes se necesita un punto de origen y uno de destino concretos, y las fincas están formadas por muchos puntos; para solucionarlo se ha decidido que la posición de cada finca esté representada por su centro geométrico (centroide).

Dado que las fincas son irregulares resulta muy difícil y tedioso situar el centro de cada una de las fincas en la base cartográfica. La solución adoptada ha sido desarrollar una nueva aplicación que, de forma automática, crea un fichero de puntos que se corresponde con el centroide de cada una de las parcelas indicadas. Este fichero se puede superponer en la base cartográfica generada previamente y a partir de la nueva información ya podemos calcular la matriz de costes, que nos dará como resultado la distancia que hay por la carretera, en metros, de cada centroide de una finca el centroide de todas las demás. En este cálculo se ve la ventaja que supone el seleccionar sólo las fincas que nos interesan, puesto que si intentamos sacar la distancia entre todas las fincas existentes en la base cartográfica, la matriz sería tan grande que requeriría ordenadores con una gran potencia de cálculo.

El formato requerido por la aplicación de gestión de rutas es un archivo de texto en forma de matriz que necesita los datos de las distancias medidos en intervalos de, por lo que finalmente se ha desarrollado una nueva versión de la aplicación que transforma la información existente (en metros) en intervalos de tiempo.

En todo este proceso de extracción de datos han surgido distintas complicaciones que se han ido resolviendo para depurar la aplicación hasta ver que los resultados que ofrecía no eran absurdos o contradictorios. Se ha comprobado que después de tantas transformaciones, las distancias medidas en metros y minutos eran las mismas teniendo en cuenta la relación de 20 km h^{-1} . De este modo se ha dado por válido este método para saber las distancias entre fincas, y además tenerlas en el formato idóneo.

Finalmente, y para mayor comodidad se ha estimado oportuno fusionar las aplicaciones desarrolladas hasta el momento, de forma que, después de varias depuraciones, disponemos de una única aplicación que transforma solamente los datos de las parcelas seleccionadas y, además, los presenta en el formato idóneo para introducirlos directamente en la aplicación de gestión de rutas.

Algunos de los datos que da como resultado esta aplicación (tiempos de cosecha y distancias entre fincas) se miden en unidades de tiempo. Pensando en aumentar las posibilidades a la hora de evaluar la aplicación de gestión de rutas, se le ha añadido la opción de poder presentar los datos en distintas unidades temporales (1, 2, 3, 4 ó 5 minutos), así podemos seleccionar previamente las unidades que queremos que tengan los archivos de salida.

4.1.4 Descripción del proceso de cosecha

En el análisis del ciclo de cosecha de maíz forrajero hay que tener en cuenta la iteración de los **tres procesos principales**:

- Cosecha
- Transporte
- Descarga en el silo

A continuación se describen las actividades más importantes que se desarrollan en cada uno de los procesos implicados en el ciclo de cosecha de maíz forrajero:

4.1.4.1 Cosecha de maíz forrajero

Es el proceso más importante del ciclo, puesto que es lo que va a condicionar la duración del ciclo total, además de ser el que representa los costes más importantes respecto del total de la cosecha de maíz forrajero. En él se pueden distinguir las siguientes actividades:

Cosecha

La cosecha propiamente dicha, se refiere al tiempo que la cosechadora tiene el cabezal en funcionamiento para realizar la siega del maíz, incluidos los tiempos de giro en las cabeceras de las fincas.

Alineación cosechadora-medio transporte

Esta actividad se lleva a cabo cada vez que la cosechadora llena la tolva. Será necesaria la alineación de la cosechadora con el medio de transporte, para poder realizar la descarga del maíz desde la tolva de la cosechadora a la caja de un medio de transporte, que será el

encargado de llevar el maíz cosechado al silo. La cosechadora detiene el cabezal y espera por el camión para llevar a cabo la descarga de la cosecha.

Las cosechadoras sin tolva incorporada, como el modelo Claas Jaguar 950, deben ir acompañadas en todo momento por un medio de transporte para que el forraje que la máquina va cosechando sea recogido por el medio de transporte. Es necesario que el medio de transporte trabaje de manera paralela a la cosechadora o detrás de la misma, dependiendo de la maniobra y/o de la finca. Únicamente se contabilizará el tiempo de alineación si es necesario que la cosechadora pare cuando se realiza el cambio de transporte. Esto puede suceder, sobre todo, en fincas pequeñas, donde el espacio disponible puede limitar la presencia de los tres vehículos.

Descarga de maíz

Será el tiempo empleado en transferir el material cosechado, desde la cosechadora con tolva al medio de transporte. Una vez que el medio de transporte está situado al lado de la parte trasera de la tolva de la cosechadora, como se muestra en la figura 10, el conductor de la cosechadora ya puede proceder a levantar y bascular la tolva de modo que vacíe la carga, que la cosechadora ha ido almacenando en la tolva a lo largo de todo su ciclo de cosecha, en el interior de la bañera del medio de transporte empleado. Una vez realizada la descarga de todo el material se volverá la tolva a su posición normal para seguir con la cosecha.

En las cosechadoras sin tolva esta actividad se realiza de manera simultánea a la recogida del maíz, ya que el medio de transporte debe estar siempre al lado de la cosechadora.



Figura 10. Traspase de forraje de la cosechadora con tolva.

4.1.4.2 Transporte

El transporte del material cosechado hasta el lugar de almacenamiento tiene una gran importancia en la eficiencia de todo el proceso. Por norma general los silos no están situados en la misma finca donde se está realizando la recolección, motivo por el cual necesitaremos, como mínimo, un medio de transporte para la cosechadora con tolva y dos para las cosechadoras sin tolva incorporada. Las actividades más importantes que se llevan a cabo son:

Alineación medio de transporte-cosechadora y descarga del maíz cosechado.

Una vez que el camión llega a la finca, se dirige al punto donde se encuentra la cosechadora y procede a colocarse perpendicularmente a la parte trasera de la tolva de almacenamiento de la cosechadora. Al mismo tiempo se va levantando la tolva de la cosechadora para proceder, una vez estén correctamente colocados, a la descarga de todo el material almacenado.

En el caso de las cosechadoras con tolva, el tiempo que el medio de transporte emplea en realizar esta actividad es el mismo que el que emplea la cosechadora en detenerse para levantar la tolva y transferir el material cosechado, por lo tanto será un tiempo de solape entre el ciclo de la cosechadora con el del medio de transporte empleado.

En caso de que se trabaje con cosechadoras sin tolva, el tiempo que necesita el medio de transporte para realizar esta actividad es el mismo que se necesita para llenar la caja del mismo.

Transporte al silo

Es el desplazamiento propiamente dicho. Esta actividad representa el tiempo que el medio de transporte invierte en llevar el maíz cosechado al silo y volver a la finca donde se está cosechando. Es el tiempo que necesita el camión para recorrer la distancia que separa la finca del silo, considerando la ida y la vuelta. Este tiempo será el mismo independientemente de con qué cosechadora se coseche la parcela.

Descarga de material en el silo

Tiempo invertido por el medio de transporte para descargar el material cosechado en el silo.

4.1.4.3 Descarga

Los silos que emplean la mayoría de los socios de la cooperativa, así como los existentes en el CAVI, son silos horizontales, generalmente de hormigón, y de unas dimensiones suficientes para facilitar la descarga de la cosecha y la compresión del material. Además, este tipo de silos tienen la ventaja de tener unos costes muy bajos de fabricación, mantenimiento y ensilaje.

En el proceso de descarga y ensilado es en el que interviene un mayor número de mano de obra. En el silo además de una pala para extender y compactar el maíz cosechado, habrá varios operarios que se encargan de completar la operación de manera manual.

A pesar de ser el proceso en el que interviene un mayor número de mano de obra, no es un proceso importante en la representación de los tiempos de ciclo, porque los tiempos necesarios para llevar a cabo las actividades de descarga, extendido y compactado en silo nunca son limitantes en comparación con los tiempos empleados en otras actividades de la recolección de maíz forrajero.

4.2 ANÁLISIS DE CICLOS EN LA COSECHA DE MAÍZ FORRAJERO

4.2.1 Metodología para el análisis de ciclos

4.2.1.1 Determinación de parámetros necesarios para el análisis de ciclos

De cada cosechadora New Holland FX58 se han obtenido todos los datos capturados ordenados por día de cosecha, de forma que por cada día de trabajo tenemos un archivo .mdb distinto. Si relacionamos esa información con la base cartográfica de la que disponemos, tendremos prácticamente todos los datos necesarios para realizar el análisis de ciclos.

Al inicio de cada jornada de trabajo el conductor de la cosechadora marca en la pantalla del equipo de telemetría el inicio de usuario, y a partir de ese momento va introduciendo los eventos de un día de cosecha: inicio socio, inicio finca, fin finca, fin socio, inicio/fin parada, etc. También se encarga de anotar cuándo y cuántos camiones están trabajando ese día.

Para poder analizar los ciclos ha sido necesario examinar previamente todos los datos obtenidos y así poder rechazar aquellos anómalos, que o bien por fallos en el sistema o errores del operario no representaban correctamente la realidad de la cosecha.

Actualmente la Cooperativa sólo dispone de sistemas de posicionamiento para las cosechadoras con tolva, por lo que ha sido necesario analizar de manera manual los tiempos invertidos en el resto de actividades del ciclo de cosecha en las que no intervienen directamente las cosechadoras.

Los datos obtenidos han sido los siguientes:

Superficie de la finca a cosechar; A (ha)

La superficie de las parcelas se ha obtenido directamente del Sistema de Información Geográfica (SIG). Previamente, ha sido necesario realizar una comprobación de las trayectorias capturadas por el GPS sobre las parcelas, para detectar posibles errores en la cartografía, que distorsionaban los resultados obtenidos. Para ello, se ha superpuesto sobre la base cartográfica la trayectoria seguida por la cosechadora y, de este modo, se ha podido conocer con exactitud el área cosechada, ya que en ocasiones no se correspondía con la superficie total de la parcela que figuraba en la base cartográfica.

Con la ayuda de los sistemas de información geográfica, podremos ver la trayectoria que ha seguido la cosechadora y comprobar si se ha recolectado toda la parcela (véase figura 12) o si por el contrario sólo se ha recogido el forraje de una parte de la parcela (véase figura 11). Empleando las herramientas del GIS podremos calcular la superficie cosechada de la parcela y referir en estos casos los resultados a la superficie cosechada y no a la superficie total de la parcela.

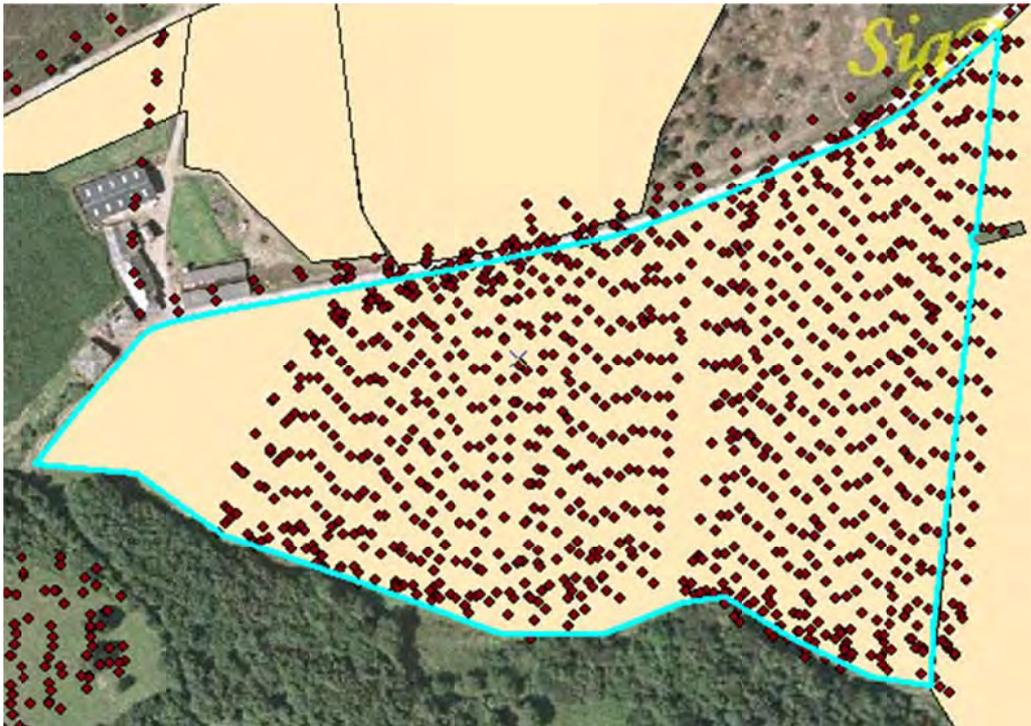


Figura 11. Imagen de una parcela de Ribadeo cosechada parcialmente



Figura 12. Imagen de una parcela de Trabada en la que la superficie cosechada coincide con la almacenada en la base cartográfica

En aquellos casos en que se ha cosechado toda la parcela bastará con capturar los datos del shape “parcelario”, ya que en él está almacenada tanto la superficie de la parcela, socio al que pertenece, y demás datos que queramos vincular de cada una de las parcelas.

Número de transportes utilizados en cada ciclo del sistema; N_t

El número de transportes necesarios es variable y depende, sobre todo, de la distancia que hay entre la finca y el silo. Cuando se inicia el trabajo en una finca el conductor de la cosechadora se encarga de introducir el número de transportes con los que va a trabajar, de manera que podemos consultar en la tabla eventos con cuántos medios de transporte ha estado trabajando cada día y en cada una de las fincas cosechadas.

Distancia de la finca al silo (ida y vuelta); D_t (km)

La distancia entre la finca y el silo se ha obtenido a partir de la herramienta de medición de la que dispone el GIS empleado. Al tener georreferenciadas las parcelas de las zonas en las que han estado trabajando las cosechadoras, y dado que conocemos la localización de los silos

de cada uno de los socios, con la herramienta “medición” podremos medir la distancia que hay entre la finca y el silo recorriendo los caminos o carreteras, de los que conocemos su traza gracias a las ortofotos georreferenciadas de la zona.

Velocidad media de los camiones; St (km h^{-1})

Para la determinación de la velocidad media de los camiones empleados se ha analizado el tiempo invertido por los medios de transporte en un total de 30 ciclos, de donde ha resultado una velocidad media de 20 km h^{-1} .

Peso almacenado en la tolva de la cosechadora; Vh (t)

De las fincas analizadas conocemos el nº de descargas realizadas y la producción total. Además las cosechadoras también tienen instalados unos sensores que nos permiten conocer los kg que lleva la tolva en el momento en que realiza la descarga. A partir de los datos registrados se ha obtenido un valor medio de 8,5 t que será lo que empleemos para nuestro análisis de ciclo, puesto que las variaciones son mínimas y no tienen influencias significativas en los tiempos de ciclo analizados.

Peso almacenado en cada unidad de transporte; Vt (t)

Cada unidad de transporte se encarga de transportar hasta el silo el material cosechado en un ciclo de la cosechadora. Aunque los medios de transporte empleados en el estudio tienen más capacidad de almacenamiento que la cosechadora este volumen no es suficiente para almacenar el material cosechado en dos ciclos de la cosechadora, por lo tanto, el peso que es capaz de almacenar la cosechadora en su tolva será coincidente con el peso transportado por cada camión, y se ha considerado un valor medio de 8,5 t.

Peso cosechado en cada ciclo; Vc (t)

Será el peso transportado por cada unidad de transporte y multiplicado por el número de transportes que intervienen en el ciclo total del sistema: $Vc = Vt \times Nt$ [4.1]

Tiempo para maniobras de alineación del medio de transporte con la cosechadora; Tht,a ($\text{h transporte}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$)

Será el tiempo que necesita el camión para alinearse con la cosechadora, es decir, tiempo que necesita desde que llega a la finca para colocarse perpendicularmente a la parte trasera de la tolva de la cosechadora.

A diferencia de Buckmaster, en este estudio vamos a considerar que este tiempo tiene valor 0, puesto que es el mismo tiempo que la cosechadora detiene la picadora y se prepara para realizar la descarga (levantar la tolva, etc) y el medio de transporte se está desplazando hacia el punto donde se encuentra la cosechadora para poder alinearse a su lado y recibir el forraje cosechado. Todo esto lo consideraremos como un único tiempo que será el tiempo de trasvase de material de la cosechadora hacia el medio de transporte; $T_{ht,t}$.

Capacidad de la pala extendiendo forraje en el silo; $C_{m,u}$ ($t h^{-1}$)

Se ha cuantificado, a partir de las observaciones realizadas, en $210 t h^{-1}$.

Tiempo de alineación del transporte en el silo; $T_{tu,a}$ ($h transporte^{-1} ciclo^{-1}$)

Será el tiempo que invierte el camión en realizar las maniobras en el silo. Este tiempo comienza a contabilizarse desde que el camión llega al silo y se prepara para la descarga. Según el promedio de las observación realizadas directamente en campo tiene una duración de aproximadamente 2 minutos para cada camión ($0,033 h transporte^{-1} ciclo^{-1}$).

4.2.1.2 Descripción del ciclo de cosecha

Considerando la labor de recolección de maíz forrajero con cosechadoras autopropulsadas de forraje como un sistema complejo en el que interaccionan varios procesos, consideraremos tiempo de un ciclo de trabajo (CT) al mayor tiempo de ciclo de cada uno de los procesos que intervienen (sin considerar los tiempos de espera). La maquinaria que interviene en este sistema son la cosechadora, un número de camiones variable en función de la distancia al silo y un tractor o pala para extender el forraje en el silo.

Básicamente en la descomposición de tiempos de cada ciclo de trabajo se distinguen:

Tiempos comunes al transporte y la cosecha:

Tiempo de trasvase cosechadora/transporte para la descarga; $T_{ht,t}$ ($h transporte^{-1} ciclo^{-1}$). Es el tiempo que necesitan la cosechadora y el transporte, una vez que la cosechadora tiene llena la tolva, para acercarse y realizar la descarga de la cosecha. Será el tiempo invertido en maniobras de alineación por parte del camión, además del tiempo necesario para realizar el trasvase del maíz recién cosechado.

El tiempo que necesita la cosechadora para realizar esta actividad es el mismo que invierte el camión en colocarse al lado de la cosechadora y recibir el forraje, por lo que computará en el ciclo de las dos máquinas.

Tiempos específicos de cada uno de los procesos:

Tiempo de ciclo de la cosechadora, sin tiempo desocupada; CTh ($h \text{ ciclo}^{-1}$). Ciclo total de la cosechadora. Será el tiempo necesario para llenar una tolva de la cosechadora, que incluye los tiempos de giro en los lindes de la parcela y el tiempo necesario para llevar a cabo la descarga (Tht,t).

Tiempo de ciclo del camión, sin tiempo desocupado; CTt ($h \text{ ciclo}^{-1}$). Ciclo total del transporte. Será la suma del tiempo necesario para recorrer la distancia entre la finca a cosechar y el silo, el tiempo de alineación con la cosechadora y el tiempo necesario para descarga y maniobras en el silo.

Tiempo de extendido del forraje en el silo; Ctu ($h \text{ ciclo}^{-1}$). Tiempo que necesita la pala y los operarios que están en el silo para extender el forraje cosechado en un ciclo de la cosechadora.

Tiempo invertido en el transporte propiamente dicho; Tt ($h \text{ transporte ciclo}^{-1}$). Es el tiempo que necesita el medio de transporte para recorrer la distancia entre la finca y el silo, contabilizando el tiempo de ida y el de vuelta, será función de la distancia y de la velocidad ($Dt St^{-1}$).

Tiempos de espera; Ti ($h \text{ ciclo}^{-1}$). El tiempo de espera de los elementos que intervienen en cada actividad se calcula restando al Ciclo Total (CT) del sistema el tiempo de ciclo de la actividad que desarrolla la máquina en cuestión:

Tiempo de espera de la cosechadora; $Ti,h = CT - CTh$ ($h \text{ ciclo}^{-1}$). Será el tiempo que la cosechadora está sin cosechar a la espera de poder descargar el material almacenado en la tolva.

Tiempo de espera del o de los medios de transporte; $Ti,t = CT - CTt$ ($h \text{ ciclo}^{-1}$). Se corresponde con el tiempo que los camiones están esperando por la cosechadora hasta que esta tiene llena la tolva y se realiza la descarga. Aunque menos frecuente puede darse el caso de que los medios de transporte tengan que esperar en el silo a que la pala esté preparada, etc.

Tiempo de espera de la pala esparcidora; $T_i, u = CT - C_{tu}$ ($h \text{ ciclo}^{-1}$). Será la diferencia entre el tiempo de ciclo total del sistema y el ciclo total de la pala, es decir, tiempo que la pala está sin trabajar esperando a recibir más material cosechado.

Tiempos comunes para el transporte y la pala esparcidora:

Tiempo de descarga del forraje en el silo; $T_{tu,u}$ ($h \text{ transporte}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$). Representa el tiempo que necesita el medio de transporte para descargar todo el material que lleva almacenado, ayudado por la pala que se encarga de extender y compactar el forraje.

4.2.1.3 Métodos de análisis empleados

Una vez recogidos todos estos tiempos en una hoja de cálculo, se ha podido analizar el ciclo de cada máquina así como el ciclo completo de la cosecha de maíz forrajero, empleando dos metodologías:

- La diseñada por Buckmaster y Hilton (2005)
- Análisis individual de cada ciclo

Con los resultados obtenidos con ambos métodos se ha realizado un contraste estadístico de análisis de la varianza, utilizando el paquete estadístico SPSS.

A continuación se detallan las principales características de cada metodología:

4.2.1.3.1 *Método de Buckmaster*

Con el método de Buckmaster lo que se pretende es, a partir de una serie de variables de entrada y datos conocidos, obtener como variables de salida la utilización de la cosechadora, del camión y del tractor o pala esparcidora en el sistema, así como la capacidad del sistema y el rendimiento que se obtiene de cada elemento que interviene.

En su análisis de ciclo, Buckmaster y Hilton (2005a), consideran distintas variables del sistema como pueden ser:

- Distintas capacidades de almacenamiento de las tolvas de las cosechadoras, algo que en este estudio no vamos a considerar, puesto que las dos cosechadoras que vamos a emplear son iguales, y por lo tanto tienen la misma capacidad de almacenamiento.

- Si las cosechadoras tienen tolva para almacenar la cosecha o precisan un medio de transporte para transferir directamente el material que se está cosechando en ese instante.

- Número de transportes empleados en cada finca.

Los análisis de ciclo que incluyen distintas máquinas requieren conocer la capacidad de cada máquina, parámetros y datos operacionales que influyen en el funcionamiento de cada una de las máquinas que intervienen en el sistema.

El uso de diagramas para explicar las relaciones e interdependencias de las máquinas que intervienen en un mismo sistema es un buen punto de partida, pero es algo tedioso. Buckmaster y Hilton han implementado una hoja de cálculo para analizar de forma rápida el ciclo de cosecha, de forma que a partir de una serie de variables de entrada se obtienen como resultados: la capacidad del sistema analizado, utilización de cada máquina, etc, pero para ello ha sido necesario definir una serie de parámetros:

- Tiempo cosechando; T_h (h cosecha⁻¹ ciclo⁻¹). Según Buckmaster es el tiempo que necesita la cosechadora para cosechar un determinado volumen de silo, dependerá de la capacidad máxima teórica de la propia cosechadora ($C_{m,max}$) y del rendimiento efectivo ($E_{f,max}$):

$$T_h = V_c / (C_{m,max} \times E_{f,max}) \quad [4.2]$$

- Si la cosechadora almacena el material que está cosechando, como es el caso de nuestro estudio, también habrá que tener en cuenta el tiempo que se necesita para transferir el material almacenado en la cosechadora al medio de transporte. Este tiempo dependerá de la propia cosechadora y viene definido por la Tasa de Transferencia del peso almacenado, TR_h (unidades cosechadas h^{-1}).

Para la realización de este estudio se ha analizado el ciclo de la cosecha de maíz forrajero en 19 fincas y en un total de 156 ciclos, y a partir de los datos obtenidos se han asignado valores a ciertas variables de entrada necesarias para emplear el método de Buckmaster y Hilton (2005). Las variables consideradas han sido:

- Capacidad máxima teórica de la cosechadora; $C_{m,max}$ (t h^{-1}). Para obtener este valor partimos de los datos capturados en todas las fincas cosechadas en las campañas 2006 y 2007. Ha sido necesario conocer las toneladas de maíz cosechadas en cada una de las fincas

estudiadas y el tiempo invertido por la cosechadora. Al tiempo neto de trabajo de la cosechadora ha sido necesario restarle el tiempo invertido en traspasar el forraje de la cosechadora al medio de transporte, de este modo hemos obtenido el tiempo que la cosechadora dedica única y exclusivamente a la cosecha del maíz.

En realidad estamos hablando de una capacidad real de la cosechadora puesto que el dato se ha obtenido de observaciones reales en campo, en condiciones reales de trabajo, por lo que ya no es necesario corregirlo con la eficiencia en campo de la cosechadora ($Ef, máx$). La capacidad máxima teórica de la cosechadora ($Cm, máx$) corregida con la eficiencia en campo vamos a designarla como capacidad real o efectiva de la cosechadora, Cm, h ($t h^{-1}$). Se define como capacidad real de la cosechadora (Cm, h) a las toneladas de maíz que la cosechadora es capaz de cosechar en una hora de trabajo.

- Tiempo de trasvase cosechadora-transporte para la descarga; Tht, t ($h ciclo^{-1}$). Este dato se ha obtenido del análisis de los datos GPS recogidos por la cosechadora. Será el tiempo que la cosechadora permanece parada en el mismo punto y que no se corresponde con tiempos debidos a repostaje, averías u otras paradas. De las observaciones realizadas en los 156 ciclos estudiados se ha obtenido un valor medio de 2 minutos ($0,033 h ciclo^{-1}$). Además, para comprobar la validez de esta información se han tomado datos directamente en campo con un cronómetro. Para Buckmaster y Hilton el tiempo de trasvase cosechadora-transporte es una variable intermedia que obtienen dividiendo el peso transportado por la unidad de transporte entre la Tasa de transferencia de la cosechadora ($Tht, t = Vt \times TRh^{-1}$). Nosotros trabajaremos directamente con el valor de Tht, t .

- Tiempo de ciclo del camión, sin tiempo desocupado (CTt) ($h ciclo^{-1}$). Se obtiene sumando Tht, t , Ttu, a , Ttu, u y el tiempo invertido en el desplazamiento (Tt), calculado a partir de la velocidad media (St).

$$CTt = Tht, t + Ttu, a + Ttu, u + Tt \quad [4.3]$$

Ttu, a es el tiempo de alineación del camión en el silo para la descarga

Ttu, u es el tiempo que necesita para realizar la descarga del material recién cosechado en el silo.

$T_{ht,t}$ es el tiempo que necesita la cosechadora para la descarga del material cosechado en el medio de transporte, además del tiempo invertido por el medio de transporte en maniobras de alineación con la cosechadora (tiempo que Buckmaster designa como $T_{ht,a}$)

A partir de todos estos datos podremos obtener una serie de variables intermedias y resultados que se pasan a describir:

- Tiempo de ciclo de la cosechadora, sin tiempo desocupada, C_{Th} ($h \text{ ciclo}^{-1}$), se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$C_{Th} = V_c / (C_{m,max} \times E_{f,max}) + T_{ht,t} \times N_t + T_{ht,a} \times N_t \quad [4.4]$$

si tenemos en cuenta lo expuesto en apartados anteriores la fórmula quedará simplificada de la siguiente forma:

$$C_{Th} = V_c / C_{m,h} + T_{ht,t} \times N_t \quad [4.5]$$

- Utilización de la cosechadora; U_h ($h \text{ cosechando } h \text{ ciclo}^{-1}$). Se define como el tiempo de ciclo que la cosechadora está cosechando con respecto el ciclo total del sistema:

$$U_h = V_c / C_{m,h} / C_{Th} \quad [4.6]$$

- Capacidad material del sistema; C_{sys} ($t \text{ cosechadas } h \text{ ciclo}^{-1}$). Se define como las unidades cosechadas por cada hora de ciclo y se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$C_{sys} = U_h \times C_{m,h} \quad [4.7]$$

- Rendimiento real de la cosechadora; $E_{f,h,act}$. Según Buckmaster se obtiene a partir de la siguiente expresión: $E_{f,h,act} = C_{sys,a} / C_{m,max}$ [4.8]

Además si conocemos la cantidad de maíz que vamos a cosechar o producción estimada (Y) junto con la superficie de la finca a cosechar (A) podremos calcular el tiempo (T) necesario para cosechar toda la finca a partir de la siguiente expresión: $T = Y \times A / C_{sys}$. [4.9]

Poder plasmar el análisis de ciclos en una hoja de cálculo nos ha permitido mejorar la comprensión de las interrelaciones existentes y una evaluación más rápida de las soluciones alternativas.

4.2.1.3.2 *Análisis individual de ciclos*

Para utilizar el método de Buckmaster debemos conocer una serie de características técnicas de las máquinas empleadas en el sistema. Con estos datos y sabiendo la producción obtenida (Y), superficie cosechada (A), distancia de la finca al silo (Dt), velocidad media (St) y número de transportes (Nt) a emplear, obtenemos como resultados la capacidad material del sistema (C_{sys}), rendimiento y la utilización de cada máquina por ciclo del sistema (U_h). Los valores que adquieren estas variables será algo que conocemos a priori en el análisis individual de ciclos.

Para cosechar totalmente una finca generalmente es necesario completar más de un ciclo. Con el análisis individual de ciclos analizaremos cada uno de los ciclos para luego calcular un promedio y estudiar a que se deben las diferencias entre unos y otros. En este análisis no necesitamos conocer las características de las máquinas que intervienen porque vamos a contabilizar los tiempos reales. Además estaremos considerando las condiciones particulares que se presentan al cosechar cada finca ya que en los tiempos de ciclo no sólo influye la producción y la superficie sino que también influyen la pendiente, forma de la finca, estado de la misma, forma de cultivo, etc.

A partir del sistema de localización vehicular, instalado en las cosechadoras, conoceremos los siguientes datos:

- Tiempo de ciclo de la cosechadora, sin tiempo desocupada o de alineación; C_{Th} (h ciclo⁻¹). Se obtiene de los datos recogidos por la aplicación de telemetría, sumando tiempos de cosecha y tiempos de trasvase cosechadora-transporte. Gracias a los datos recogidos por la telemetría podemos conocer exactamente el momento en que la cosechadora comienza a cosechar y el momento en que levanta la tolva para transferir el material al medio de transporte. Entre estos dos tiempos se ha analizado toda la trayectoria seguida por la cosechadora para poder restar paradas realizadas por la cosechadora como pueden ser averías, mantenimientos, paradas para desayunar y otras muchas que se producen a lo largo de la cosecha y que no son computables en el tiempo de ciclo.

El tiempo transcurrido desde que se inicia una cosecha hasta el momento en que vuelve a iniciarse la siguiente cosecha, para llenar una nueva tolva, una vez que ha finalizado la

descarga será el ciclo total de la cosechadora (CTh), descontado el tiempo que la cosechadora ha estado inactiva.

En este caso ya no necesitamos conocer la eficiencia de la cosechadora, ni la capacidad ni tampoco el tiempo que se invierte en hacer cada una de las actividades porque ya obtenemos el tiempo de ciclo de la cosechadora directamente de los datos recogidos por la aplicación de telemetría.

- Tiempo de transferencia cosechadora-transporte para la descarga; $T_{ht,t}$ ($h \text{ ciclo}^{-1}$). El tiempo de transferencia será el tiempo que la cosechadora permanece en un mismo punto, descartando los tiempos de espera por camión o paradas de otro tipo (avería, descanso,...). Además la hora en que se levanta la tolva deberá estar dentro de este período de tiempo. Este dato se obtiene del análisis de los datos recogidos por el GPS instalado en las cosechadoras. En la figura 13 se resaltan las paradas realizadas por la cosechadora durante la recolección de maíz en una finca del municipio de Trabada.

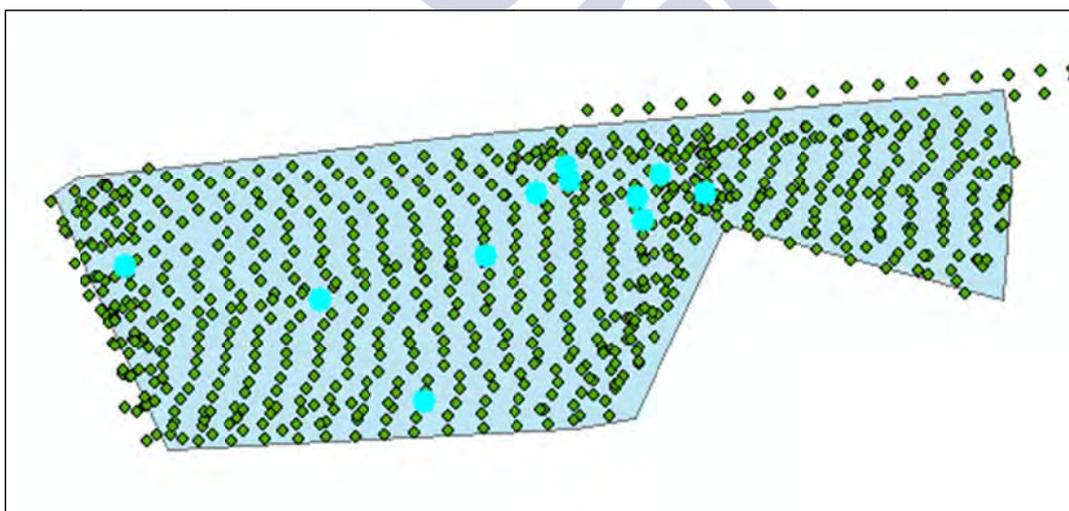


Figura 13. Trayectoria de la cosechadora en una finca de Trabada, los puntos en azul representan las paradas de la cosechadora.

- Tiempo de ciclo del camión, sin tiempo desocupado; CT_t ($h \text{ ciclo}^{-1}$). Se obtiene sumando los tiempos entre descargas sucesivas para cada transporte del ciclo. Para obtener el tiempo de ciclo del camión se ha supuesto que no existían tiempos de espera de camión. Esta simplificación se justifica en el sentido de que lo que realmente condiciona el ciclo es el tiempo de espera de la cosechadora, ya que al ser el ratio coste cosechadora/camión muy elevado, puede ser rentable incrementar el número de camiones para disminuir el tiempo del

ciclo de la cosechadora, en caso de que la cosechadora tenga tiempos de espera muy elevados. Nunca se plantearía incrementar el número de cosechadoras como consecuencia de un tiempo de espera de camiones elevado, con el objeto de reducir el tiempo del ciclo, dado el elevado ratio mencionado (que origina que el tiempo de espera del camión tendría que ser elevadísimo para introducir una nueva cosechadora) y la dificultad de duplicar la cosechadora en sí mismo.

Utilizando el mismo procedimiento que en el método descrito anteriormente, podremos obtener los datos de utilización de la cosechadora, del camión y del tractor, así como la capacidad del sistema (Csys).

4.2.1.4 Optimización del tiempo de cosecha

A partir del sistema de telemetría, instalado en dos de las cosechadoras disponibles en el parque de maquinaria de la Cooperativa, hemos podido conocer los eventos que se han llevado a cabo en cada momento de la campaña de ensilado de maíz forrajero. Conocemos con exactitud cuántas fincas se han cosechado, cuándo se ha comenzado, cuándo se ha finalizado, hemos podido determinar el tiempo que la cosechadora ha estado esperando por los camiones y también hemos podido conocer el tiempo invertido en desplazamientos de una finca a otra.

La cosechadora es la máquina implicada en el ciclo de ensilado de maíz forrajero que tiene los costes de adquisición más elevados, que sumados a los costes de combustible y mantenimiento hacen que los costes asociados a la cosechadora sean los más importantes de todo el ciclo de trabajo de ensilado de maíz.

El tiempo que la cosechadora está parada, en espera de transporte para la descarga, repercute incrementando el tiempo de realización de la labor de cosecha y, por tanto, aumenta de forma significativa los costes de la operación. Para minimizar este coste es necesario conocer el tiempo máximo que la cosechadora puede esperar por el transporte, o lo que es lo mismo, a partir de qué tiempo de espera ya sería conveniente aumentar el número de unidades de transporte.

Para unos tiempos de espera elevadísimos de camión, se podría reducir su número, pero este sería un caso muy excepcional ya que la mayoría de las veces se utiliza un único camión

por lo que no sería posible reducir su número, y en caso de que hubiera más de un camión habría que tener en cuenta el elevado ratio entre los costes horarios de ambas máquinas antes de prescindir de un medio de transporte.

Entonces, si conocemos los costes horarios de la cosechadora y de los medios de transporte empleados, podemos determinar el tiempo que la cosechadora puede estar parada como máximo en cada ciclo, sin que sea económicamente más rentable emplear otro medio de transporte adicional. Para ello deberemos tener en cuenta lo siguiente:

C: Coste horario de camión

C': Coste horario de la cosechadora

K: ratio entre coste horario de la cosechadora y el coste horario del camión $K=C'/C$.

Ce: Capacidad efectiva de trabajo de la cosechadora ($h\ ha^{-1}$)

Uh_b: tanto por 1 de tiempo que está ocupada la cosechadora con 1 camión.

Objetivo: Obtener el X1 (véase figura 14) de ocupación que hace rentable pasar de 1 a 2 camiones, el X2 que hace rentable pasar de 2 a 3....

A partir de la siguiente expresión podemos obtener el coste horario con "n" camiones y el tiempo que cada camión es capaz de mantener ocupada la cosechadora:

$$\text{Si } U_{h_b} < 1: (N_t \times C + K \times C) / C_e \times U_h = (C (N_t + K) / U_h) / C_e \quad [4.10]$$

$$\text{En otro caso: } C_e (N_t \times C + K \times C) \quad [4.11]$$

Coste por hora mínimo con n + 1 camiones ($U_{h_b} = 1$):

$$((N_t + 1) C + K \times C) / C_e = C (N_t + 1 + K) / C_e \quad [4.12]$$

La intersección de las 2 curvas está en $U_{h_b} = Nt + K / Nt + 1 + K$

[4.13]

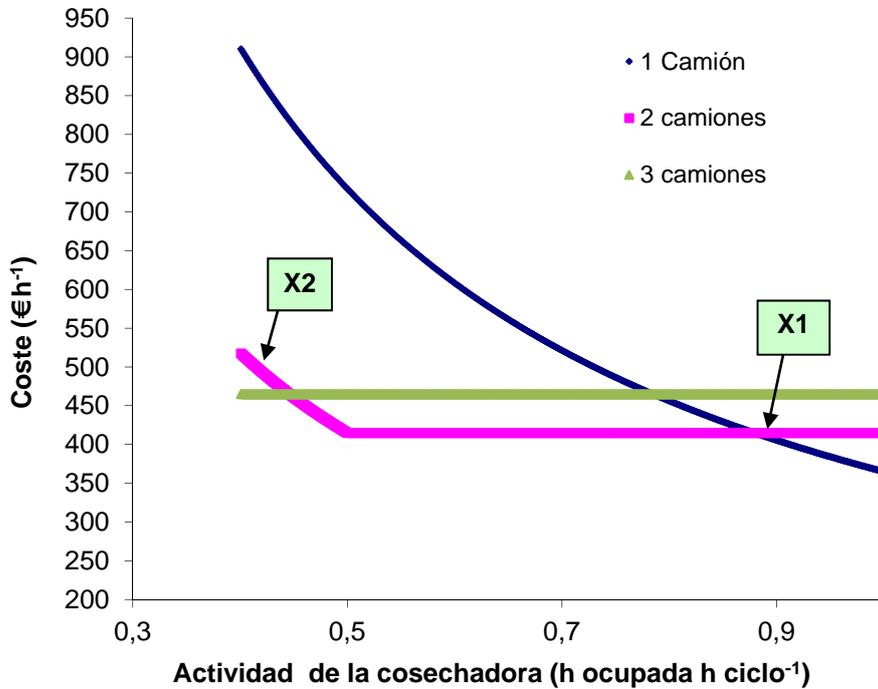


Figura 14. Evolución de los costes de la recolección (€ h⁻¹) en función del número de camiones (K=6,30 C=50 €) para Ce= 1 ha h⁻¹

En la figura 14, se muestra la evolución de los costes de recolección en función del número de camiones que participan, para valores típicos de las operaciones de recolección dados por K= 6,30 y C = 50 €h⁻¹. Como se ilustra en la línea azul del gráfico, cuando la actividad de la cosechadora cae por debajo del 87,9 % es mejor introducir un vehículo adicional.

A su vez, en fucsia se representan los costes de utilización de dos transportes, en función del tiempo que cada uno de ellos mantiene ocupada a la cosechadora, es decir, cuando un transporte (de los 2 empleados en el ciclo) no es capaz de mantener ocupada a la cosechadora el 44,6 % del tiempo, valor del punto X2, empiezan a incrementarse los costes de la operación de ensilado de maíz, lo que indica que es deseable introducir un tercer vehículo de transporte.

La línea horizontal en el gráfico se merece una mención especial. Ello muestra la situación en la que la cosechadora está al 100% de su capacidad con vehículos de transporte en espera. Cuando el gráfico sale de la horizontal indica que comienza el tiempo de inactividad de la cosechadora (es aconsejable introducir un vehículo de transporte más).

Este tiempo de ocupación irá variando según el número de transportes utilizados:

Tabla 1. Variación de la ocupación de la cosechadora en función del número de transportes

Nº de transportes	Uh_b transporte ⁻¹	Uh_b total
1	0,880	0,880
2	0,446	0,892
3	0,301	0,903
4	0,228	0,912

(K=6,30)

El punto de corte dependerá de la relación de costes de utilización de la cosechadora y los transportes. Sí el valor de K es menor, el punto de corte (X) también se reduce, es decir, se reduce el porcentaje de ocupación de la cosechadora a partir del cual es más rentable añadir otro transporte. Esto significa que cuanto más pequeña sea la relación entre el coste horario de la cosechadora y el transporte mayor será el tiempo permitido de espera de la cosechadora por el transporte sin que sea económicamente más rentable aumentar en una unidad más el número de transportes, tal y como se aprecia en la figura 15.

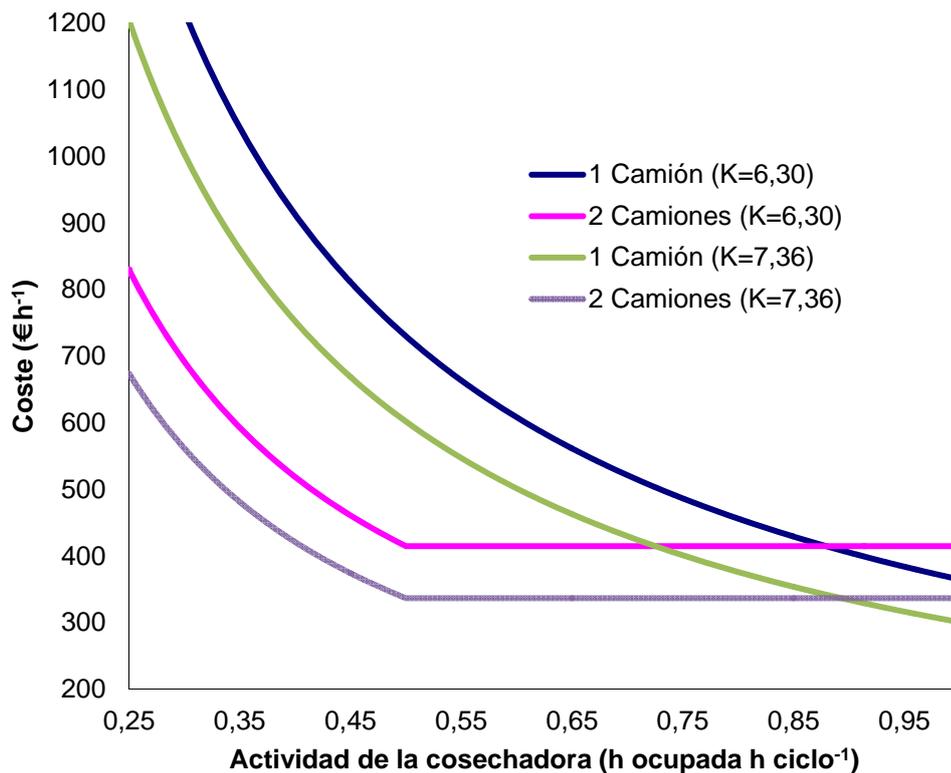


Figura 15. Evolución de los costes de la cosecha en función del número de camiones y del ratio entre el coste horario del camión y el coste horario de la cosechadora (K)

Dado que la cosechadora es el elemento que supone un mayor coste en todo el proceso de la cosecha, con esto pretendemos determinar el tiempo máximo que podemos tener parada la cosechadora sin que se incrementen los costes totales de la recolección de maíz forrajero. Estaremos tratando de optimizar los elementos de los que disponemos para realizar la operación de la manera más rápida y económica posible.

4.2.1.5 Determinación de los parámetros necesarios para la obtención del número de camiones necesarios para la cosecha de maíz forrajero.

Del análisis realizado por Amiama, Bueno, Álvarez y Pereira (2008) en 163 parcelas, cosechadas durante la campaña de maíz del año 2006, en la que se estudiaron varias variables: rendimiento del cultivo (Y), superficie de la finca (A), pendientes longitudinal y transversal e índice de forma (IF), se obtuvo la siguiente función de regresión entre estas variables y la capacidad efectiva de trabajo (FC) de la cosechadora:

$$FC = 1,74 - 0,024 \times Y + 0,082 \times A - 0,009 \times LS + 0,242 \times IF \quad [4.14]$$

Siendo:

FC: Capacidad efectiva de trabajo (ha h^{-1})

Y: Producción esperada (t ha^{-1}), este dato será función del crecimiento del cultivo, densidad, etc.

A: Superficie de la parcela (ha)

LS: Pendiente longitudinal (%), medida directamente en campo con un clisímetro

IF: Índice de forma determinado empleando una aplicación de software sobre MapObjects[®] 2.3 (Environmental Systems Research Institute, Inc.) que permite determinar el cuadrilátero de lados ortogonales que mejor circunscriben la finca analizada. Se ha considerado como más eficiente el cuadrilátero que presentaba un mayor ratio entre la superficie de la parcela que contiene y la superficie total del cuadrilátero (Amiama *et al.*, 2008b).

El tiempo que se mantiene ocupada la cosechadora con una sola unidad de transporte, se define con la expresión:

$$U_{h_b} = V_t / C_{m,h} / CT_t \quad [4.15]$$

Siendo:

U_{h_b} : Tiempo que una unidad de transporte mantiene ocupada a la cosechadora (h ocupada transporte⁻¹)

V_t : Peso almacenado en cada unidad de transporte (t)

$C_{m,h}$: Capacidad de la cosechadora (t h^{-1}), obtenida a partir de la expresión:

$$C_{m,h} = Y \times FC \quad [4.16]$$

CT_t : Ciclo de un transporte (h ciclo^{-1}), tiempo que emplea un transporte en realizar todo su ciclo

A partir de la expresión [4.14] y de la expresión [4.15] se ha estimado el número de transportes necesarios para llevar a cabo eficazmente la cosecha de ensilado de maíz.

En función del valor obtenido para U_h sabremos el número de transportes que tenemos que emplear para que la cosecha de ensilado sea lo más económica posible. Para determinar el número de transportes necesarios usaremos los datos de utilización de la cosechadora, obtenidos anteriormente, [4.13], implementando una hoja contable en la que, a partir de los datos de la finca y la velocidad de transporte, se obtiene el número de camiones necesarios, agilizando así la obtención de los resultados.

4.2.2 Diseño experimental

La restricción que se ha considerado a la hora de seleccionar las parcelas ha sido que el número de ciclos en cada una de ellas no debía ser inferior a cinco, con el objetivo de rechazar los datos obtenidos en el primer y último ciclo. Para justificar esta restricción es necesario destacar que todas las parcelas de un socio se cosechan consecutivamente. Por lo tanto, hay veces que la cosechadora comienza a cosechar la parcela sin tener la tolva vacía, ya que procede de otra parcela del mismo socio. Consecuentemente, puede suceder que la cosechadora finalice el último ciclo antes de llenar totalmente la tolva, continuando su llenado en la siguiente parcela, en caso de que esta pertenezca al mismo socio.

En la realización del análisis estadístico se ha repetido el valor obtenido mediante el método de Buckmaster tantas veces como ciclos del sistema se completaron en cada una de las fincas analizadas, de modo que el único valor obtenido mediante el método de Buckmaster para cada finca ha sido contrastado con el obtenido para cada uno de los ciclos individuales de la correspondiente finca.

Para el posterior análisis económico, cuantificación de los tiempos de espera de las cosechadoras y análisis más exhaustivo de los costes de la recolección de maíz forrajero, se han analizado todas aquellas fincas cosechadas por dos cosechadoras, que tenían instalado el referido sistema de localización vehicular y telemetría, durante la campaña 2008 de ensilado de maíz forrajero. De la primera cosechadora, identificada con el nº 6, se han analizado un total de 12 jornadas de trabajo, registrándose los eventos correspondientes a la cosecha de maíz forrajero de 63 parcelas, mientras que en la otra cosechadora, la identificada con el nº7, contamos con los eventos de 30 jornadas de trabajo en las que se han cosechado un total de 144 fincas. Se han obtenido datos de un total de 207 parcelas ubicadas en los ayuntamientos lucenses de Ribadeo, Barreiros, Trabada, Xermade y Meira.

4.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE DISTINTAS COSECHADORAS AUTOPROPULSADAS EN LA RECOLECCIÓN DE MAÍZ FORRAJERO

4.3.1 Metodología

4.3.1.1 Descripción del ciclo de cosecha

El ciclo de cosecha de la máquina Claas Jaguar 950, sin tolva incorporada, es igual, salvo alguna modificación, al ciclo de la cosechadora New Holland FX58 tal y como se detalla en el epígrafe 4.1.4.

En las figuras 16 y 17, mostradas a continuación, se resume de forma gráfica el ciclo de las dos cosechadoras.



Figura 16. Ciclo cosechadora con tolva



Figura 17. Ciclo cosechadora sin tolva

4.3.1.2 Variables de estudio

Para poder realizar la comparación entre ambas cosechadoras necesitamos saber el rendimiento de cultivo para ambas máquinas. En el caso de la cosechadora con tolva incorporada, la cosechadora de la Cooperativa Os Irmandiños, sabemos ese rendimiento gracias a que ésta posee el sistema de localización vehicular y telemetría antes citado. En el caso de la cosechadora sin tolva, además de monitorizar la cosechadora con un receptor GPS Datalogger, se ha implantado este sistema en cada uno de los transportes que la han acompañado. De este modo hemos conocido el tiempo que cada transporte ha estado en la finca con la cosechadora, contabilizando las veces que cada transporte abandonaba la finca para dirigirse al silo y el volumen de maíz pesado a la entrada del CAVI y así hemos obtenido el rendimiento del cultivo en cada una de las fincas estudiadas.

Con los datos obtenidos de la instalación del sistema de localización vehicular y telemetría en la cosechadora con tolva, y el receptor GPS Datalogger en la cosechadora sin tolva y en los vehículos que la acompañan, se han realizado las siguientes determinaciones:

- Comparación de las capacidades efectivas de trabajo, agrupando el conjunto de datos o discriminándolos según rangos de superficie.
- Análisis de la distancia recorrida por cada máquina.
- Determinación de la velocidad media que alcanzan ambas máquinas en los giros, en las rectas, así como la velocidad media total.
- Comparación entre las trayectorias seguidas por las máquinas y, en caso de observar diferencias, análisis de la incidencia en la capacidad efectiva de trabajo.
- Evaluación económica de ambas cosechadoras incluyendo los transportes que estas necesitan para completar un ciclo de cosecha.

Para la determinación de algunos aspectos como la velocidad, distancia recorrida y la trayectoria de las cosechadoras, se ha hecho uso de la aplicación informática para el análisis de maniobras descrita en el epígrafe 4.1.2.2.3.

Los resultados obtenidos del análisis del funcionamiento de ambas cosechadoras han sido agrupados en función de la superficie de las parcelas, lo que nos ha permitido comprobar el funcionamiento de las mismas para unos rangos de superficie dados.

Para el análisis de costes se han considerado los costes habituales de contratación de las operaciones en la zona de estudio, sin olvidarnos de los transportes que necesariamente deben de trabajar con cada una de las máquinas para llevar a cabo un ciclo completo de cosecha.

Con objeto de poder extraer conclusiones de los resultados obtenidos se han realizado análisis de varianza (ANOVA), utilizando el paquete estadístico SPSS. En determinados contrastes ha sido necesario realizar un análisis de covarianza (ANCOVA), considerando el rendimiento del cultivo como covariable. Adicionalmente se han realizado modelos de regresión lineal, determinando el ajuste de los valores obtenidos a una recta de regresión.

4.3.2 Diseño experimental

Todas las parcelas cosechadas en la campaña de recolección del año 2012 han sido representadas sobre la base cartográfica y se seleccionaron 82 parcelas, con geometría similar y fundamentalmente rectangular, con el objeto de reducir el efecto del índice de forma y la pendiente en el rendimiento de las cosechadoras.

Además, se ha comprobado que las cosechadoras estuvieran equipadas con el mismo cabezal. En este caso, tanto la cosechadora con tolva incorporada como la cosechadora sin tolva realizaron los trabajos de recolección con un cabezal de 8 hileras, garantizando así que la anchura de trabajo de las dos máquinas sea la misma y que no interfiera en el estudio.

Del mismo modo, las fincas estudiadas han sido cosechadas durante la misma campaña de recolección, en el año 2012, y están localizadas en un entorno geográfico próximo (en los municipios gallegos de Ribadeo, Barreiros y Trabada), con el objeto de considerar la variabilidad derivada de los rendimientos diferenciales del cultivo, etc. No obstante en aquellos análisis en los que se ha estimado que el rendimiento del cultivo pudiera tener efecto sobre los resultados obtenidos, este factor ha sido considerado como una covariable.

Una forma de comparar los kilómetros recorridos por las dos cosechadoras a la hora de cosechar fincas con la misma superficie ha sido estudiando el solape. Para ello, estimamos el solape como el porcentaje de la diferencia entre los metros recorridos por la cosechadora y los mínimos necesarios para trabajar la parcela, dividido por el recorrido mínimo. Para calcular el recorrido mínimo necesario para trabajar la parcela, se han simplificado los cálculos, dividiendo la superficie de la parcela entre la anchura de trabajo de la cosechadora, que en este caso ha sido de 6 metros para las dos máquinas.

Para la evaluación económica, además de considerar el coste horario de cada cosechadora, ha sido necesario contabilizar el coste horario de los medios de transporte que como mínimo son necesarios para llevar a cabo un ciclo completo de cosecha. La cosechadora con tolva únicamente necesita un camión que se encargue del transporte del maíz picado al silo, mientras que la cosechadora sin tolva necesita, además, otro camión que trabaje paralelamente a ella para poder descargar el maíz recién cosechado.

El coste horario considerado para la cosechadora con tolva ha sido de 315 €h^{-1} , para la cosechadora sin tolva se ha estimado un coste de 250 €h^{-1} , para el camión y/o tractor se ha considerado un coste de 50 €h^{-1} y para las bañeras 53 €h^{-1} . La diferencia de costes entre las dos máquinas viene dada por el coste de mantenimiento y coste de combustible de cada máquina.

4.4 ESTUDIO DEL PROCESO DE DESCARGA EN EL SILO

4.4.1 Metodología

Para la determinación de la geometría del silo en cada intervalo temporal, aprovechando la disposición de lonas plásticas en ambas paredes del silo para prevenir ataques al hormigón, se han realizado marcas verticalmente en las paredes del silo, tal y como se muestra en la figura 18, separadas medio metro hasta una altura de 5 m. Las escalas se han repetido horizontalmente cada 10 m. Esta metodología se ha utilizado tomando como referencia los ensayos realizados por Muck, Holmes y Savoie (2004). Con el objeto de evitar errores en las lecturas que definen el avance en longitud y altura del silo, cada escala longitudinal se ha identificado con una letra a modo de coordenada.



Figura 18. Escalas en las paredes del silo

Con una periodicidad de media hora, se ha comprobado la evolución del ritmo de compactado del forraje, situándose a la entrada del silo se han tomado datos de la altura que alcanza el forraje en cada punto marcado e identificado, longitud de la rampa teniendo en cuenta la posición sobre la coordenada en su inicio y su punto final, número de vehículos descargando el forraje, número de vehículos en cola para descarga, número de vehículos compactando el material y número de pilas de material sin extender. Los datos recogidos en

base al tiempo de descarga de los distintos tipos de vehículos, se han analizado en gráficas que nos han permitido estudiar la diferencia entre los silos analizados.

Las alturas en cada punto a lo largo del silo, han permitido reflejar la geometría de la rampa de descarga del forraje y la plataforma de compactación. La evolución de la rampa de descarga se refleja con la identificación del punto de inicio y fin de la misma, identificando la altura en cada punto de medida hasta la plataforma de extendido y compactado, en la que se mantiene el nivel de forma progresiva hasta alcanzar la altura máxima del silo.

De forma ininterrumpida durante el llenado se han registrado los vehículos que accedieron al CAVI para descargar el forraje (que previamente han sido pesados en el acceso, lo que nos ha permitido determinar la cantidad de forraje que entra en el silo) y el número de vehículos en cola para descarga. Con los datos recogidos en el albarán de control de entrada se ha podido ver el ritmo de entrada de forraje en CAVI los distintos días por rangos de tiempo.

Con todos los datos recopilados se podrá asociar el estado de llenado del silo con la existencia de atascos en la descarga de los vehículos, considerando la cadencia de llegada de los mismos.

4.4.2 Diseño experimental

La toma de datos para el estudio del proceso de descarga en el silo se ha hecho durante la campaña de ensilado de maíz del año 2012. Para llenar los silos han intervenido un número variable de camiones (condicionado por el ritmo de recolección). Se ha monitorizado el proceso de llenado de dos de los silos horizontales, identificados con los números 11 y 12, registrando el número de vehículos implicados en el extendido y compactado, la cantidad de forraje compactada, la geometría del silo y los atascos que se han producido en la descarga de los vehículos de transporte.

Para el extendido y compactación del forraje, se ha empleado dos vehículos en el silo 11 y tres en el silo 12. El llenado de los silos se ha llevado a cabo los días 19, 20 y 21 de septiembre, en el caso del silo 11, y los días 6, 7 y 8 de octubre en el silo 12. El silo 11 tiene una anchura de 9 metros y el silo 12 tiene una anchura de 18 metros. La altura de las paredes laterales y longitud son coincidentes en los dos silos, 5 m y 65 m respectivamente. Al

considerar dos silos de distinta anchura se podrán extraer conclusiones acerca de la incidencia de este parámetro en el proceso de descarga y posterior extendido y compactación del ensilado.



4.5 GESTIÓN DE RUTAS

Un aspecto importante relacionado con la actividad de las cosechadoras es la organización para la recolección de las diferentes parcelas. El orden en que se han de recolectar las parcelas de los socios se puede resolver mediante un problema de enrutamiento de vehículos (VRP), pero hay tres cuestiones principales que hacen que la configuración final difiera de un problema de enrutamiento general.

En primer lugar, hay algunos espacios de tiempo a considerar asociados con la fecha de inicio de cada socio. Estos espacios de tiempo, se definen por las solicitudes y un nivel de tolerancia dado para las fechas de cosecha solicitadas.

En segundo lugar, todas las parcelas de un socio determinado deben cosecharse antes de comenzar con las parcelas del siguiente socio. Esto se justifica por la necesidad de cerrar el silo de forma rápida, dentro de dos o, a lo sumo, tres días con el fin de garantizar las condiciones de mantenimiento.

Finalmente, cada campo tiene un tiempo de cosecha que también influye en la distribución de la programación.

Para resolver este problema de optimización combinatoria se ha desarrollado un heurístico genético, ya que ha demostrado ser una herramienta eficaz (Osman y Laporte, 1996).

4.5.1 Mecánica de los algoritmos genéticos

Un algoritmo genético es una clase particular de algoritmo evolutivo que tiene como objetivo encontrar la mejor solución posible en un dominio de la solución, mediante la selección de un simple conjunto de soluciones. Estos algoritmos hacen evolucionar una población de individuos sometiéndoles a acciones aleatorias similares a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), así como también a una selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se deciden cuáles son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuáles son los menos aptos, que son descartados.

Los algoritmos genéticos establecen una analogía entre el conjunto de soluciones de un problema, llamado fenotipo, y el conjunto de individuos de una población natural, codificando la información de cada solución en una cadena, generalmente binaria, llamada cromosoma.

Los símbolos que forman la cadena se llaman genes. Cuando la representación de los cromosomas se hace con cadenas de dígitos binarios se conoce con el nombre de fenotipo. Los cromosomas evolucionan a través de iteraciones, llamadas generaciones. En cada generación, los cromosomas son evaluados usando alguna medida de aptitud. Las siguientes generaciones, es decir, los nuevos cromosomas, llamada descendencia, se forman utilizando dos operadores genéticos: de sobrecruzamiento y de mutación.

Por ello se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si la función a optimizar tiene muchos máximos o mínimos locales serán necesarias muchas más iteraciones del algoritmo para encontrar el máximo o mínimo global.

- Si la función a optimizar contiene varios puntos muy próximos al valor óptimo, solamente se puede asegurar que se encontrará uno de ellos, lo que no quiere decir que ese sea el óptimo.

En general, la mecánica que sigue un algoritmo genético tiene los siguientes pasos:

- Inicio: se genera aleatoriamente la población inicial, que está formada por un conjunto de cromosomas que representan las posibles soluciones del problema. En el caso de que no se haga aleatoriamente, es importante garantizar que dentro de la población inicial, exista una diversidad estructural de soluciones para tener una representación de la mayor parte de la población posible o por lo menos evitar una convergencia prematura.

- Evaluación: a cada uno de los cromosomas de la población se le aplicará la función de aptitud para saber lo óptima que es la solución que se está codificando.

- Condición de finalización: el algoritmo genético deberá pararse cuando alcance la solución óptima, pero esta generalmente es desconocida, por lo que se deben utilizar otros criterios de detención. Normalmente se usa como criterio: correr el algoritmo genético un número máximo de iteraciones (generaciones). Mientras no se cumpla esta condición de finalización el algoritmo genético realiza las siguientes operaciones:

- Selección: después de saber la aptitud de cada cromosoma se eligen los cromosomas que serán cruzados en la siguiente generación. Los cromosomas con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de ser escogidos.

- Sobrecruzamiento: el cruzamiento es el principal operador genético, representa la reproducción sexual, opera al mismo tiempo sobre los dos cromosomas para generar dos descendientes donde se combinan las características de los dos cromosomas padre.

- Mutación: modifica al azar parte del cromosoma de los individuos y permite alcanzar zonas del espacio de busca que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual.

- Reemplazo: una vez aplicados los operadores genéticos, se escogen los mejores individuos para confeccionar la población de la siguiente generación.

4.5.2 Metodología empleada para la gestión de rutas

4.5.2.1 Descripción de la aplicación

Fruto de la colaboración entre el grupo de mecanización agraria, del Departamento de Ingeniería Agroforestal y el Grupo de Investigación Operativa y Teoría de Juegos del Departamento de Estadística e Investigación Operativa, ambos departamentos pertenecientes a la Universidad de Santiago de Compostela se ha creado una aplicación para la Gestión de Rutas. Esta aplicación está basada en algoritmos heurísticos, lo que significa que la solución que da no es la óptima, aunque puede ser muy similar.

La aplicación se presenta con un sencillo interface programado en lenguaje Java, con pocos menús que hace que sea fácil de manejar y muy intuitiva. Está compuesta por una base de datos (MS Access), donde se almacenan los datos de entrada y resultados de salida; un módulo de red para crear la red de carreteras que considera la velocidad media en cada arco; un módulo de ruta para determinar el orden en el que se cosechan las parcelas y un módulo de flota para calcular el número de camiones que participan.

También se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica (GIS) para determinar los parámetros de entrada y visualizar los resultados. Todos estos módulos se han asociado en cascada y cada uno de ellos se describirá en detalle en los siguientes apartados.

Base de datos

La base de datos almacena la información inicial en varias tablas:

- Tabla "propietarios". Almacena el propietario (agricultor) de cada parcela.

- Tabla "solicitudes". Almacena la fecha de recolección de partida solicitada por cada socio.

- Tabla "tiempos de cosecha". Almacena el tiempo de cosecha para cada parcela (incluyendo todos los tiempos involucrados, a excepción de los tiempos de espera por transporte).

- Tabla "Descargas". Almacena el número previsto de descargas para cada parcela (que coincide con el número de veces que un camión debe descargar en el silo).

Módulo de Red

A partir de la información obtenida de la red de carreteras, previamente elaborada a partir de los datos capturados por el sistema de localización vehicular y telemetría, ArcGIS Network Analyst proporciona los siguientes datos:

- El tiempo empleado por la cosechadora para ir de una parcela (definida por su centroide) a otra.

- El tiempo empleado por un camión en ir de una parcela concreta al silo del socio y/o CAVI.

Módulo de Ruta

En este módulo se registra el orden de cosechado de las parcelas, obtenido para lograr que la cosechadora recorra la mínima distancia, de acuerdo con las restricciones ya comentadas. Se trata de un problema de optimización combinatoria NP-hard donde los algoritmos genéticos han demostrado ser herramientas eficaces para su resolución (Holland, 1992).

A continuación, se describen los elementos del algoritmo que han sido diseñados para resolver este problema:

- Generación de la población inicial (conjunto de posibles soluciones al problema). Se ha empezado ordenando los socios en función de la fecha de solicitud de cosecha, teniendo en cuenta el nivel de tolerancia (en caso de empate, se han ordenado de forma arbitraria). Para

decidir el orden de cosecha de las parcelas de cada socio, se ha seleccionado una parcela al azar y el resto se han añadido a la ruta en base a criterios de mínima distancia respecto de la última parcela ordenada (siempre se ha seleccionado la parcela más próxima).

- Selección. Se ha utilizado el método de selección por torneo. Las soluciones individuales han sido evaluadas con la siguiente función objetiva:

$$F_{si} = T_{a_{si}} + \sum w_{21} T_{si}(l) \quad [4.17]$$

Dónde:

$T_{a_{si}}$ es el tiempo total que necesita la cosechadora para completar la solución

$T_{si}(l)$ es el grado de cumplimiento de la fecha de solicitud de cosecha

w_{21} es un peso arbitrario.

- Reproducción. Una vez seleccionados los individuos, éstos son recombinados para producir la descendencia que se insertará en la siguiente generación. Para aplicar el cruce, el orden ha sido preservado hasta un cierto punto (elegido al azar) de uno de los padres. Desde el punto de cruce en adelante, la planificación se ha completado según el orden de cosecha de la segunda solución seleccionada. Teniendo en cuenta que, en este caso, las parcelas han sido reorganizadas siempre según el criterio de mínima distancia. Además, algunos de los descendientes obtenidos por cruzamiento se han mutado con una cierta probabilidad: se han seleccionado dos parcelas al azar, si pertenecían al mismo propietario, a continuación, intercambiaban sus posiciones en la ruta, si pertenecían a distinto propietario se intercambiaba el orden de los propietarios.

Se llega a la solución final cuando se realiza un número fijo de iteraciones.

Se han realizado varias pruebas para determinar los valores óptimos de iteraciones, población inicial y % de mutación.

Finalmente Network Analyst proporciona una visualización de la ruta a realizar por la cosechadora, que muestra la secuencia de parcelas a cosechar en función de la distancia mínima. En la figura 19 se muestra un ejemplo de una ruta generada a partir de los datos proporcionados por la Aplicación de Gestión de Rutas.

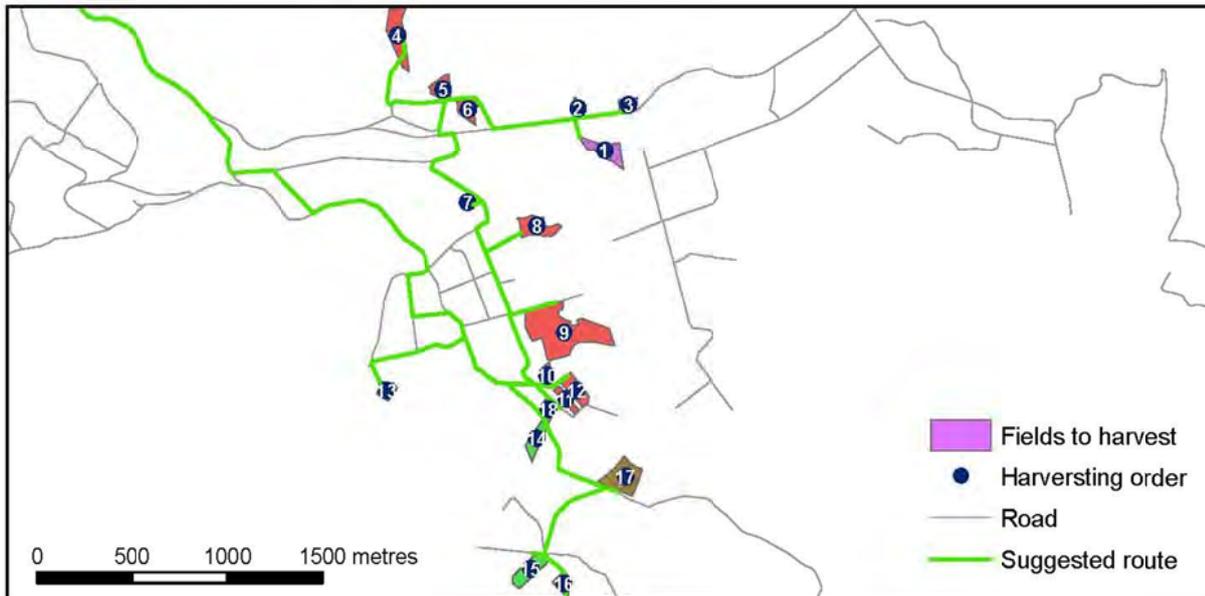


Figura 19. Ruta proporcionada por Aplicación Gestión de Rutas (diferentes colores en las parcelas a cosechar indican que son de distinto socio).

Módulo de Flota

Como ya se ha mencionado anteriormente, la cosechadora es el componente que más afecta al rendimiento de ciclo de cosecha, debido a su alto coste horario. La capacidad de carga de los camiones es equivalente a, o ligeramente mayor que, la capacidad de almacenamiento de la tolva de la cosechadora. El objetivo de este módulo es determinar el número óptimo de camiones que proporcione los menores costes de transporte y cosecha, introduciendo en la aplicación de gestión de rutas la expresión que relaciona la utilización de la cosechadora (U_{h_b}) con los costes totales más bajos (los costes de cosecha, incluidos los costes de transporte). Los costes están determinados por la expresión [4.12].

El objetivo será calcular el valor de U_{h_b} que hace más rentable pasar de un camión a dos camiones, de dos a tres camiones, etc ... y que viene dado por la expresión [4.13]

La ecuación anterior nos permite calcular la duración del ciclo del sistema (CT) para una utilización específica de la cosechadora (U_{h_b}). Igualando CT / N_t a la duración del tiempo de ciclo del medio de transporte (descartando el tiempo de inactividad (CT_t)), se obtiene el tiempo que necesita cada medio de transporte para realizar su ciclo.

Como resultado, el tiempo de viaje para el medio de transporte (T_t) se puede determinar a partir de los tiempos de ciclo restantes que fueron estudiados en medios de transporte similares y que pueden considerarse constantes para cada finca, sin tener en cuenta la distancia desde el silo. Como ya se ha demostrado, en las condiciones actuales, el ciclo de la pala extendedora no afecta a la duración del ciclo de la cosecha de maíz.

$$T_t = (CT / N_t) - T_{tu,a} - T_{ht,t} - T_{tu,u} \quad [4.20]$$

Por lo tanto, una vez se conoce el tiempo de transporte (T_t), si este excede el tiempo obtenido con el Networkmodule, para la ida y vuelta, hay que añadir un nuevo camión.

La aplicación de Gestión de Rutas tiene en realidad cuatro versiones, las cuales presentan las siguientes diferencias:

NT.- Algoritmo original

PG.- Algoritmo con población inicial mejorada

CG.- Algoritmo con cruzamientos guiados

PGC.- Algoritmo con población inicial mejorada y cruzamientos guiados

Por población mejorada se entiende que en lugar de crear la población con movimientos aleatorios y dejar el resultado así, se genera un movimiento y se recolocan las parcelas dentro de cada socio atendiendo a criterios de mínima distancia. Una vez recolocadas las parcelas de un socio, las parcelas del siguiente se reorganizan atendiendo también a criterios de mínima distancia

Para el cruzamiento guiado se sigue esta misma estrategia una vez efectuado el movimiento de cruce del genético. Es decir, en lugar de dejar el resultado del cruce según salga, sea lo que sea, se reorganizan todas las parcelas por el mismo criterio de mínima distancia.

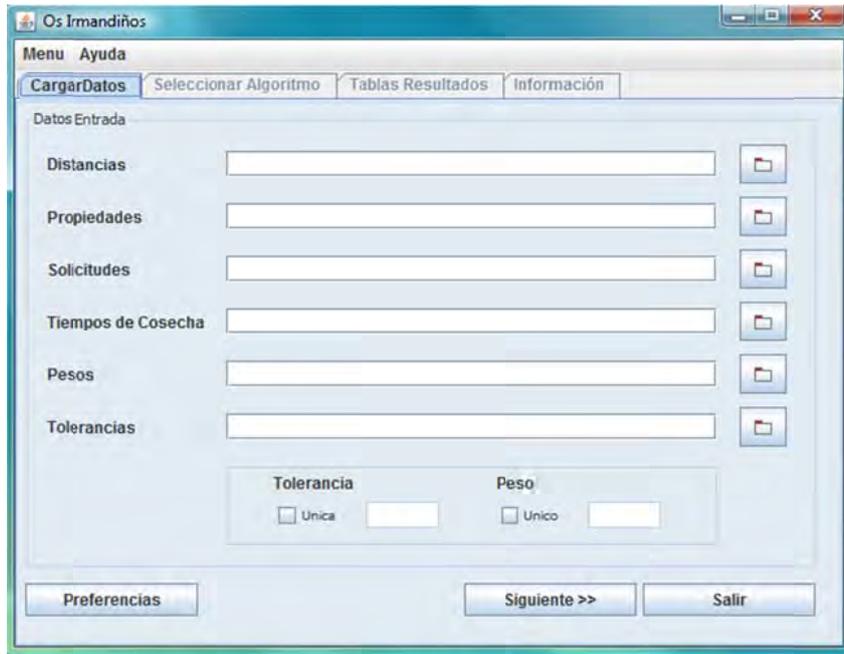


Figura 20. Interface de la aplicación de Gestión de Rutas

Cada una de las versiones presenta la misma interface (figura 20). Como operación previa se deben fijar los horarios de trabajo de la máquina (figura 21), así como los intervalos y las unidades de tiempo.

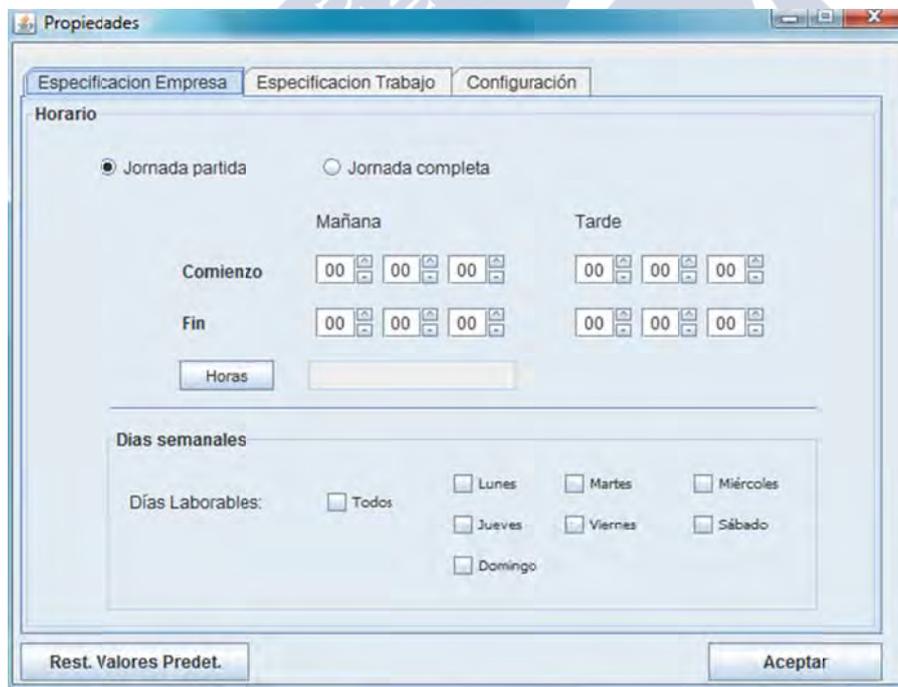


Figura 21. Pantalla para introducir los datos de la jornada de trabajo

El siguiente paso será cargar en la aplicación los archivos tipo .txt previamente generados con la aplicación descrita en el epígrafe 4.1.2.2.4. Al mismo tiempo, será necesario definir la tolerancia y el peso de tolerancia con el que queremos trabajar.

La tolerancia es la variabilidad en días que se le asigna al día de petición del socio, por ejemplo, si adjudicamos una tolerancia de 0 días, quiere decir que la cosecha se tendrá que hacer el día que ha solicitado el socio. Si, de lo contrario, ponemos una tolerancia de 1 día, quiere decir que las fincas de un socio se pueden cosechar un día antes de lo solicitado, el mismo día, o bien, un día más tarde de lo solicitado.

El peso de la tolerancia indica la importancia que se le da al cumplimiento de la fecha solicitada por el socio. De este modo, si indicamos valores altos el algoritmo priorizará el cumplimiento de la tolerancia frente a minimizar la distancia. En cambio si se le adjudica un peso bajo a la tolerancia, tendrá más importancia minimizar distancias que el cumplimiento de la tolerancia.

Para trabajar con el algoritmo genético será necesario indicar los datos de iteraciones, población inicial y mutación. Cuanto mayor sea el número de iteraciones mayor será el tiempo de cálculo, en cambio, valores bajos puede ser que no proporcionen soluciones óptimas.

La población inicial representa, como ya se ha explicado anteriormente, el conjunto de posibles soluciones del problema, acostumbra estimarse como múltiplo de 4 tomando valores por encima de 30.

El parámetro mutación incrementa la variabilidad de las soluciones iniciales permitiendo explorar nuevas zonas del espacio de soluciones. Adopta valores entre 0 y 1, siendo preferibles, a priori, los valores más próximos a 0.

Una vez realizado el cálculo el programa proporciona una salida, como la mostrada en la figura 22, en la que se puede observar la secuencia de parcelas supuestamente más óptima, día y hora de inicio de cada parcela, así como la distancia necesaria para realizar la ruta y otros datos como el tiempo de cálculo o información sobre el cumplimiento de la tolerancia.

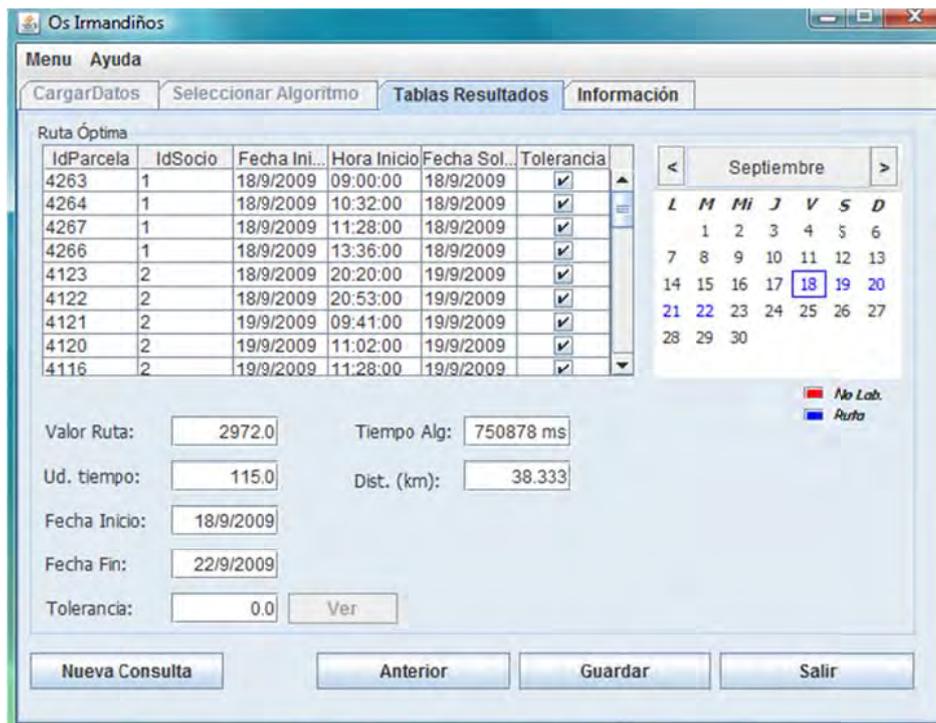


Figura 22. Pantalla "Tabla Resultados"

4.5.2.2 Datos necesarios para utilizar la aplicación de gestión de rutas

Para poder trabajar con la aplicación que contiene el algoritmo genético es necesario disponer de información en formato texto (archivos "txt"), por ser el formato con el que trabaja la aplicación. A continuación se relacionan los datos que deben contener los cuatro archivos de entrada que solicita la aplicación:

- Distancias: contiene las distancias de cada parcela a todas las demás.
- Solicitudes: en este archivo hay que incluir la fecha que ha solicitado cada socio para cosechar sus fincas.
- Propiedades: matriz en la que se asigna a cada socio sus respectivas fincas.
- Tiempos de cosecha: archivo en el que se incluye el tiempo en minutos que necesita la máquina para cosechar cada una de las fincas.

El tiempo que pasa trabajando cada cosechadora en cada parcela es necesario para diferenciar los tiempos de cosecha propiamente dichos, de los tiempos necesarios para desplazarse entre fincas y poder así determinar el número de fincas que la máquina es capaz

de cosechar en cada jornada. De este modo se puede hacer una programación aproximada de la hora y el día en la que se realizará la cosecha de cada finca.

Para conseguir toda esta información se ha partido de la información facilitada por la Cooperativa, correspondiente a la campaña del año 2009 y anteriores.

4.5.2.3 Análisis y depuración de la aplicación

Una vez procesada la información proporcionada por la cooperativa, se ha estado en condiciones de realizar pruebas con datos reales para analizar el comportamiento del programa.

El primer paso ha sido determinar los valores óptimos de los parámetros necesarios para el funcionamiento de la aplicación: iteraciones, población inicial y mutación. En un principio para el parámetro de tolerancia se ha usado el valor de 0 días, para forzar al algoritmo a que cumpla la fecha solicitada por el socio. Del mismo modo, al parámetro de peso de la tolerancia, se le ha dado un valor elevado para que el algoritmo priorice el cumplimiento de las solicitudes sobre la distancia recorrida. Para estudiar los valores óptimos de estos parámetros se han utilizado los datos de la cosecha de una semana seleccionada al azar.

Se han confeccionado rutas ficticias, formadas por secuencias lineales de parcelas en las que se aprecia a simple vista cual es la ruta más corta, y así poder identificar si el algoritmo comete algún fallo, como, por ejemplo, ir a una finca del final sin antes pasar por las fincas previas, etc. Lo siguiente ha sido comprobar el tiempo que indica la aplicación que le lleva realizar ese suceso.

Una vez se ha comprobado que la aplicación no comete ningún error ya estaremos en condiciones de hacer las pruebas semana a semana para las dos cosechadoras seleccionadas para este estudio, utilizando los valores óptimos de los parámetros del algoritmo determinados anteriormente.

Después de evaluar el funcionamiento de la aplicación por semanas, se ha procedido a determinar su idoneidad cuando se hace una programación bisemanal y trisemanal. Para ello ha sido necesario fusionar la aplicación de Accés de la primera semana con los datos de la segunda semana, generando unos nuevos archivos txt para el período bisemanal y haciendo una serie de correcciones:

- El socio 1 de la segunda semana tendrá el número siguiente del que le corresponde al último socio de la primera semana, ya que los socios deberán estar identificados unívocamente.

- Si existiese una serie de días sin trabajo entre una semana y la siguiente, las fechas de las solicitudes de los socios de la segunda semana se trasladarán a la primera semana, de tal forma que no quede ningún hueco entre las dos semanas sin asignación de fincas para cosechar.

Una vez que tenemos el archivo de Accés para un período bisemanal, será suficiente con hacer una copia y agregar la tercera semana para conseguir un período trisemanal, realizando las mismas correcciones que se han indicado anteriormente.

Como consecuencia de todas las pruebas realizadas se han obtenido distintos resultados y se han detectado fallos en el funcionamiento interno de la aplicación. Todos los problemas que han surgido han sido comunicados a los creadores de la aplicación para su corrección. Al mismo tiempo que se han realizado las pruebas, han surgido nuevas ideas fruto de las cuales se han propuesto nuevos cambios en la aplicación final con el fin de obtener mejores resultados. Este proceso de retroalimentación entre los departamentos de Ingeniería Agroforestal e Investigación Operativa se ha realizado repetidas veces hasta conseguir los resultados que han satisfecho las expectativas planteadas.

4.5.2.4 Comparación y evaluación económica de los resultados

Una vez validado el funcionamiento del programa de forma satisfactoria, se ha utilizado la última versión para obtener una programación de las rutas hecha de forma semanal. Sobre esta programación inicial se han considerado distintos grados de tolerancia con respecto a la fecha de petición de los socios, ordenándose y comparándose todos los resultados con los obtenidos en la campaña de recolección de maíz del año 2010.

La comparación se ha centrado, principalmente, en la distancia recorrida en los desplazamientos entre fincas, observando si se conseguía ahorrar con el uso de la aplicación.

También se han representado, sobre la base cartográfica, las trayectorias seguidas por la cosechadora en la campaña 2010, junto con las rutas alternativas que ha propuesto la aplicación. De este modo se ha podido observar, de forma gráfica, la diferencia entre las dos

rutas. Esta comparación sobre la cartografía se ha hecho de forma individual para cada planificación temporal y para cada nivel de tolerancia permitido.

Finalmente, se ha calculado la diferencia de km entre las dos rutas, la real y la propuesta por la aplicación. La distancia que se podría haber ahorrado en desplazamientos si la pasamos a horas de trabajo de la cosechadora, estimando una velocidad media de desplazamiento de 20 km por hora, nos permitirá calcular el tiempo de trabajo de la cosechadora que se ahorraría. Para poder estimar un ahorro en términos económicos se ha consultado con la Cooperativa el coste horario de trabajo de las cosechadoras.

Dado que la labor de planificación de las rutas supone un tiempo de trabajo considerable para los técnicos de la Cooperativa, también se ha evaluado el ahorro que supondría en horas de técnico usar la aplicación de Gestión de Rutas, y pasando las horas de técnico a unidades monetarias también se pueden sumar al ahorro en horas de trabajo de la cosechadora, resultando un ahorro que se medirá en euros por máquina y mes de trabajo.

4.5.3 Diseño experimental

Para elaborar la programación, los técnicos consideran las fechas solicitadas por los socios para la cosecha y asignan las cosechadoras de acuerdo con las peticiones realizadas. Primero establecen el orden en que se atenderá la petición de cada agricultor y luego la disposición de cada uno de los campos de ese agricultor, tratando de reducir al mínimo la distancia recorrida por la cosechadora. Por último, determinan el número de camiones que serán asignados para trabajar con cada una de las cosechadoras.

Para el desarrollo de la aplicación y desde el punto de vista teórico, hay tres cuestiones principales que distinguen este modelo del problema del viajante general (TSP). En primer lugar, existe una ventana de tiempo asociada con el tiempo de inicio de cada propietario. Esta ventana de tiempo se define por las peticiones de los socios y un nivel de tolerancia determinado en la fecha de partida. En segundo lugar, este problema está relacionado con el llamado TSP clúster porque todas las parcelas de un propietario tienen que ser cosechadas antes de comenzar las del próximo propietario (pero no necesariamente por la misma máquina). Esto se debe a que los silos en los que se almacena el maíz recién picado tienen que ser cerrados en un día o, a lo sumo, dos días con el fin de garantizar las condiciones de

mantenimiento. Por último, cada una de las parcelas tiene un tiempo de procesamiento que influye en los tiempos de programación.

Ha sido necesario traducir las relaciones que describen el modelo real a través de restricciones matemáticas. Las restricciones establecidas para el programa matemático se han agrupado en cinco grupos:

- A) Limitaciones que describen las rutas y horarios de la cosechadora
 - B) Limitaciones que describen las rutas y horarios de los medios de transporte
 - C) Limitaciones de la cosechadora con los medios de transporte
 - D) Restricciones que aseguren que las parcelas de cada propietario se procesan conjuntamente, antes de pasar a cosechar las del siguiente propietario
 - E) Restricciones para asegurar la fecha de petición de cosecha de cada propietario
-
- A) Limitaciones que describen las rutas y horarios de la cosechadora
 - No se puede cosechar la misma parcela dos veces.
 - Cada parcela será cosechada por una sola cosechadora. Esta cosechadora pasará a cosechar otra parcela una vez finalice la cosecha de la actual.
 - Cada cosechadora llega a la parcela final al mismo tiempo
 - Cada cosechadora termina la operación cuando se cosecha la totalidad de la parcela.
 - Todas las cosechadoras inician las operaciones en la parcela inicial ficticia y una vez que se inicia el proceso no regresan a la parcela inicial.
 - Cada cosechadora procesa de forma continua las diferentes parcelas a través del horizonte de planificación hasta que alcanza la parcela final.
 - Los traslados de la cosechadora entre las distintas parcelas consecutivas se suman al tiempo de trabajo.
 - B) Limitaciones que describen las rutas y horarios de los medios de transporte. Las restricciones de este grupo son similares a las descritas en el apartado anterior, pero referidas a los medios de transporte. En aras de ser exhaustivos se describen a continuación:
 - No se permite a ningún medio de transporte que regrese a una parcela anterior.
 - Cada medio de transporte regresa a otra parcela una vez finaliza la descarga en el silo.
 - A cada medio de transporte se le asigna una parcela independientemente de donde venga.
 - Cada medio de transporte llega a la parcela final al mismo tiempo.
 - Cada medio de transporte finaliza su trabajo una vez llega a la última parcela.

- Todos los medios de transporte inician las operaciones en la parcela inicial ficticia y una vez que se inicia el proceso no regresan a la parcela inicial.
 - Cada medio de transporte está continuamente realizando operaciones de carga y descarga entre las diferentes parcelas, hasta que llega a la parcela final.
 - Los desplazamientos de cada medio de transporte entre las parcelas consecutivas de la planificación se suman a los tiempos totales de la operación.
- C) Limitaciones de la cosechadora con los medios de transporte
- Las cosechadoras y medios de transporte deben estar sincronizados con respecto a los tiempos de proceso. Estas restricciones aseguran que si una cosechadora empieza a cosechar una determinada parcela entonces ningún camión puede empezar a cargar al mismo tiempo en esa parcela.
- D) Restricciones que aseguren que las parcelas de cada socio se procesan conjuntamente, antes de pasar a cosechar las del siguiente socio.
- Las restricciones mostradas han de asegurar que el número de movimientos entre las parcelas del mismo socio deben ser iguales al número de parcelas de ese socio menos uno.
- E) Restricciones para asegurar la fecha de petición de cosecha de cada socio.
- Para cada socio hay una ventana de tiempo que viene dada por la fecha de solicitud de cosecha así como un periodo de tolerancia común. Ninguna de las parcelas del socio será procesada antes de la fecha de solicitud.

Como se ha dicho anteriormente, las técnicas heurísticas se han utilizado para resolver problemas de VRP. Estos métodos no proporcionan la misma precisión que los modelos lineales. Sin embargo, estos modelos permiten investigar problemas mucho más complejos ya que requieren menos recursos computacionales que permiten obtener resultados óptimos. Una forma de comprobar la utilidad de la solución obtenida es hacer una comparación entre los resultados y la situación actual.

Para este trabajo se han utilizado los datos capturados en un total de 253 parcelas, durante tres semanas, en los meses de septiembre y octubre de 2010, por un sistema telemétrico (Amiama *et al.*, 2008) instalado en dos cosechadoras autopropulsadas de forraje (New

Holland FX58 equipada con tolva modelo 2025 MR). En la tabla 2 se muestra la distribución semanal de parcelas cosechadas.

Tabla 2. Número de socios y parcelas cosechadas por semana

		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Total
Cosechadora n°6	Socios	11	9	10	30
	Parcelas	48	35	42	125
Cosechadora n°7	Socios	5	7	9	21
	Parcelas	38	45	45	128

Se ha realizado una comparación entre la distancia recorrida por las cosechadoras en los periodos considerados y la ruta proporcionada por la herramienta de ayuda a la decisión. Para comprobar la utilidad de la solución obtenida, se ha conservado la fecha de petición de cada socio (aunque la primera parcela cosechada en la planificación no tiene por qué coincidir con la primera parcela cosechada en la realidad).

Teniendo en cuenta que estamos ante un problema de tipo NP-hard (no determinista en tiempo polinómico), se ha analizado el comportamiento considerando las parcelas cosechadas en una semana, en una quincena y las tres semanas conjuntamente, a fin de evaluar la influencia del número de parcelas en los resultados finales. Para el estudio de dos semanas se ha considerado la distancia entre la última parcela de la primera semana y la primera parcela de la siguiente.

Con el fin de estudiar la influencia de los niveles de tolerancia aplicados a las fechas de petición de los socios, se han examinado dos escenarios diferentes: considerando uno o dos días de tolerancia.

Para la determinación del número óptimo de camiones, que garantiza el coste mínimo de cosecha, se ha asumido que no había restricciones en el silo. El número de camiones

proporcionado por el sistema de ayuda a las decisiones se ha comparado con el número de camiones de transporte asignados a la cosechadora en condiciones reales.

Para estimar el ahorro económico que supone la utilización del sistema, se han considerado los precios medios de cosecha del área de estudio. Por ejemplo, el precio medio por hora de la cosechadora es de 315 €h^{-1} y el coste unitario del camión es de 50 €h^{-1} .





5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLOS DE LA COSECHA DE MAÍZ FORRAJERO

5.1.1 Determinación de la capacidad efectiva de la cosechadora

Acorde a la metodología expuesta en el epígrafe 4.2.1.3.1 se han obtenido los datos de capacidad efectiva de la cosechadora (C_m, h) que se reflejan en la tabla 3.

Tabla 3. Capacidad efectiva de la cosechadora para cada una de las fincas analizadas

Finca	Campaña	A (ha)	C_m, h ($t h^{-1}$)
266	2006	2,54	40,40
270	2006	2,33	39,23
363	2006	2,02	45,19
452	2006	2,63	36,43
506	2006	2,72	36,87
618	2006	2,32	42,15
2059	2006	1,70	57,74
8024	2006	4,62	58,29
160	2006	6,00	56,67
8016	2006	7,75	59,86
198	2007	2,25	65,92
201	2007	1,37	52,81
618	2007	2,32	59,30
668	2007	2,18	53,43
4027	2007	1,88	79,18
4040	2007	2,92	26,43
4067	2007	1,29	56,81
4174	2007	4,15	55,11
4186	2007	1,41	64,23

De todos los datos analizados se ha obtenido una capacidad efectiva promedio de $51,90 t h^{-1}$, con una desviación estándar de $12,68 t h^{-1}$.

5.1.2 Resultados del análisis de ciclos: método Buckmaster y análisis individual

Analizando los tiempos de ciclo de la cosechadora (CTh) obtenidos por el método de Buckmaster y los resultados medios obtenidos por finca mediante el análisis individual de cada uno de los ciclos, se observa que los valores obtenidos analizando ciclo a ciclo el proceso son superiores a los obtenidos por el método de Buckmaster, aunque no se observan diferencias significativas. Además, es necesario destacar que, independientemente del método que empleemos, el tiempo medio invertido por la cosechadora en realizar un ciclo es de 15,76 minutos.

Sin embargo las diferencias sí son significativas, para un nivel de significación del 5% cuando consideramos los tiempos efectivos de utilización de la cosechadora (Uh) (véase tabla 4). Además, en este caso, los valores que se han obtenido por el método de Buckmaster son ligeramente superiores a los obtenidos analizando ciclo a ciclo.

Los tiempos de ciclo totales (CT) que se han obtenido mediante el análisis individual son ligeramente superiores a los obtenidos por el método de Buckmaster, sin embargo estas diferencias no son significativas, para un nivel de significación del 5%. Los datos obtenidos ciclo a ciclo son resultado de observaciones en campo, por lo que reflejan la realidad de lo sucedido. Se deduce que la cosechadora, como media, está esperando por el transporte un 12,67 % del tiempo total del ciclo, dato ligeramente superior al obtenido mediante el método de Buckmaster donde el tiempo medio de espera de la cosechadora no supera el 6%, observándose también en este caso diferencias significativas entre ambos métodos.

Tabla 4. Valores medios obtenidos con los dos métodos de análisis de ciclos

	Buckmaster	Ciclo a ciclo	Sign.
CT (h ciclo ⁻¹)	0,282	0,305	n.s.
CTh (h ciclo ⁻¹)	0,263	0,263	n.s.
CTt (h ciclo ⁻¹)	0,425	0,288	5%
Csys (t cosechadas h ⁻¹)	40,35	33,29	5%
Uh (h cosechando h ⁻¹)	0,78	0,74	5%
Ti,h (h ciclo ⁻¹)	0,019	0,045	5%
Ti,t (h ciclo ⁻¹)	0,068	0,018	5%
Ti,u (h ciclo ⁻¹)	0,184	0,21	5%
Tiempo espera cosechadora (%)	5,68	12,67	5%

Son necesarios más estudios para determinar, en función del coste horario de la cosechadora y del transporte, si será rentable incrementar el número de transportes, o si por lo contrario interesará mantener estos tiempos de espera. Resaltar además que la cosechadora invierte un 25 % de su tiempo en realizar maniobras de alineación con el transporte y en la descarga del forraje, tal y como se ha puesto de manifiesto al analizar el valor de utilización de la cosechadora (U_h), tiempo que la cosechadora está activa respecto del tiempo total de ciclo.

Con los datos referidos al transporte sucede lo contrario que con los referidos a la cosechadora. Estos resultados eran previsibles, ya que no se han registrado los tiempos de espera de camión considerando, en el análisis ciclo a ciclo, que el camión llegaba cuando la máquina realizaba la descarga (excepto que en la cosechadora se registrase un tiempo de espera de camión). Sin embargo, las utilidades son mayores con el método de Buckmaster que las obtenidas mediante el análisis individual de ciclos. Dado que los tiempos de transporte están sometidos a menor incertidumbre que los tiempos de cosecha (el número de variables que incidirán en esta última operación es mayor) podemos considerar que el método de Buckmaster proporciona un mayor grado de fiabilidad que los datos obtenidos con el análisis ciclo a ciclo, en lo que a resultados de transporte se refiere.

De los resultados obtenidos con ambos métodos, corroborado por las observaciones realizadas en campo, se deduce que la pala con el extendedor de forraje en ningún momento condiciona la duración del ciclo total (es una actividad con gran holgura en el proceso).

La capacidad del sistema (toneladas de forraje cosechadas por hora) es ligeramente superior con el sistema de análisis ciclo a ciclo, al considerar una elevada utilización del transporte.

5.1.3 Análisis de los tiempos invertidos por la cosechadora en cada jornada laboral durante la campaña 2008.

Se ha analizado el tiempo que ha trabajado la cosechadora en cada una de las fincas, el tiempo que la cosechadora ha estado inactiva, esperando por el camión, y los tiempos invertidos en desplazamientos de una finca a la siguiente, obteniéndose los datos mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Tiempos medios obtenidos en el análisis de la campaña 2008 de la cosecha de maíz forrajero

Cosechadora n° 6 campaña 2008					
	h totales	h espera camión	h desplazamiento	% h esperas	% h desplazamiento
Jornada	10:21:52	0:48:19	1:39:57	7,77%	16,07%
Mañana	5:02:30	0:26:50	0:37:39	8,87%	12,45%
Tarde	5:19:22	0:21:29	1:02:19	6,73%	19,51%
Cosechadora n° 7 campaña 2008					
	h totales	h espera camión	h desplazamiento	% h esperas	% h desplazamiento
Jornada	9:26:19	1:02:36	1:41:57	10,84%	18,10%
Mañana	4:36:58	0:32:43	0:55:19	11,47%	20,03%
Tarde	4:49:21	0:29:53	0:46:38	10,23%	15,86%

Los datos obtenidos en las dos cosechadoras son muy semejantes, se han obtenido unos tiempos de espera medios por camión de casi una hora. Toda vez que en la actualidad el coste horario de la cosechadora es 6 veces mayor que el del camión. Si esto lo pasamos a términos económicos, el tiempo que la cosechadora pierde diariamente esperando por el camión sería casi suficiente para pagar los servicios de un camión más, diariamente.

En cambio, si analizamos el tiempo invertido en espera de camión en relación al tiempo total, obtenemos unos porcentajes bajos de tiempos de espera, en torno al 8% en la cosechadora n° 6 y cerca del 11 % en la cosechadora n° 7. En la figura 23 se representa de forma gráfica los tiempos medios invertidos por la cosechadora

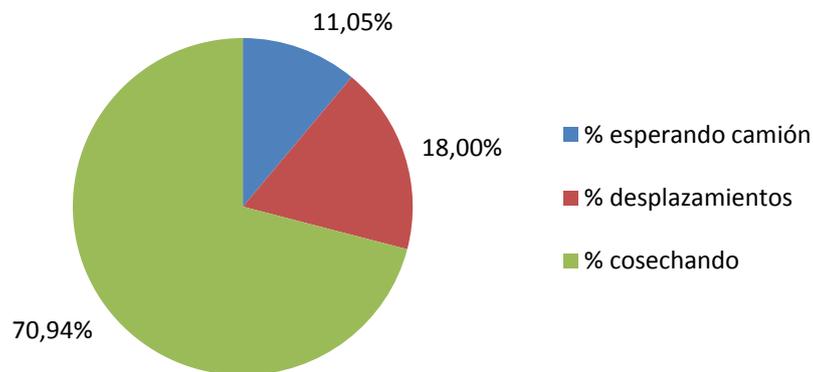


Figura 23. Representación gráfica de los tiempos de actividad de la cosechadora

Otro dato a considerar es el tiempo que invierten las cosechadoras en desplazamientos. Según los datos obtenidos en la campaña 2008, las cosechadoras destinan, de promedio, el 17% de su tiempo a desplazamientos entre fincas o, lo que es lo mismo, necesitan una hora y media cada día para desplazamientos, algo que habría que tratar de reducir, en la medida de lo posible, con una mejor planificación de las rutas que debe seguir la cosechadora en cada jornada.

Analizando los tiempos de espera por camión se han obtenido los siguientes resultados:

- En la cosechadora nº 6, de las 24 jornadas de trabajo analizadas, separando mañana y tarde, se han registrado tiempos de espera de camión en un total de 20 jornadas, es decir, en el 83,33 % de las jornadas se han registrado tiempos de espera, llegando a tener que esperar la cosechadora más de un 27% del tiempo, o lo que es lo mismo ha estado parada, esperando por el camión, 2 horas de la jornada laboral.

- En la cosechadora nº 7, se han analizado un total de 60 medias jornadas, de las cuales en 51 se registraron tiempos de espera, esto significa que en el 85% de las medias jornadas la cosechadora ha esperado por el medio de transporte. En este caso, la cosechadora, algún día, ha llegado a pasar más del 47% de la mañana o de la tarde esperando por el camión.

5.1.3.1 Variación de los costes en función del número de transportes empleados

Si utilizásemos un camión más en cada jornada de la campaña 2008, esto repercutiría en un incremento de los costes de la operación de ensilaje del 5,78 % para la cosechadora nº 6, pero se reduciría la actividad de la cosechadora casi 19 horas. En el caso de la cosechadora nº 7, tal y como se observa en la figura 24, tan solo supondría un incremento de los costes del 3,22 % y un ahorro de 58 horas de actividad de la cosechadora.

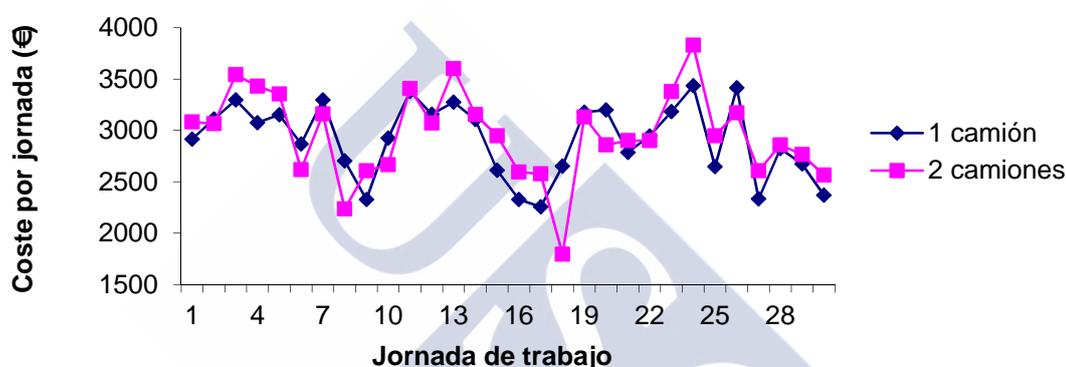


Figura 24. Variación de los costes de cada jornada de la cosechadora Nº 7, en función del nº de transportes empleados.

Como lo anteriormente expuesto no supone un beneficio económico se han analizado los casos en los que aumentar en una unidad al número de transportes implicaba una reducción de los costes de la operación de ensilaje para esa media jornada, entonces considerando la jornada dividida entre mañana y tarde:

- En el caso de la cosechadora nº6 se podría ahorrar hasta un 1,72 %, lo que supondría un total de 1324,87 € además de reducir casi 6 horas de trabajo para esa cosechadora.

- En la cosechadora nº 7 se podrían ahorrar 5857,75 € entorno a un 3,35 %, además de disponer de más de 45 horas libres para la cosecha de otras fincas.

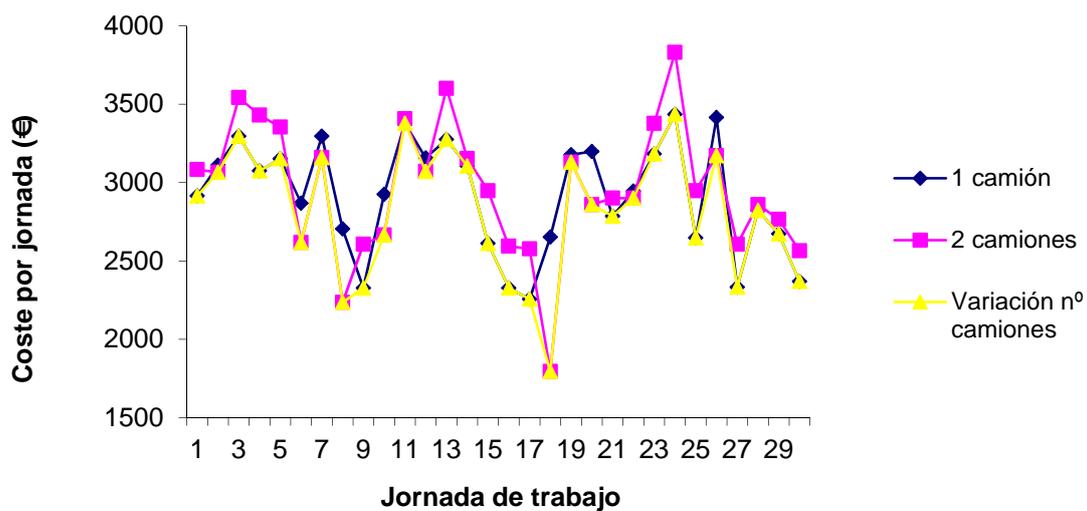


Figura 25. Variación de los costes de cada jornada de la cosechadora N° 7, en función del n° de transportes empleados.

Según se observa en la figura 25, la opción económicamente más idónea es la que se obtiene con una combinación del número de transportes, permitiendo reducir por un lado los tiempos de espera de la cosechadora y por otro los costes globales de la operación de ensilado del maíz forrajero.

A partir de los tiempos de espera registrados por las dos cosechadoras durante la campaña de recolección de maíz forrajero y analizando los costes obtenidos al incrementar en una unidad el número de medios de transporte, se ha podido comprobar la expresión [4.13], ya explicada en el epígrafe 4.2.1.4 del apartado de material y métodos, obteniendo los siguientes resultados:

- En la cosechadora n°6 se ha comprobado que para un tiempo de espera del 11,94% no es rentable aumentar el número de transportes, y sin embargo a partir de tiempos de espera de 13,66 % ya sería más recomendable usar otro camión.

- En el caso de la cosechadora n°7 se ha podido comprobar algo semejante, el tiempo de espera máximo registrado sin que fuera económicamente más adecuado aumentar el número de transportes ha sido del 11,91%, y a partir de porcentajes de espera superiores al 14,15% ya se han registrado datos positivos al aumento del n° de transportes.

Lo expuesto anteriormente viene a confirmar la expresión que empleamos para la determinación del tiempo máximo que puede esperar la cosechadora, de media, por el transporte.

5.1.4 Número de transportes necesarios en función de la capacidad efectiva de la cosechadora ($t h^{-1}$) y de la distancia al silo (km)

Si consideramos que el valor de ocupación “Uh_b” es el tiempo que cada uno de los transportes mantiene ocupada a la cosechadora (sin tiempos de espera), obtenemos la utilización de la cosechadora (Uh_l) límite, por debajo de la cual ya sería necesario añadir otro transporte.

Cuanto mayor sea el número de transportes utilizados en el ciclo mayor será la utilización de la cosechadora, pues estaremos reduciendo los tiempos de espera por el transporte.

Además no conviene trabajar con valores de utilización de la cosechadora por debajo de los dados, para uno determinado “K”, ya que estaríamos incrementando los costes de la operación de ensilado.

Considerando los valores de utilización de la cosechadora (Uh_l) reflejados con anterioridad podemos calcular el tiempo necesario para la realización de un ciclo completo de trabajo, a partir de la siguiente expresión (Buckmaster,2005):

$$CT = (Vc/Cm,h) / Uh_l \quad [5.1]$$

donde:

- Vc: material cosechado por ciclo (t), que dependerá del peso almacenado en cada unidad de transporte (Vt) y del número de transportes por ciclo (Nt). El peso almacenado consideraremos que tiene un valor de 8,5 t tal y como se justifica en el epígrafe 4.2.1.2. y el valor de Vc lo obtendremos a partir de la expresión [4.1].

- Cm,h: capacidad real o efectiva de la cosechadora ($t h^{-1}$)

- Uh_l: ocupación de la cosechadora límite (h ocupada h ciclo $^{-1}$)

A partir de la expresión [4.20] podemos sacar el tiempo que podrá emplear cada unidad de transporte en realizar su ciclo, para mantener una utilización de la cosechadora dada, es decir, conoceremos el tiempo que pueden emplear los transportes en el desplazamiento ya que

el resto de tiempos de ciclo asociados el transporte son similares y podemos considerarlos constantes para todas las fincas, independientemente de la distancia a la que se encuentre el silo.

Considerando una velocidad media de 20 km h^{-1} , tal y como se justifica en el epígrafe 4.2.1.2., y a partir de los datos anteriores, podremos conocer la distancia máxima que puede haber entre la finca y el silo para que la utilización de la cosechadora no sea inferior a lo indicado en función del número de transportes:

$$Dt = (St \times Tt) / 2 \quad [5.2]$$

Donde

Dt: distancia finca- silo, (km)

Tt: tiempo de desplazamiento (h ciclo^{-1})

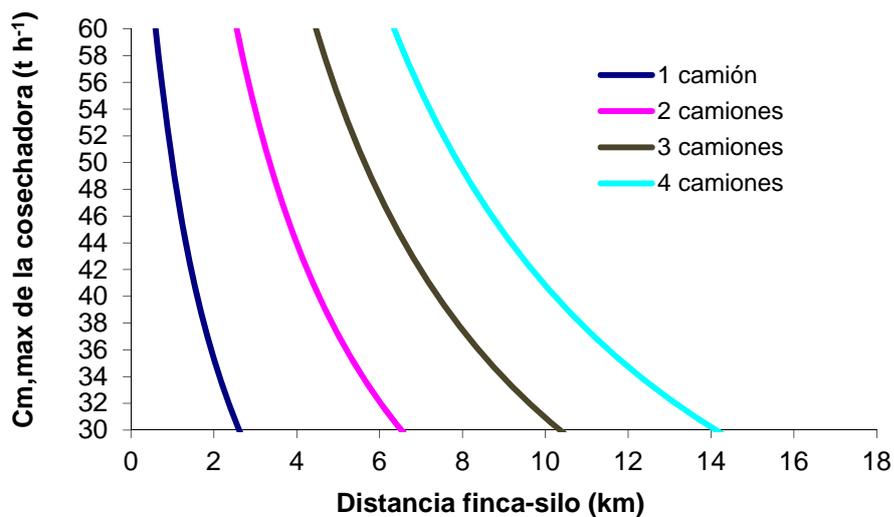


Figura 26. Transportes necesarios en función de la distancia finca-silo, para una velocidad media de 20 km h^{-1}

Como ya apuntaba Harrigan (2003), en la figura 26 se puede observar como para una misma capacidad de trabajo de la cosechadora a medida que la distancia entre la finca y el silo aumenta también aumenta el número de transportes necesarios para mantener una utilización óptima de la cosechadora desde el punto de vista económico, pues al ser mayor la distancia a recorrer por los medios de transporte también será mayor su ciclo superando incluso en ocasiones al ciclo de la cosechadora. Así pues, por ejemplo para una capacidad de 50 t h^{-1} de

la cosechadora, cuando la finca se encuentra a más de 1 km del silo será necesario trabajar con 2 transportes y cuando la distancia sea superior a los 3,35 km ya será recomendable trabajar con 3 transportes, para que el tiempo de espera de la cosechadora no sea excesivo.

5.1.5 Variación del coste de la operación de recolección del ensilado de maíz en función de la distancia y del número de camiones empleados

Para realizar este cálculo se han utilizado las siguientes variables:

- A partir de una velocidad media de 20 km h^{-1} y en función de la distancia se han obtenido los tiempos de desplazamiento necesarios: $T_t = D_t S_t^{-1}$ y conociendo este dato ya podemos calcular el tiempo de ciclo de transporte necesario, en función de la expresión [4.3].

- Conociendo el número de transportes que estamos usando y la capacidad de la cosechadora ($t \text{ h}^{-1}$), podremos conocer la utilización de la cosechadora en función de la distancia, usando la expresión [4.6].

- Conocida la utilización de la cosechadora en cada punto, podemos calcular el coste de la operación (C_o) de ensilado con la siguiente expresión:

$$C_o = C \times (n+K) / (\text{MIN}(U_{h_1})) \quad [5.3]$$

Siendo:

C: el coste horario del transporte

K: ratio entre coste horario de la cosechadora y el coste horario del transporte

n: número de transportes utilizados

MIN(U_{h_1}): valor mínimo de ocupación de la cosechadora

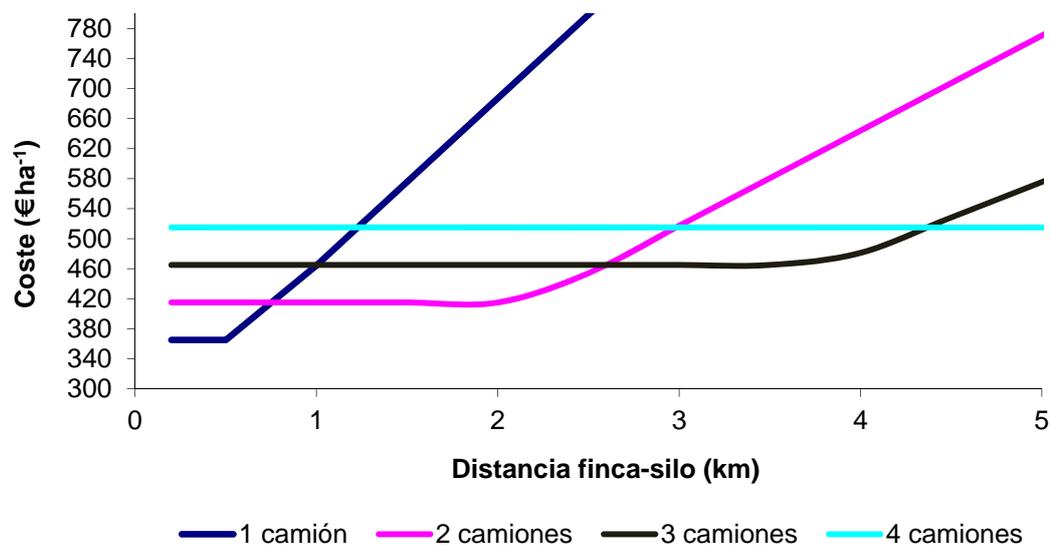


Figura 27. Variación de los costes en función de la distancia, entre finca y silo, para una capacidad efectiva de la cosechadora ($C_{m,h}$) de $51,90 \text{ t h}^{-1}$

El punto de corte de cada línea con la siguiente, que se muestra en la figura 27, será el indicador de que a partir de esa distancia de separación entre la finca y el silo, ya necesitaremos añadir otro transporte o en el caso contrario estaremos aumentando los costes de la operación debido a tiempos de espera excesivos de la cosechadora.

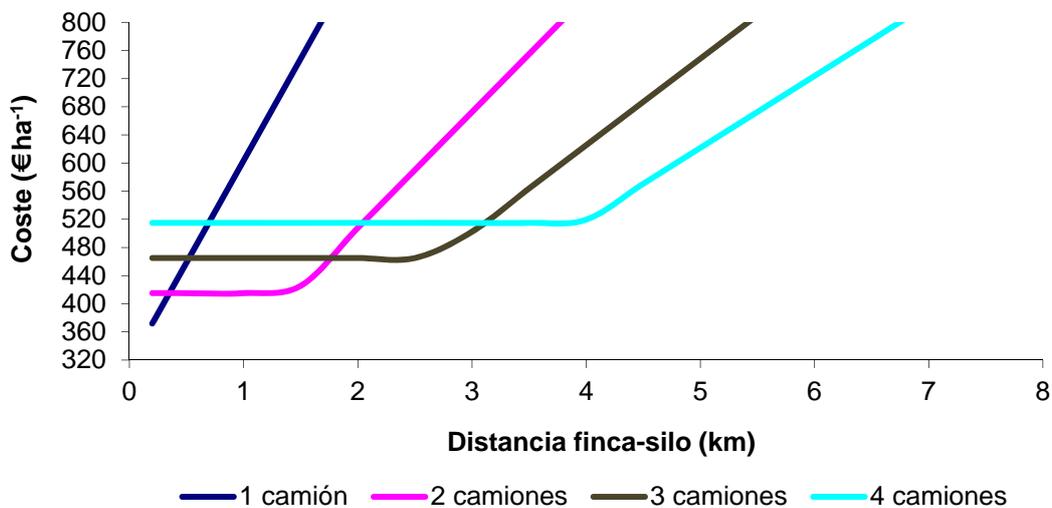


Figura 28. Variación de los costes en función de la distancia, entre finca y silo, para una capacidad efectiva de la cosechadora de $67,47 \text{ t h}^{-1}$

En la figura 27, se observa que para una capacidad efectiva de la cosechadora de $51,90 \text{ t h}^{-1}$, sólo compensa la utilización de un camión cuando la finca se encuentra a menos de 800 m del silo. Sin embargo cuando aumenta la capacidad efectiva de la cosechadora en un 30 % (figura 28) la distancia que nos permite que sea económicamente rentable usar un camión en lugar de dos se reduce a la mitad.

Esto mismo se observa en la figura 29, donde tenemos un incremento de los costes de la operación de ensilado para separaciones entre finca y silo de menos de 200 m cuando aumenta la capacidad efectiva de la cosechadora un 30%. Sin embargo cuando estamos trabajando con 4 camiones los costes comienzan a incrementarse para una capacidad de la cosechadora de $67,47 \text{ t h}^{-1}$ a partir de los 4 km mientras que para una capacidad del 30% menos ($51,90 \text{ t h}^{-1}$) no se registran incrementos en los costes hasta los 5,5 km, es decir a mayor distancia entre finca y silo menos repercusión económica tienen los incrementos de capacidad efectiva de la cosechadora.

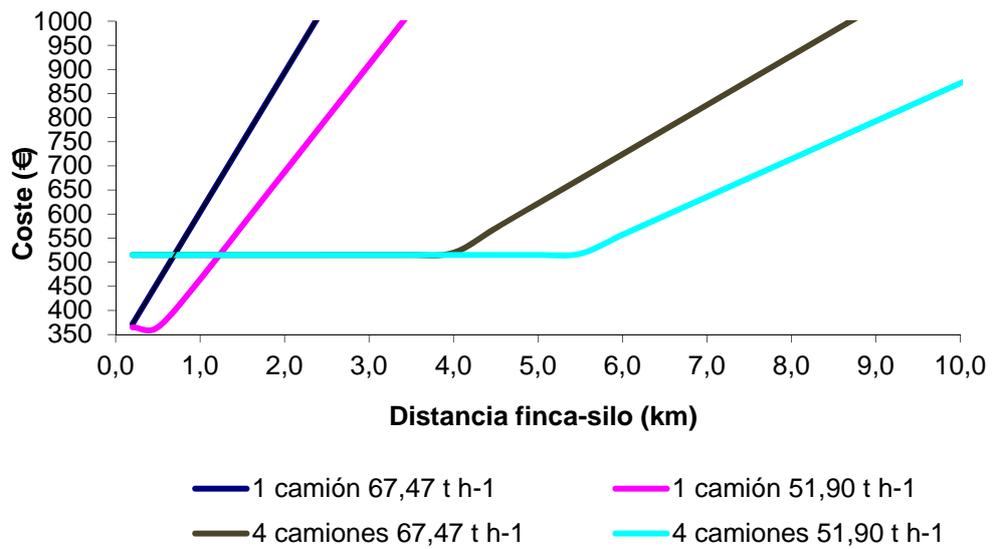


Figura 29. Comparativa de los costes en función de la distancia, capacidad de la cosechadora y nº de camiones.

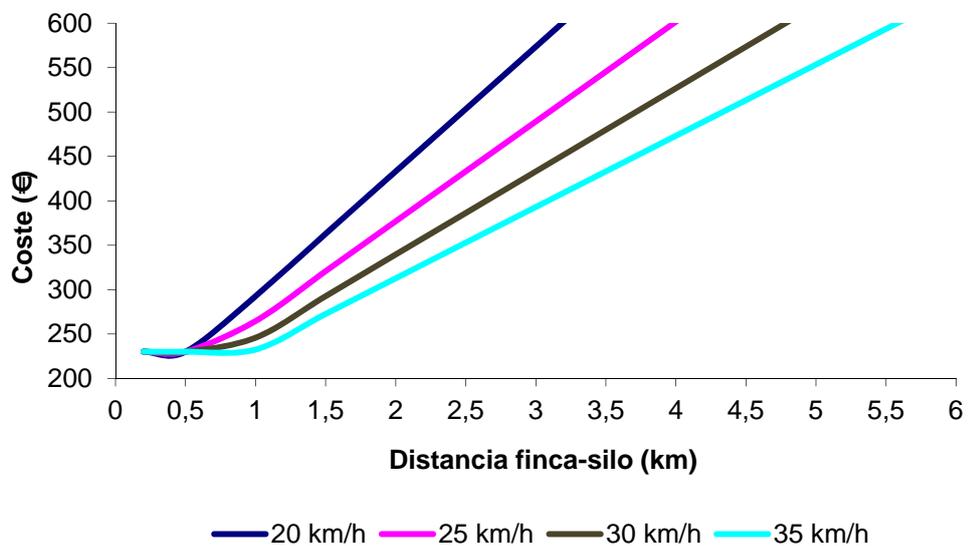


Figura 30. Variación de los costes en función de la velocidad de transporte, para $C_{m,h}=51,90 \text{ t h}^{-1}$

En la figura 30, se observa la variación de los costes en función de la velocidad del transporte. Cuando la distancia entre finca y el silo es pequeña (menos de 500 m) variaciones

en la velocidad del transporte no afectan a los costes de la operación de ensilado, sin embargo, a medida que aumenta la distancia entre la parcela y el silo variaciones en la velocidad repercuten de un modo más importante en los costes, por ejemplo: en fincas situadas a 2,5 km del silo, el coste se incrementa cerca de 117 € para una velocidad media de 20 km h⁻¹ en lugar de 30 km h⁻¹.

5.1.6 Número de transportes necesarios para la cosecha de maíz forrajero, considerando características de la parcela, rendimientos de cultivo, y distancia a silo

Los resultados obtenidos, para cada una de las fincas analizadas, han sido los siguientes:

Tabla 6. Datos y resultados obtenidos aplicando la función de regresión

Finca	Campaña	Y (t ha ⁻¹)	A (ha)	LS (%)	IF	FC (ha h ⁻¹)	Cm_h (t h ⁻¹)
266	2006	26,73	2,54	16	0,64	1,32	35,23
270	2006	21,88	2,33	3	0,92	1,60	35,04
363	2006	29,46	2,02	5	0,63	1,31	38,48
452	2006	25,85	2,63	6	0,81	1,48	38,19
506	2006	18,76	2,72	6	0,57	1,6	29,95
618	2006	36,67	2,32	15	0,65	1,07	39,32
2059	2006	30,02	1,70	8	0,55	1,22	36,62
8024	2006	29,46	4,62	5	0,57	1,5	44,32
160	2006	28,35	6,00	9	0,87	1,68	47,65
8016	2006	27,41	7,75	3	0,77	1,88	51,44
198	2007	42,41	2,25	8	0,59	0,98	41,49
201	2007	35,35	1,37	10	0,94	1,14	40,37
618	2007	49,03	2,32	15	0,65	0,78	38,06
668	2007	40,37	2,18	0	0,52	1,07	43,4
4027	2007	65,93	1,88	10	0,79	0,41	27,22
4040	2007	29,99	2,92	0	0,68	1,43	42,74
4067	2007	56,37	1,29	0	0,59	0,64	35,81
4174	2007	43,81	4,15	0	0,72	1,20	52,76
4186	2007	62,24	1,41	7	0,73	0,48	29,59

Con este método se obtiene como resultado el número de transportes necesarios, mientras que en los análisis de ciclo realizados este es un dato que debemos aportar.

Tabla 7. Número de transportes necesarios según la función de regresión

Finca	Campaña	Uh (h cosechando h ⁻¹)	Nº transportes	Dt (km)
266	2006	1,57	1	0,9
270	2006	1,22	1	1,8
363	2006	1,34	1	1,12
452	2006	0,52	2	6,4
506	2006	1,06	1	3,2
618	2006	1	1	2,16
2059	2006	1,38	1	1,2
8024	2006	0,64	2	3,8
8016	2006	0,94	1	1,34
198	2007	0,94	1	2,2
201	2007	1,32	1	1,02
618	2007	1,03	1	2,16
668	2007	0,61	2	4,24
4027	2007	1,69	1	0,86
4040	2007	1,2	1	1,16
4067	2007	1,43	1	1,16
4174	2007	1,1	1	0,76
4186	2007	1,74	1	1,14

En las fincas en que se ha obtenido como resultado una utilización de la cosechadora superior a 1 significa que el único medio de transporte que tenemos tendrá que esperar por la cosechadora ya que será el ciclo de la cosechadora lo que esté limitando el sistema, este valor será indicativo de lo sobredimensionado que está el medio de transporte (tiempo que tendrá que esperar el medio de transporte.)

Según los datos obtenidos, en tan sólo 3 de las parcelas estudiadas sería necesario emplear 2 camiones para que los tiempos de espera de la cosechadora no fuesen excesivos e incrementen los costes de la operación de ensilado.

5.1.6.1 Comparación de los resultados obtenidos mediante la función de regresión con los obtenidos mediante el análisis individual de ciclos y otros métodos de determinación del número de transportes necesarios

A continuación se comentan los resultados obtenidos, comparándolos con el análisis individual de ciclos realizado para cada parcela, descrito en el epígrafe 5.1.2., y con los datos de la figura 26 en la que se muestra el número de transportes necesarios en función de la distancia de la finca al silo, para una velocidad media de 20 km h^{-1} .

La finca 452 está situada a 3,2 km del silo, por lo que si nos fijamos en la gráfica de variación del coste en función de la distancia (figura 26) para una capacidad de $38,19 \text{ t h}^{-1}$ resulta que lo más recomendable sería emplear 2 camiones. Según el análisis individual de ciclos resulta que la cosechadora tiene unos tiempos de espera medios por ciclo del 16,34 %, dato que también nos corrobora la necesidad de emplear 2 camiones en lugar de 1, ya que estaríamos superando el porcentaje de espera económicamente rentable (que para un ratio de $K=6,30$ es de 12,04 %).

En el caso de la finca 8024, situada a 1,9 km del silo, obtenemos según la función de regresión una capacidad de $44,32 \text{ t h}^{-1}$. Consultando la figura 26 deberíamos emplear 2 camiones. Durante el análisis individual de ciclos se han registrado unos tiempos de espera medios del 7,97%, teniendo en cuenta que se usaron 2 camiones y que según la ocupación de corte no será económicamente rentable emplear 3 camiones hasta conseguir tiempos de espera que representen el 10,75%, los resultados obtenidos han sido los correctos.

Por último analizamos lo que ocurre con la finca 668, en la que también han estado trabajando 2 camiones, pero en este caso se han registrado unos tiempos de espera medios de 12,5%, por lo que según la ocupación de corte deberíamos emplear 3 camiones. La finca se encuentra a 4,25 km del silo y se ha obtenido (según la función de regresión) una capacidad de $43,40 \text{ t h}^{-1}$ por lo que observando la figura 26 deberíamos utilizar 2 camiones.

La ventaja de este método es que también se está considerando la forma de la parcela, pendiente, etc mientras que el método de análisis propuesto por Buckmaster no distingue estas características, algo que en nuestra comunidad influye de modo significativo en las operaciones de ensilado, tal y como han concluido en sus trabajos Amiama *et al.* (2008).

Por otra parte tenemos los resultados obtenidos para la finca nº 618, que ha sido cosechada en las dos campañas, y observamos que en el primer año se ha obtenido una capacidad de la cosechadora de $42,15 \text{ t h}^{-1}$. En función de esto y de la distancia sólo se necesitaría un medio de transporte, atendiendo a los datos que figuran en la tabla 8. Sin embargo los tiempos de espera registrados indican que lo idóneo sería emplear dos medios de transporte. Al año siguiente, en la misma finca se ha obtenido una capacidad real de $59,30 \text{ t h}^{-1}$ según lo cual ya necesitaríamos dos medios de transporte pero los tiempos de espera no llegan a superar el límite que nos aconseja usar más de un medio de transporte, por lo tanto, además de la capacidad, distancia, velocidad, y demás factores asociados a la finca están influyendo otros factores que por lo de ahora se nos escapan y serían determinantes a la hora de fijar el número de camiones que debemos emplear para cosechar de la manera más eficiente una finca.

Por otra parte, si estudiamos lo que ocurre cuando partimos de los datos de capacidad real de la cosechadora, en aquellas fincas en las que se ha hecho un análisis individual y de las que conocemos la distancia que hay entre finca y silo, el número de camiones necesarios en función de la figura 26 a partir de la que se obtiene el número de transportes necesarios en función de la distancia de la finca al silo, para una velocidad media de 20 km h^{-1} y un ratio $K=6,30$, comparados con los transportes realmente empleados hay un acierto del 67%, aunque si nos fijamos en los tiempos de espera para determinar el número de camiones que se deberían emplear entonces sólo estamos teniendo un 56% de aciertos.

Tabla 8. Comparativa del nº de transportes obtenido en función de la figura 26, que relaciona la capacidad real de la cosechadora y la distancia y a través del análisis individual de ciclos.

Finca	Cm_h (t h ⁻¹)	Dist al silo (km)	Nº camiones según figura 26	Nº camiones según análisis indiv.	Nº camiones según análisis individual y tiempos de espera
266	40,40	20,20	1	1	1
270	39,23	19,62	1	1	1
363	45,19	22,59	1	1	2
452	36,43	18,21	2	2	2
506	36,87	18,43	1	2	2
618	42,15	21,07	1	2	2
2059	57,74	28,87	1	1	1
8024	58,29	29,14	2	2	2
8016	59,86	29,93	1	2	3
198	65,92	32,96	2	2	2
201	52,81	26,40	1	1	1
618	59,30	29,65	2	1	1
668	53,43	26,71	2	2	2
4027	79,18	39,59	1	1	1
4040	26,43	13,22	1	1	2
4067	56,81	28,40	1	1	1
4174	55,11	27,56	1	2	2
4186	64,23	32,11	1	2	2

Para comprobar la validez de la gráfica que relaciona la capacidad real (Cm_h) o la capacidad máxima de la cosechadora (Cm,max) con la distancia, dando como resultado un número determinado de camiones, se ha estudiado lo ocurrido en varias fincas cultivadas en la campaña 2007-2008 situadas a una distancia muy variable del silo, siendo las conclusiones obtenidas las que siguen:

- En las fincas próximas al silo, aproximadamente a 4 km, los resultados obtenidos considerando una velocidad media variable entre 20 km h⁻¹ y 45 km h⁻¹ fueron los mismos y muy similares a los registrados en la realidad.

- En aquellas fincas que ya se encontraban muy lejos del silo, a más de 10 km, se ve como los datos obtenidos de la gráfica considerando una velocidad media de 20 km h⁻¹ comienzan a dar datos irreales mientras que con la gráfica en la que consideramos una velocidad media de 45 km h⁻¹ estamos obteniendo datos más similares a la realidad.

- Cuando consideramos una velocidad media de 45 km h^{-1} el número de camiones obtenido, en la mayoría de los casos, es menor (42,4%) o igual (18,2%) que el empleado en la realidad, mientras que en el 39,4% restante estamos incrementando el número de camiones.



5.2 RESULTADOS OBTENIDOS COMPARANDO COSECHADORAS AUTOPROPULSADAS CON TOLVA Y SIN TOLVA INCORPORADA

5.2.1 Comparación de las capacidades efectivas de trabajo

En la tabla 9 se muestra un resumen del trabajo realizado por cada cosechadora.

Tabla 9. Datos generales

	Nº fincas	Tiempo actividad (h)	Superficie cosechada (ha)	Superficie media (ha)	Producción media (t ha ⁻¹)	Distancia recorrida (km)
C. con tolva	41	40,52	47,24	1,15	37,06	156,09
C. sin tolva	41	40,15	43,04	1,05	39,05	134,29

En la tabla 10 se muestran los resultados medios obtenidos por ambas cosechadoras. De los análisis de varianza realizados, cuando analizamos la capacidad efectiva de trabajo o la distancia recorrida, se concluye que no hay diferencias significativas entre las dos cosechadoras (para un nivel de significación del 5%).

Estudios previos (Amiama, Bueno y Álvarez, 2008) han concluido que el rendimiento del cultivo es la mejor variable para explicar la capacidad efectiva de trabajo de la cosechadora. En consecuencia, esta variable se ha incluido como covariable en el análisis estadístico, observándose que tiene gran incidencia en la capacidad de trabajo de las dos cosechadoras. Si bien, se observa que la capacidad efectiva de trabajo de la cosechadora con tolva es ligeramente superior a la cosechadora sin tolva, es decir, en el mismo tiempo es capaz de cosechar una mayor superficie. Esto puede deberse a su mayor independencia a la hora de realizar los trabajos y la no necesidad de coordinarse con ningún medio de transporte. Esta mayor capacidad efectiva de trabajo es más relevante, si cabe, cuando nos fijamos en los kilómetros recorridos, pues es también la cosechadora con tolva la que realiza un mayor número de kilómetros para cosechar la misma superficie.

Tabla 10. Resultados medios de las cosechadoras analizadas

	Capacidad efectiva de trabajo (ha h⁻¹)	Desvest (ha h⁻¹)	Distancia recorrida (km ha⁻¹)	Desvest (km ha⁻¹)
C. con tolva	1,18(a)	0,38	3,43(a)	0,48
C. sin tolva	1,06(a)	0,24	3,27(a)	0,59

Diferentes letras en la misma columna indican datos significativamente diferentes (p = 0,05).

Se han analizado los resultados obtenidos globalmente y se ha hecho una diferenciación entre las parcelas según unos rangos de superficie dados. Se ha diferenciado entre parcelas de menos de 0,5 ha, parcelas entre 0,5 y 1,5 ha y las que son de más de 1,5 ha, con el objetivo de comprobar si el tamaño de la parcela condiciona el comportamiento de ambas cosechadoras analizadas. En la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos agrupados en los tres rangos de superficie definidos en función del tamaño de la parcela analizada. Al analizar estos resultados, al igual que ocurre con los resultados globales, no se observaron diferencias significativas (para un nivel de significación del 5%) en la capacidad efectiva de trabajo, observando, como ya demostraron estudios anteriores (Amiama, Bueno y Álvarez, 2008) que las capacidades efectivas de trabajo más altas se obtienen en las parcelas de mayor superficie.

La distancia recorrida por las dos cosechadoras es significativamente distinta (para un nivel de significación del 5%), tan sólo en fincas de más de 1,5 hectáreas, siendo al igual que ocurre en los otros dos casos, la cosechadora con tolva la que realiza más kilómetros.

En las dos cosechadoras se observa un mayor número de kilómetros por hectárea cuanto menor es la parcela cosechada, es decir, a medida que aumenta la superficie de la parcela disminuye el recorrido extra por maniobras y giros. En parcelas pequeñas las dos cosechadoras tienden a pasar más veces por zonas ya cosechadas, debido a la necesidad de usar estas zonas para las maniobras.

Tabla 11. Resultados medios de capacidad efectiva y distancia recorrida por rangos de superficie

	Capacidad efectiva de trabajo (ha h ⁻¹)			Distancia recorrida (km ha ⁻¹)		
	sup < 0,5 ha	sup 0,5-1,5 ha	sup > 1,5 ha	sup < 0,5 ha	sup 0,5-1,5 ha	sup > 1,5 ha
C. con tolva	1,29(a)	1,09(a)	1,31(a)	3,97(a)	3,40 (a)	3,22(a)
C. sin tolva	0,93(a)	1,05(a)	1,17(a)	3,48(a)	3,35 (a)	2,88(b)

Diferentes letras en la misma columna indican datos significativamente diferentes (p = 0,05).

A medida que aumenta la superficie a cosechar el tiempo de cosecha se incrementa de forma lineal para las dos cosechadoras, siendo más notorio este incremento para la cosechadora sin tolva, tal y como se observa en la figura 31. Esto puede ocurrir debido a la necesidad, ya comentada, de la cosechadora sin tolva incorporada de coordinarse con el vehículo que la acompaña. Cabe pensar que a mayor tamaño de la finca mayor número de veces se intercambiarán los dos transportes que, al menos, necesita la cosechadora sin tolva para completar su ciclo de cosecha.

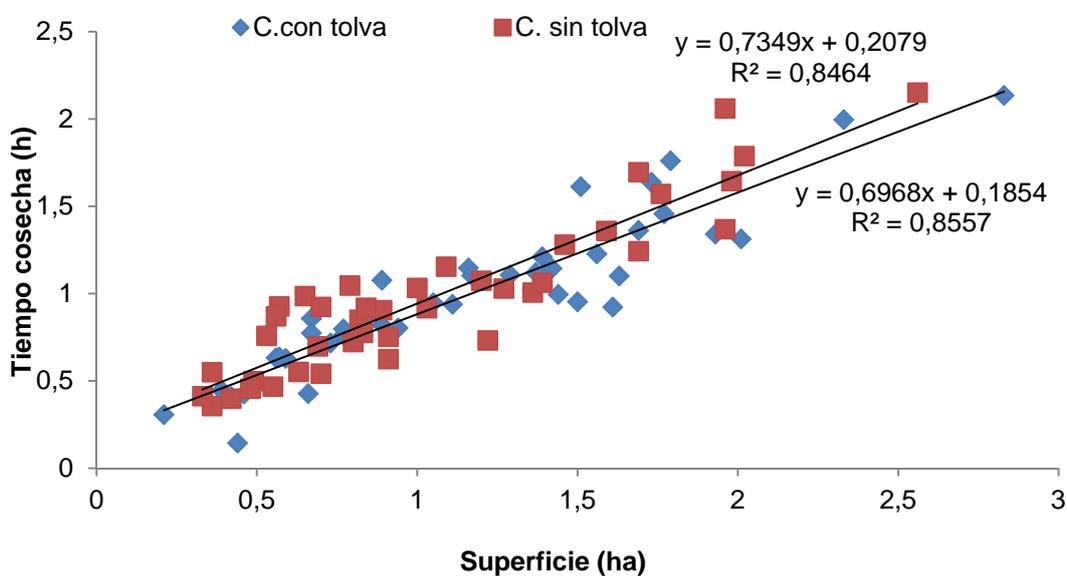


Figura 31. Tiempo de cosecha según superficie de la parcela

Lo mismo que ocurre con el incremento de superficie, ocurre cuando se incrementa la producción del cultivo, pero en este caso, tal y como se observa en la figura 32, es la cosechadora con tolva la que presenta una mayor sensibilidad al incremento del rendimiento del cultivo debido, sobre todo, a que a medida que aumenta el rendimiento del cultivo se incrementan las paradas necesarias para descargar la tolva, reduciendo de ese modo el tiempo efectivo de cosecha.

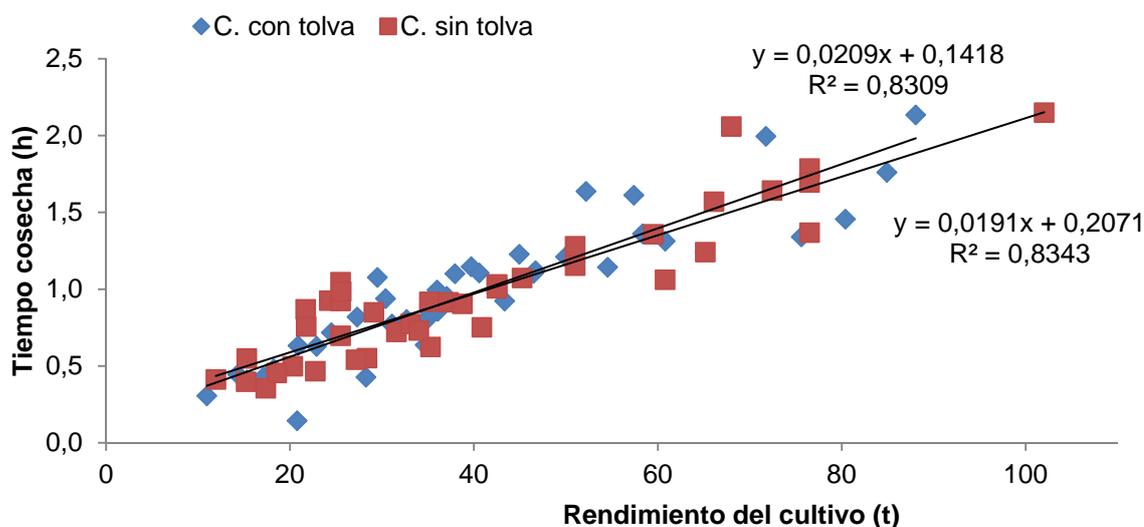


Figura 32. Tiempo de cosecha según el rendimiento del cultivo

En las dos cosechadoras se observa un mayor número de kilómetros por hectárea cuanto menor es la parcela cosechada, es decir, a medida que aumenta la superficie de la parcela disminuye el recorrido extra por maniobras y giros. En parcelas pequeñas las dos cosechadoras tienden a pasar más veces por zonas ya cosechadas, debido a la necesidad de usar estas zonas para las maniobras.

En la figura 33 se puede comprobar como para cosechar la misma superficie, la cosechadora con tolva realiza más kilómetros que la cosechadora sin tolva, más patente a medida que aumenta la superficie. La cosechadora con tolva aprovecha su independencia para realizar trayectorias más rápidas, lo que implica giros (o cambios de trayectoria) más abiertos, necesitando para ello más superficie. También es habitual que, aprovechando la superficie ya cosechada, se acerque al transporte para descargar el maíz recién picado, incrementando de este modo los kilómetros recorridos.

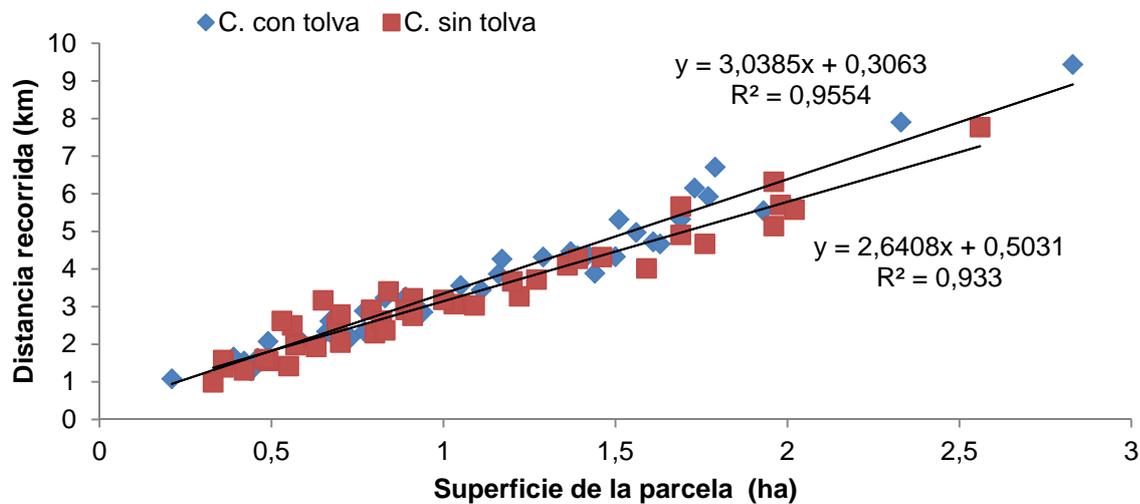


Figura 33. Distancia recorrida en función de la superficie de la parcela.

Como podemos observar en la figura 34, tanto para la cosechadora con tolva incorporada como para la cosechadora sin tolva el solape es mayor a menor superficie de la parcela, y va disminuyendo a medida que la superficie de la finca aumenta. A pesar de que la cosechadora con tolva incorporada realiza un mayor solape que la cosechadora sin tolva, esta es más eficiente debido a la mayor velocidad que alcanza en la recolección del forraje, tiene una mayor capacidad efectiva de trabajo, y dispone de mayor libertad de movimientos, al no tener que coordinarse con un transporte como la cosechadora sin tolva. El mayor solape que realiza la cosechadora con tolva incorporada en buena parte es debido, como ya se ha comentado con anterioridad, a que esta utiliza las partes de la finca ya cosechada para dirigirse hacia el transporte en el que realiza el traspaso del forraje. Además de utilizar estas zonas para hacer giros y maniobras más amplios y rápidos gracias a esa libertad de movimientos de la que dispone.

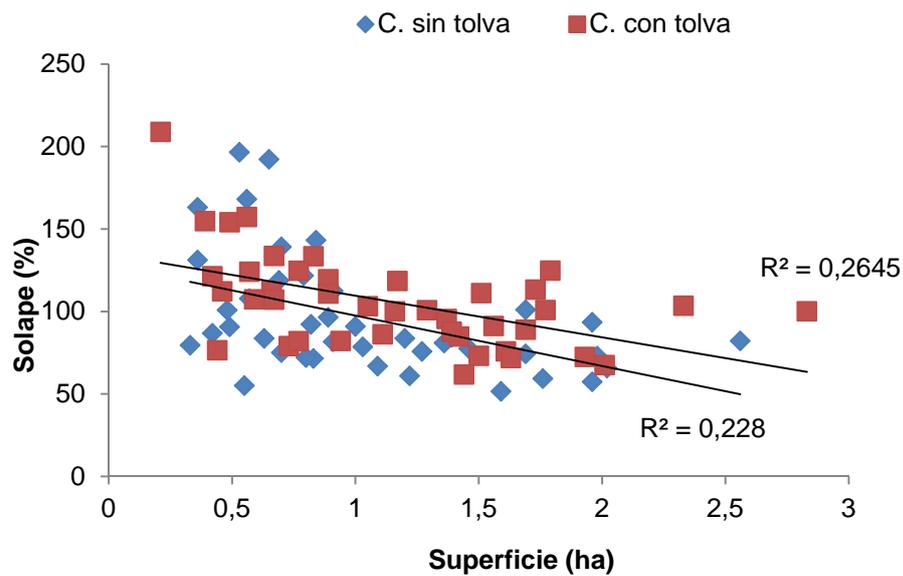


Figura 34. Solape producido en las parcelas en función de la superficie de la parcela

Se ha estudiado la velocidad de ambas cosechadoras en un total de 1334 trayectorias, siendo la cosechadora con tolva incorporada la que tiene una mayor velocidad de trabajo, es más rápida en la realización de maniobras y también en tramos rectos. Registrándose una mayor diferencia entre ambas cosechadoras cuando se ha analizado la velocidad en los giros. Esto es debido a que la coordinación que debe mantener la cosechadora sin tolva y el transporte lastra el avance de la misma ya que debe poner especial atención a las pérdidas de forraje en los giros, en el caso de que no sea una maniobra, y además, a la conducción que está realizando el conductor del medio de transporte que la acompaña. Aunque menos notable, esto mismo ocurre cuando la cosechadora sin tolva incorporada va cosechando en línea recta, podría ir más rápido debido a que no tiene que arrastrar el forraje como la cosechadora con tolva, pero esto no es así, debido a que debe poner atención en la descarga del forraje al transporte que la acompaña, volviendo a ser la cosechadora con tolva la que alcanza una mayor velocidad de avance.

Se muestran los resultados en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados de velocidad medios por rangos de superficie

	Velocidad rectas (km h ⁻¹)	Velocidad giros (km h ⁻¹)	Velocidad media (km h ⁻¹)
C. con tolva	4,72(a)	3,87(a)	4,29(a)
C. sin tolva	4,54(a)	2,79(a)	3,69(a)

Diferentes letras en la misma columna indican datos significativamente diferentes (p = 0,05).

Del análisis estadístico realizado, considerando el rendimiento del cultivo como covariable, se ha concluido que las diferencias entre las velocidades de trabajo de las dos cosechadoras no son significativas (para un nivel de significación del 5%), observándose una gran incidencia del rendimiento del cultivo en la velocidad de trabajo de las dos cosechadoras.

5.2.2 Evaluación de las trayectorias

Por lo general, las dos cosechadoras tienen formas distintas de cosechar las parcelas. La cosechadora con tolva tiene mayor libertad a la hora de definir las trayectorias a seguir, no necesita coordinarse con ningún transporte, lo que hace que varíe más sus trayectorias. El caso contrario lo tenemos en la cosechadora sin tolva, que debe realizar giros que faciliten tanto su maniobra como la maniobra del tractor o camión que trabaja simultáneamente con ella, guardando la distancia mínima para no derramar el forraje cosechado. En las figuras 35, 36 y 37 se muestra, de forma simplificada, un ejemplo de la trayectoria que habitualmente siguen.

En la figura 35 se representa, de forma simplificada, la trayectoria seguida por la cosechadora con tolva, que no acostumbra a variar su trayectoria según la forma de la parcela.

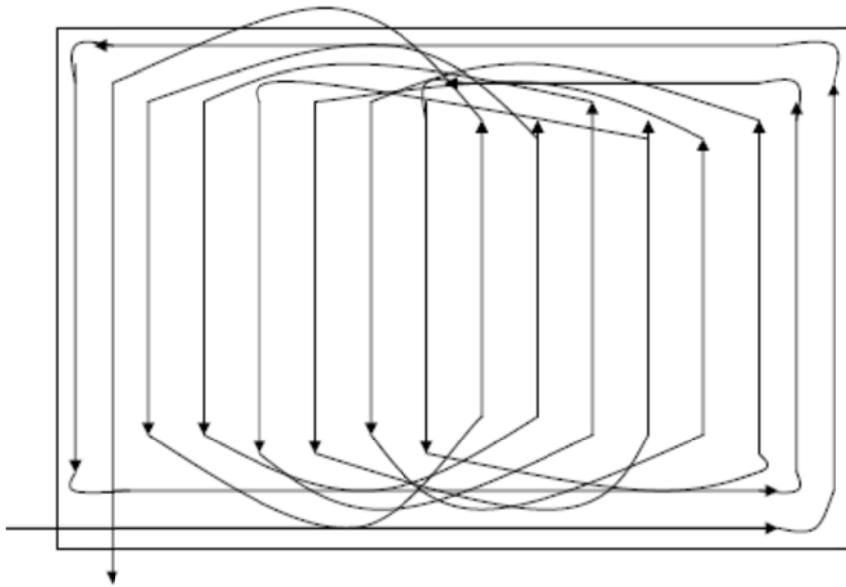


Figura 35. Trayectoria seguida por la cosechadora con tolva

En las figuras 36 y 37 se observa las dos formas en que habitualmente tiende a cosechar las fincas la cosechadora sin tolva. En la figura 36 podemos ver la trayectoria que sigue la cosechadora sin tolva cuando recolecta el maíz en una finca más o menos rectangular, mientras que en la figura 37 observamos la forma de recolectar las fincas que son de una forma más cuadrada o de gran tamaño.

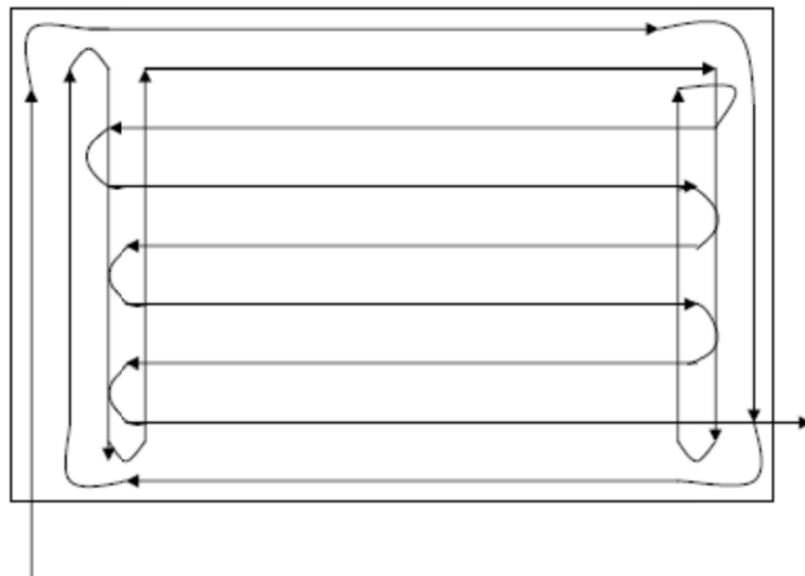


Figura 36. Trayectoria 1, seguida por la cosechadora sin tolva en fincas más o menos rectangulares

5.2.3 Evaluación económica

En la tabla 13 se muestran los resultados de la evaluación económica realizada en las fincas cosechadas con cosechadora con tolva y sin tolva incorporada.

Tabla 13. Comparativa de coste medio discriminado por superficie

	Sup < 0,5 ha	Sup 0,5-1,5 ha	Sup > 1,5 ha	Coste (€ha ⁻¹)
C. con tolva	353,26(a)	345,35(a)	292,63(a)	331,08(a)
C. sin tolva	389,78(a)	356,02(a)	302,93(a)	349,31(a)

Diferentes letras en la misma columna indican datos significativamente diferentes ($p = 0,05$).

Se observa un mayor coste total de las operaciones de ensilado, por hectárea, para las fincas cosechadas con la cosechadora sin tolva y esta diferencia es mayor cuanto menor es la superficie a cosechar. Esto se debe, fundamentalmente, a la mayor capacidad efectiva de trabajo que muestra la cosechadora con tolva frente a la cosechadora sin tolva cuanto menor tamaño tienen las fincas a cosechar.

Sin embargo, el análisis de varianza concluye que las diferencias no son significativas para un nivel de significación del 5% y si consideramos la producción ($t\ ha^{-1}$) como covariable este efecto es todavía más notable, ya que las diferencias se vuelven todavía menos significativas.

A medida que aumenta la superficie a cosechar el coste de las operaciones de cosechado se incrementa de forma lineal para las dos cosechadoras, siendo más notorio este incremento para la cosechadora sin tolva, tal y como se observa en la figura 38. Si bien, tal y como se apunta en el párrafo anterior, las diferencia en los costes de la operación de ensilado no son significativas.

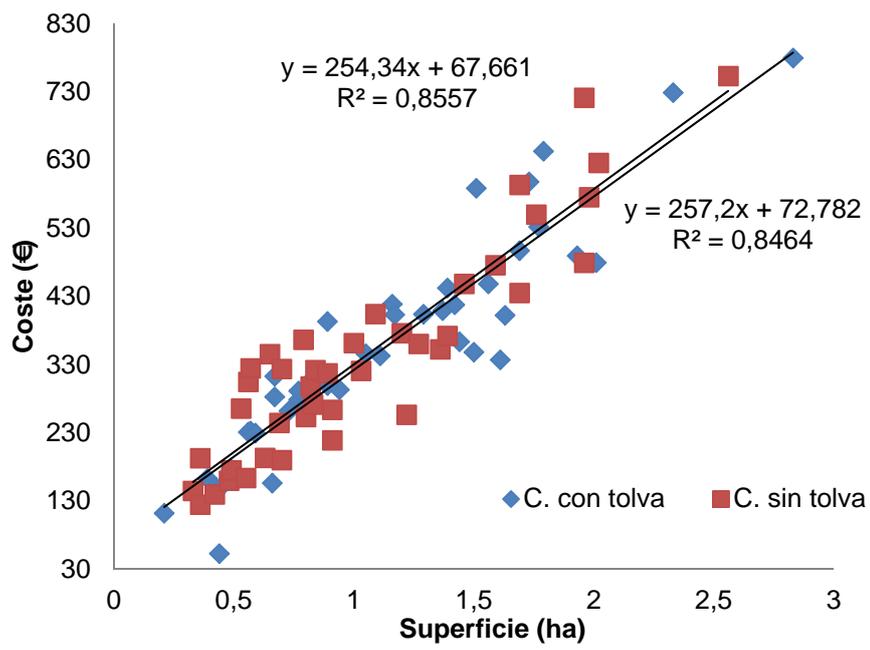


Figura 38. Coste total de la operación de ensilado frente a la superficie cosechada



5.3 CAPACIDAD DE EXTENDIDO Y COMPACTADO EN LOS SILOS

Para el análisis de resultados se ha contrastado el flujo de entrada de forraje en el silo, para cada uno de los días analizados, con la morfología de la sección transversal del silo, y consecuentemente, la pendiente de la rampa de acceso al mismo. Se han identificado los atascos en silo, señalando aquellos períodos en los que los vehículos de transporte de forraje han tenido que esperar para realizar la descarga, ante la incapacidad de los vehículos de extendido de extender y compactar el forraje acumulado. El flujo de entrada de forraje al silo se ha representado por horas, indicando en cada hora la cantidad de flujo que ha entrado en el CAVI ($\text{kg h}^{-1} \text{ MV}$) desde la anterior hora hasta el momento actual. Asimismo se ha registrado si en ese intervalo horario se ha observado algún atasco, anotando en caso afirmativo el número de camiones en espera.

En primer lugar se han analizado los resultados obtenidos en el silo 11.

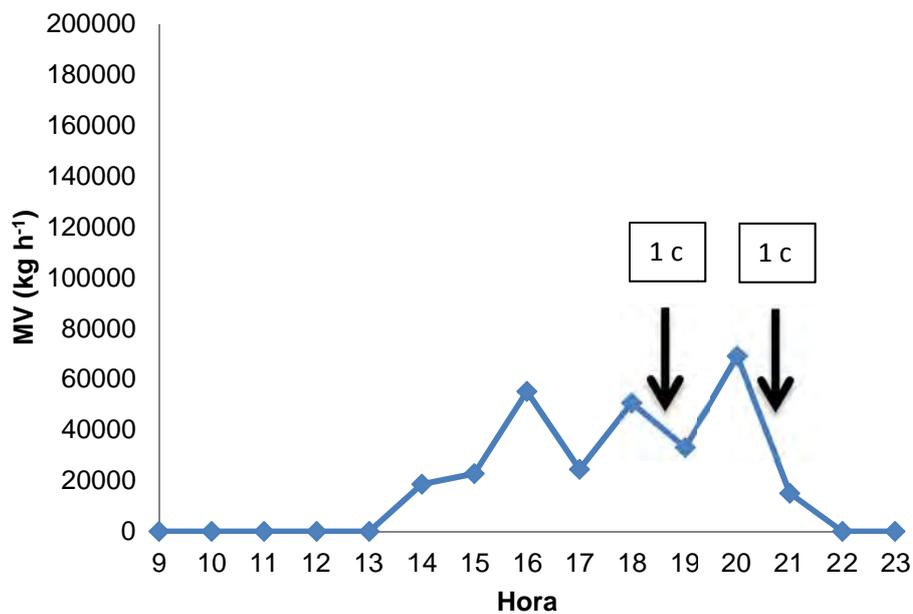


Figura 39. Día 19/09/2012. Flujo de entrada de forraje en silo 11

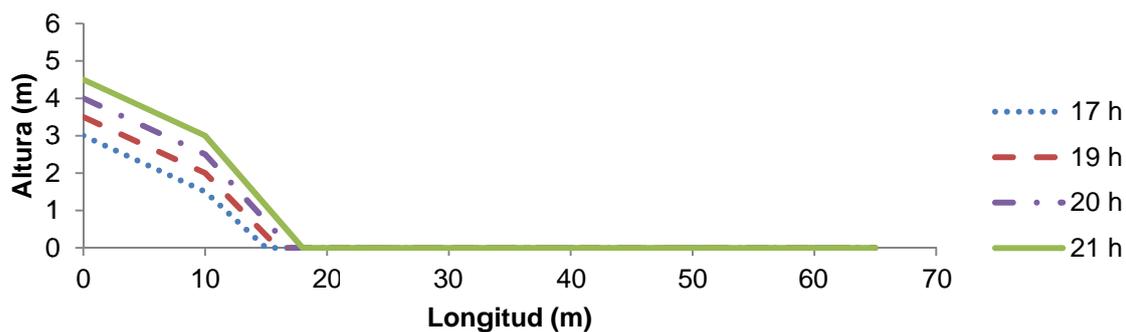


Figura 40. Día 19/09/2012. Evolución del perfil longitudinal (m) en silo 11

Como puede observarse en las figuras 39 y 40, el día 19 con entradas de forraje inferiores a los 70000 kg h^{-1} MV, ya se registran vehículos en espera. Estos atascos pueden atribuirse a una excesiva pendiente longitudinal de la rampa de acceso al silo (en torno al 25 %).

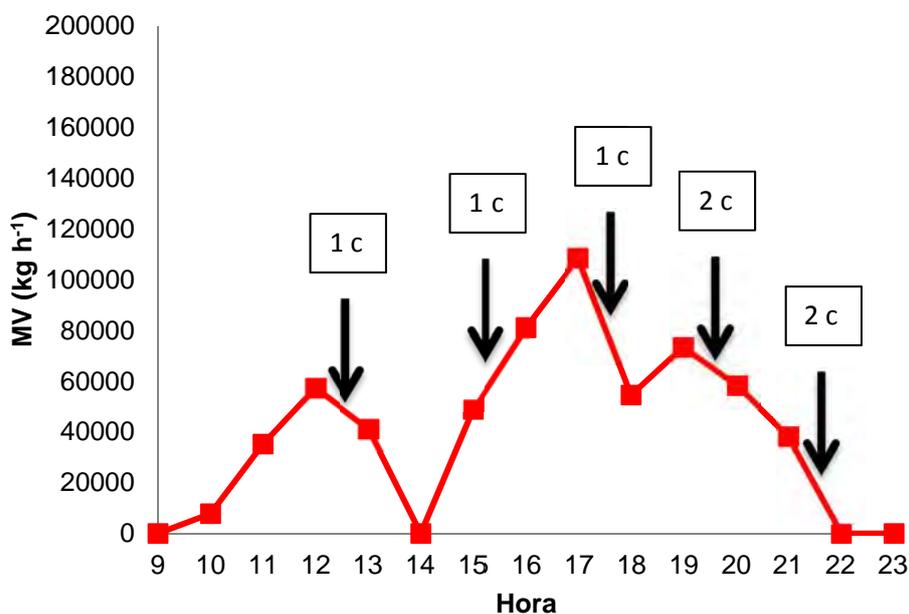


Figura 41. Día 20/09/2012. Flujo de entrada de forraje en silo 11

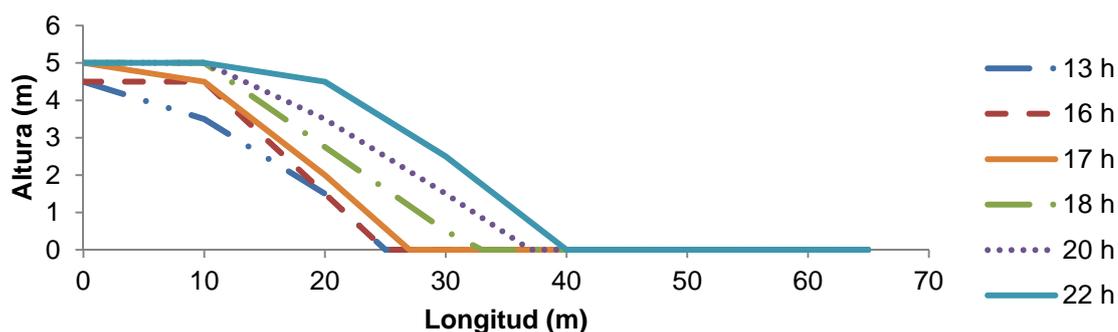


Figura 42. Día 20/09/2012. Evolución del perfil longitudinal (m) en silo 11

Analizando las figuras 41 y 42 se observa cómo se produce un atasco con un flujo de entrada de forraje de 60000 kg h^{-1} , justificado probablemente por la excesiva pendiente de la rampa de acceso (en torno al 35 %). Esta situación se repite a primera hora de la tarde, pero a medida que avanza el llenado se va suavizando la pendiente longitudinal, de forma que entre las 16 y las 17 horas se produce un pico de entrada de forraje de 110000 kg.h^{-1} MV registrándose únicamente un atasco entre las 17 y las 18 horas (es probable que el atasco se retrase respecto al pico de entrada, ya que los equipos no dan extendido y compactado todo el forraje que les ha entrado en la hora anterior). Destacar no obstante como a medida que el silo se va llenando el ritmo de extendido y compactado se reduce, a pesar de que la pendiente de acceso se ha suavizado, si bien sigue siendo elevada (en torno al 25 %). La justificación a este hecho, que se manifiesta en que aparecen colas de 2 vehículos de descarga por hora, se encuentra en que al tenderse la rampa de acceso se incrementa la superficie de extendido y compactado.

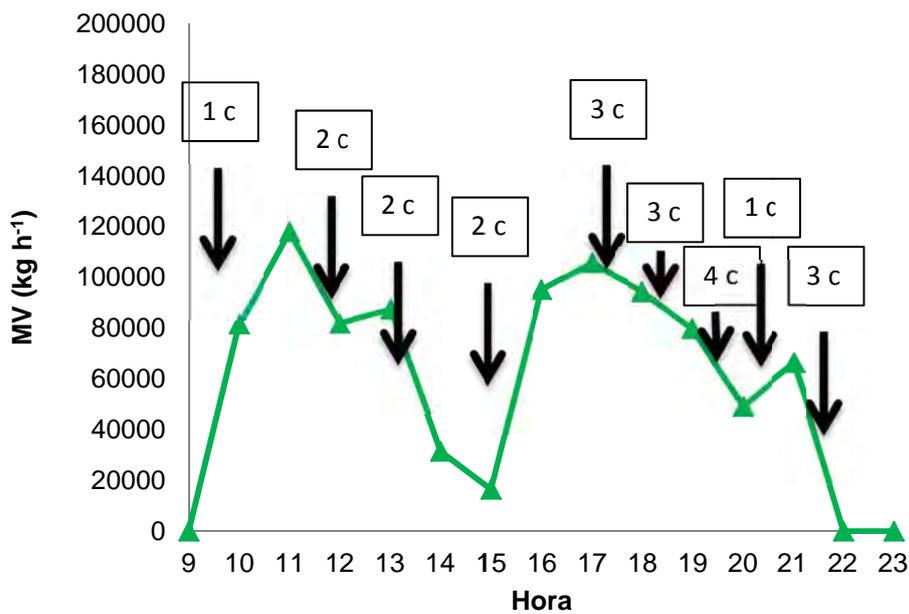


Figura 43. Día 21/09/2012. Flujo de entrada de forraje en silo 11

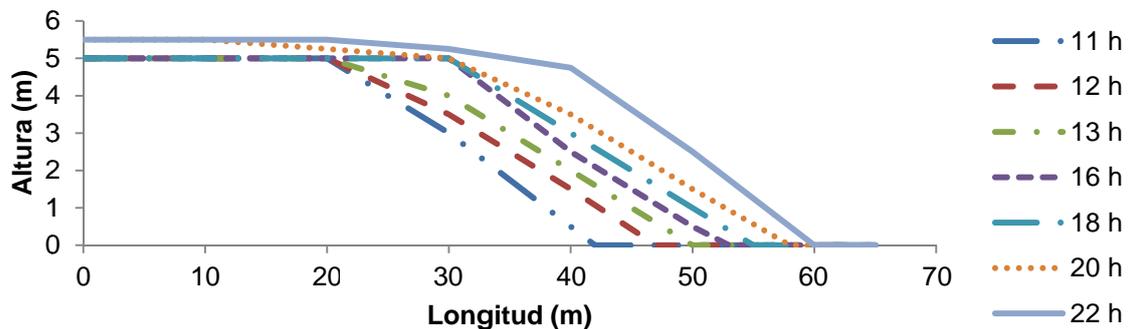


Figura 44. Día 21/09/2012. Evolución del perfil longitudinal (m) en silo 11

En las figuras 43 y 44 se observa como entre las 10 y 11 horas se alcanza un pico de $118000 \text{ kg h}^{-1} \text{ MV}$ y únicamente se registra una espera de 1 camión. Este aspecto indica que, además de la pendiente de la rampa (en este momento en torno al 25 %) y el nivel de llenado del silo, una buena coordinación de los equipos influirá decisivamente en una mayor eficiencia del proceso de llenado. Serían necesarios estudios adicionales que contrastaran la densidad de compactación de las capas de forraje con el rendimiento en el extendido y compactado de los equipos. Se contrastaría de esta forma que el mayor rendimiento en el extendido no se produce por una peor compactación del forraje.

Conforme el silo se aproxima a su nivel de llenado máximo la reducción del área de trabajo, unido a la mayor cota a la que se sitúan los equipos (con la aparición de pendientes transversales para facilitar el drenaje) dificulta la operación de extendido y compactado, lo que se traduce en la aparición de numerosos atascos en la descarga.

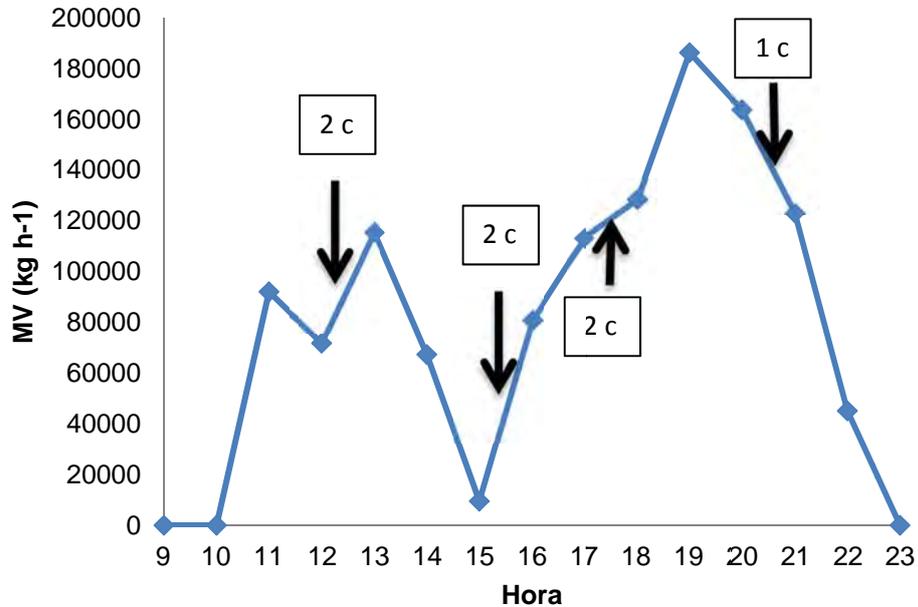


Figura 45. Día 06/10/2012. Flujo de entrada de forraje en silo 12

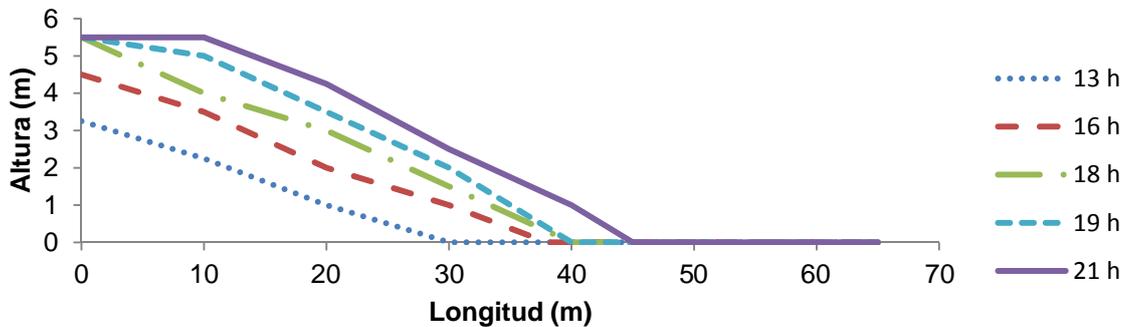


Figura 46. Día 06/10/2012. Evolución del perfil longitudinal (m) en silo 12

En el silo 12, figuras 45 y 46, se ha detectado una mayor capacidad de procesado de forraje, en comparación con el silo 11, derivada fundamentalmente de la existencia de un mayor número de equipos de extendido y compactado. La mayor anchura del silo permite incorporar un equipo a mayores en las labores de extendido y compactado, sin que exista una gran interferencia entre los vehículos implicados en estas tareas. En este silo se ha alcanzado

un pico de entrada de forraje de 186000 kg h⁻¹ MV, frente a un máximo de 118000 kg h⁻¹ MV registrado en el silo 11. Destacar además que la pendiente suave de la rampa de acceso (en torno al 15 %) unido a una adecuada coordinación de los equipos ha permitido que no se produjeran atascos de consideración en el momento de mayor entrada de forraje. No obstante si se han registrado esperas de camión con volúmenes inferiores de entrada de forraje (a partir de 80000 kg h⁻¹ MV), con pendientes de acceso suaves (inferiores al 15 %) lo que parece apuntar hacia problemas puntuales de coordinación de los equipos.

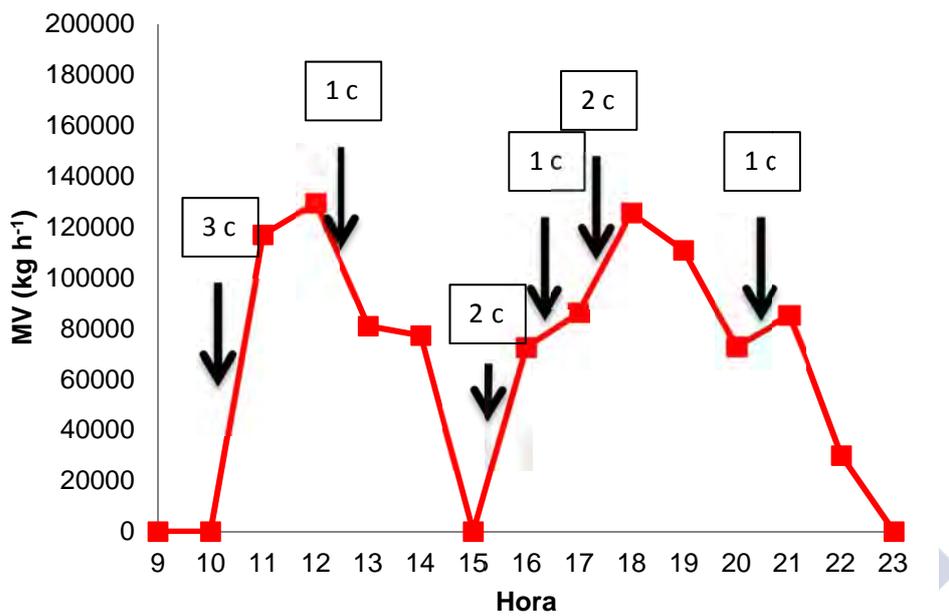


Figura 47. Día 07/10/2012. Flujo de entrada de forraje en silo 12

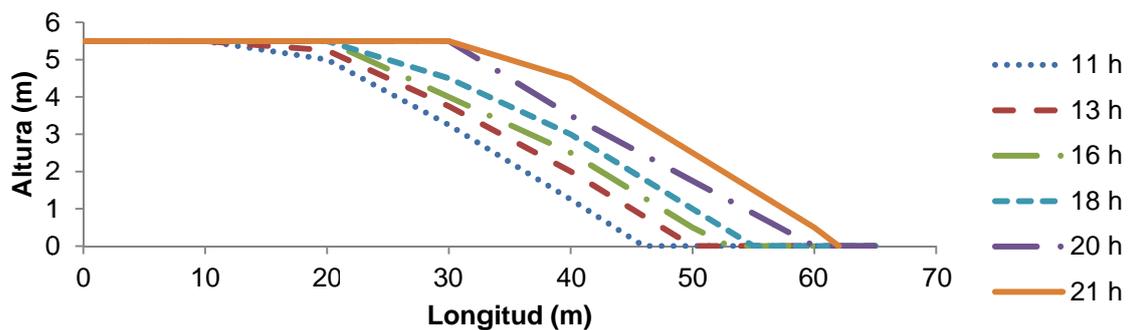


Figura 48. Día 07/10/2012. Evolución del perfil longitudinal (m) en silo 12

En las figuras 47 y 48, de forma similar a lo observado en el silo 11, a medida que el nivel de llenado del silo se incrementa, derivado fundamentalmente del incremento de la extensión de las láminas de forraje a compactar, como consecuencia del incremento de la extensión de la rampa de acceso. Este hecho se pone de manifiesto al comprobar cómo, con cantidades inferiores a 120000 kg h^{-1} MV se han registrado colas que pueden alcanzar los 3 vehículos por hora, sin que los valores de pendiente de la rampa de acceso (en torno al 20 %) sirvan para justificar estos atascos.

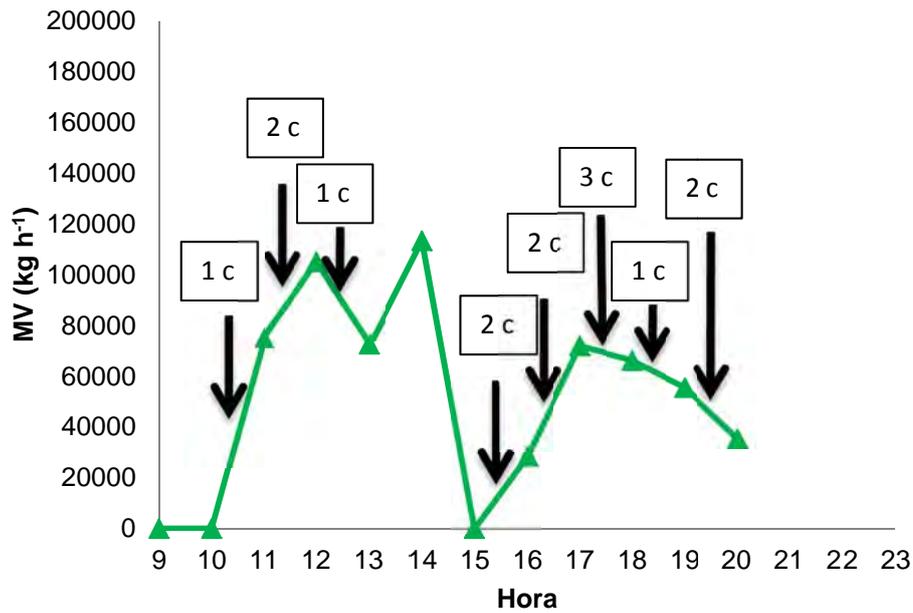


Figura 49. Día 08/10/2012. Flujo de entrada de forraje en silo 12

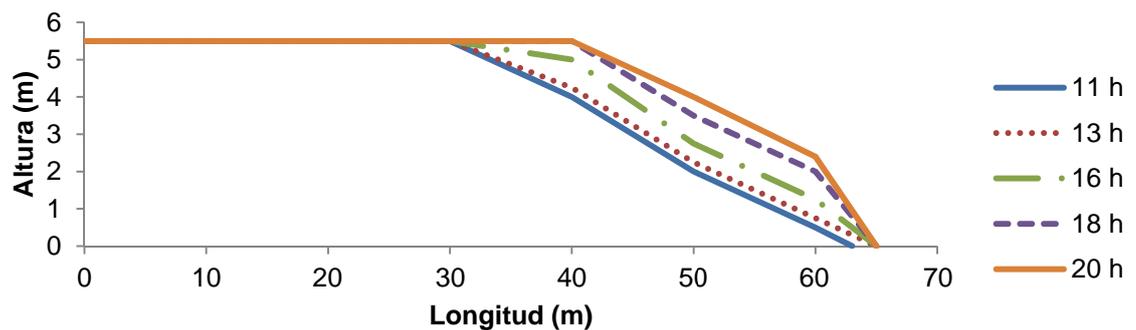


Figura 50. Día 08/10/2012. Evolución del perfil longitudinal (m) en silo 12

Las figuras 49 y 50 muestran como con cantidades de flujo de forraje inferiores a los dos días anteriores, ya se producen atascos. Este efecto se justifica porque, al igual que lo observado en el silo 11, a medida que el silo se aproxima a su capacidad máxima el área de maniobras se reduce, lo que unido a un incremento de la pendiente de la rampa de acceso (que puede alcanzar valores próximos al 40 %) dificulta enormemente las labores de extendido y compactado. De esta forma se observa como con valores de entrada de forraje inferiores a 80000 kg h^{-1} MV los atascos en el silo son continuos.



5.4 EVALUACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA GESTIÓN DE RUTAS

5.4.1 Determinación de los valores óptimos de iteraciones, población inicial y % de mutación

El uso de técnicas heurísticas aplicadas a la gestión de rutas requiere de un ajuste específico de los parámetros para cada escenario considerado (Rochat y Taillard, 1995). Atendiendo a estas consideraciones, antes de analizar la aplicación de gestión de rutas desarrollada, ha sido necesario determinar los valores óptimos de los parámetros iteraciones, mutación y población inicial. Prins (2004) propuso una configuración de estos parámetros que proporcionaban valores razonables cuando se aplicaba el algoritmo a los problemas de gestión de rutas. En este trabajo se han realizado varias simulaciones modificando los valores en rangos lógicos y se han afinado los criterios de búsqueda.

Para ello se ha analizado, para una semana de actividad, qué configuración proporciona mejores resultados en relación al tiempo necesario para obtener la solución. Los valores de tolerancia y peso de tolerancia se han mantenido constantes en 0 días y peso elevado (1000000) para forzar el cumplimiento de las solicitudes. En lo referente a la jornada de trabajo, se ha establecido un horario de trabajo para la máquina de 9 a 14 horas por la mañana y de 16 a 21 horas por la tarde, para todos los días de la semana, ya que son los horarios que hay habitualmente en campaña. En todas las ejecuciones del algoritmo se realizaron cuatro repeticiones y nos quedamos con el promedio de las cuatro.

Se ha trabajado con la aplicación PGC (población inicial mejorada y cruzamientos guiados) por considerarse la más completa. En primer lugar, se ha empezado probando el parámetro de iteraciones, empezando por valores bajos (1000) y llegando hasta valores altos (50000). Los primeros resultados obtenidos con la aplicación no han resultado satisfactorios. La ruta real seguida por la cosechadora en la semana seleccionada tenía un trayecto de 47,42 km y el algoritmo genético daba como resultado distancias alrededor de los 60 km para diferentes valores de iteraciones, obviamente muy por encima de lo deseado. Examinando la secuencia de parcelas, se ha podido observar que el algoritmo era excesivamente rígido a la hora de asignar las fincas a un determinado día de cosecha solicitado por el socio. De este modo, si acababa de cosechar las fincas de un socio a mitad de jornada y si no tenía más

peticiones hasta el día siguiente era posible que el algoritmo hiciese dar vueltas a la cosechadora hasta el siguiente día.

Esto último hizo que se propusiera, al grupo de Investigación Operativa, realizar una modificación en el algoritmo, para que por lo menos una de las fincas solicitadas por el socio fuese cosechada en el día solicitado, pudiendo ir las restantes en el mismo día de la petición, un día antes o un día después, todo esto para tolerancias de 0 días. Una vez realizada esta modificación, se ha probado de nuevo la aplicación y los resultados obtenidos ya han sido más esperanzadores, ya que el algoritmo es capaz de cumplir la fecha de petición del socio y minimizar la distancia recorrida.

Con la versión corregida del algoritmo se ha empezado a jugar de nuevo con todos los parámetros anteriormente expuestos. Se ha observado que a medida que se aumentan las iteraciones también aumenta el tiempo necesario para el cálculo.

Como se muestra en la figura 51, el valor para el número de iteraciones que ha proporcionado una menor distancia es de 10000. Se ha rechazado el valor de 50000 iteraciones porque incrementa el tiempo de ejecución del algoritmo y no se obtiene una reducción de distancia significativa.

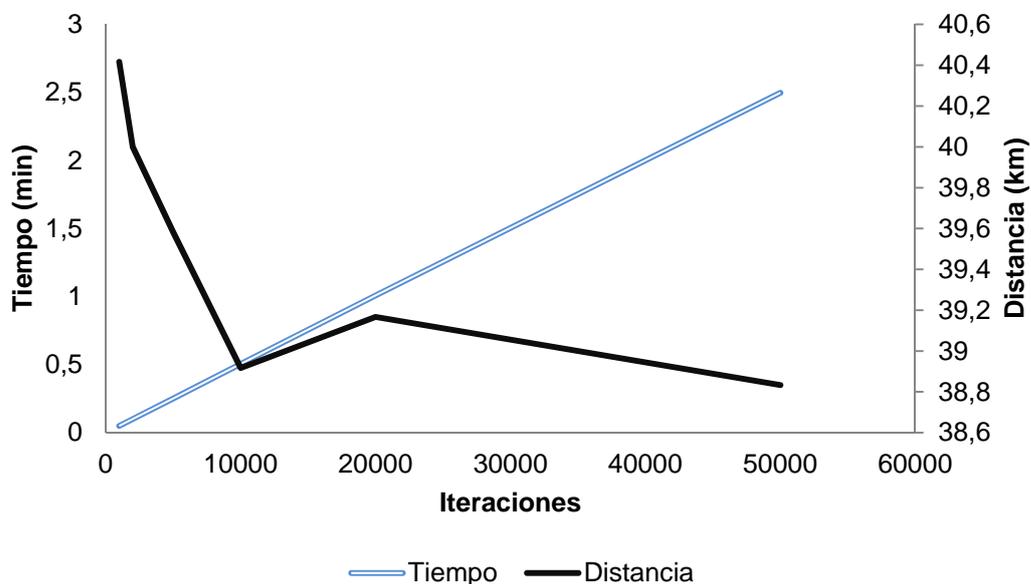


Figura 51. Influencia del número de iteraciones en la longitud de la ruta y en el tiempo requerido para obtener una solución.

Para determinar el valor de la población inicial se han hecho pruebas empezando por valores bajos y teniendo en cuenta que los valores utilizados debían ser múltiplos de 4. En la figura 52 se puede apreciar como a medida que se aumenta la población inicial se reduce la distancia, hasta un punto que, por mucho que se aumente el valor de la población inicial la distancia permanece constante. El valor óptimo de población inicial es 148 puesto que a partir de este valor la distancia recorrida no mejora y el tiempo de cálculo se incrementa.

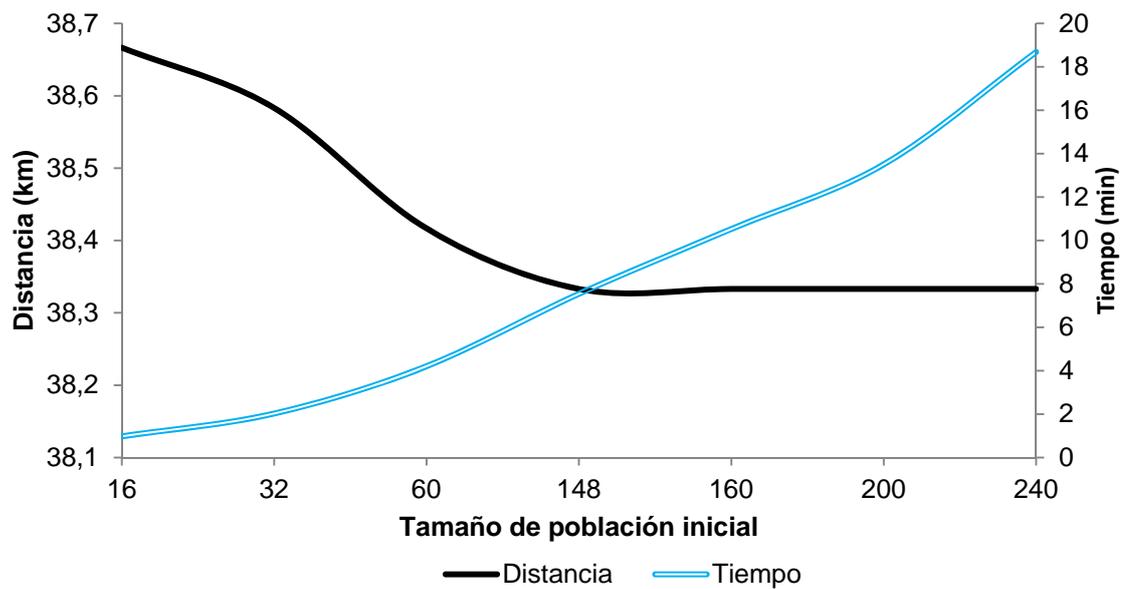


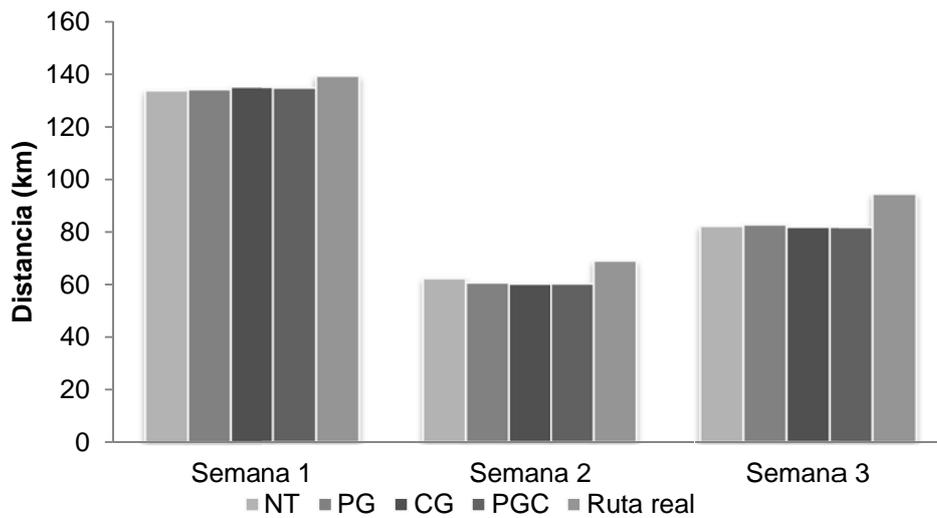
Figura 52. Influencia del tamaño de la población inicial en la longitud de la ruta y en el tiempo requerido para obtener una solución.

El último parámetro estudiado ha sido el de la mutación. Se ha observado que a medida que aumenta el porcentaje de mutación aumenta el tiempo de ejecución del algoritmo y la distancia permanece invariable. En consecuencia, trabajaremos con aquel valor que necesite el menor tiempo de cálculo, y para este caso ese valor es 0,1.

A modo de resumen, los valores que han proporcionado mejores resultados en nuestros ensayos han sido 10000 iteraciones, un tamaño de población inicial de 148 soluciones y un % de mutación del 10 %.

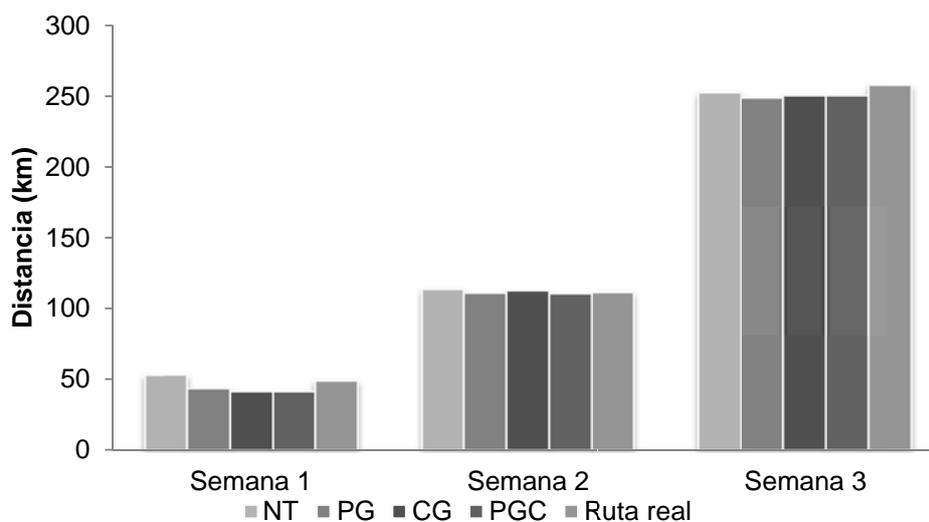
5.4.2 Evaluación de la aplicación

Como se ha expuesto anteriormente, y con el objetivo de analizar el impacto que tiene el número de datos en el comportamiento de los algoritmos utilizados, se han estudiado los resultados obtenidos con las 4 versiones del genético para cada una de las semanas consideradas, dos semanas fusionadas y con las tres semanas fusionadas. En las figuras 53 y 54 se observan los resultados obtenidos, para las dos cosechadoras, en cada una de las tres semanas analizadas.



Datos cosechadora nº 6

Figura 53. Distancias obtenidas en la cosechadora nº6 con cada uno de los algoritmos evaluados frente a la solución real



Datos cosechadora nº 7

Figura 54. Distancias obtenidas en la cosechadora nº7 con cada uno de los algoritmos evaluados frente a la solución real

Observando los resultados reflejados en la figura 54 comprobamos que para la primera y segunda semana la versión del algoritmo original (NT) muestra un comportamiento nada satisfactorio puesto que no es capaz de mejorar la distancia alcanzada en la planificación realizada de forma manual. La tercera semana, es capaz de mejorar la distancia obtenida respecto a la planificación manual, pero sigue dando resultados peores que los ofrecidos por el resto de versiones. Del mismo modo, en la figura 53, podemos comprobar como la versión NT es la que ofrece peores resultados al compararla con las otras versiones del genético. Se puede concluir que, de las cuatro versiones analizadas, la versión NT es la que proporciona peores resultados.

Viendo el comportamiento, mostrado en la figura 54, para la semana 1 del algoritmo con población inicial mejorada (PG) se observa que este algoritmo proporciona una distancia superior a la de las versiones PGC y CG. Sin embargo, esta diferencia ya no es tan nítida para las semanas 2 y 3. Para analizar estos datos, hay que tener en cuenta que la semana 2 tiene 45 parcelas repartidas entre 7 socios y la semana 3 tiene el mismo número de parcelas repartidas entre 9 socios, frente a las 38 parcelas de la primera semana, que además están más próximas entre sí. Esto mismo, se pone de manifiesto al analizar los resultados de la primera semana de la cosechadora nº6, figura 53. Todo parece indicar que la versión PG, sin que sea la mejor, si

mejora resultados, o por lo menos se aproxima a las mejores versiones cuando hay un número de datos elevado y las fincas están más distantes en el espacio.

En lo que respecta al genético con cruzamientos guiados (CG) se ha verificado que su comportamiento es bastante similar al de la versión con población inicial mejorada y cruzamientos guiados (PGC), aunque en la mayoría de los casos ofrece resultados peores que esta última, motivados quizás por la influencia positiva que ejerce la inclusión de la población inicial mejorada.

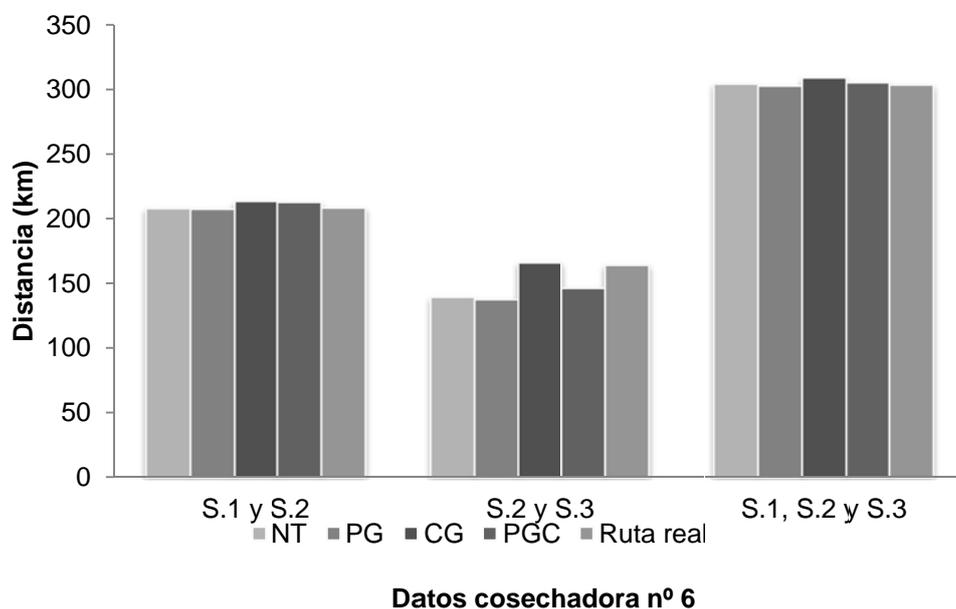


Figura 55. Distancias obtenidas, para la cosechadora nº6, con cada uno de los algoritmos evaluados agrupando semanas

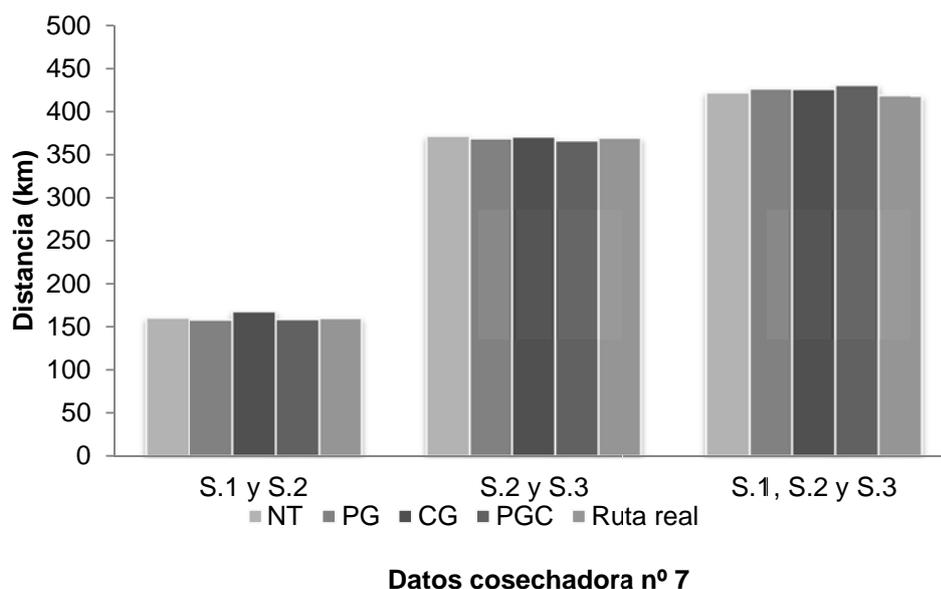


Figura 56. Distancias obtenidas, para la cosechadora nº7, con cada uno de los algoritmos evaluados agrupando semanas

Pasando ya a analizar los resultados de grupos de semanas, se observa en las figuras 55 y 56 como la versión PG es la que se comporta de manera más satisfactoria. De nuevo podemos comprobar como la versión NT no ofrece buenos resultados, al igual que sucedía en las semanas individuales.

Se puede observar que el enfoque heurístico ofrece un buen resultado cuando se considera un número pequeño de campos. Pero si este número aumenta (debido a la unión de varias semanas) los resultados empeoran, acorde a lo observado por otros autores (Matthews, Craw, MacKenzie, y Sibbald, 1999; Mahoma, Shahjalal, Faruque, y Hasan, 2011). De hecho, si todas las semanas son tratadas en su conjunto (253 parcelas a cosechar), los resultados son peores (es decir, más kilómetros) que la ruta determinada manualmente por el técnico.

Para analizar en más detalle este comportamiento, y evaluar el impacto que tiene sobre los resultados el número de parcelas a cosechar, en las tabla 14 y 15 se muestran los valores obtenidos con cada uno de los algoritmos considerados.

Tabla 14. Distancias y ahorros obtenidos con los distintos algoritmos, cosechadora n°6

Ruta real	PGC			PG		CG		NT	
	Distancia (km)	Distancia (km)	% reducción						
S1	139,42	134,92	3,23	134,17	3,77	135,17	3,05	133,75	4,07
S2	69,21	60,57	12,48	60,90	12,01	60,49	12,60	62,57	9,59
S3	94,63	82,00	13,35	82,92	12,37	82,00	13,35	82,33	13,00
S1_S2	208,63	212,90	-2,05	207,63	0,48	213,60	-2,38	208,10	0,25
S2_S3	163,84	146,56	10,55	137,75	15,92	165,67	-1,12	139,59	14,80
S1_S2_S3	303,26	305,00	-0,57	302,40	0,28	308,67	-1,78	303,78	-0,17

Tabla 15. Distancias y ahorros obtenidos con los distintos algoritmos, cosechadora n°7

Ruta real	PGC			PG		CG		NT	
	Distancia (km)	Distancia (km)	% reducción						
S1	48,82	41,17	15,67	43,34	11,22	41,22	15,57	53,09	-8,75
S2	111,8	110,87	0,83	111,29	0,46	112,96	-1,04	113,87	-1,85
S3	257,85	250,33	2,92	248,83	3,50	250,33	2,92	252,5	2,07
S1_S2	160,62	159,21	0,88	158,83	1,11	168,37	-4,83	160,98	-0,22
S2_S3	369,65	366,56	0,84	368,97	0,18	370,92	-0,34	371,84	-0,59
S1_S2_S3	418,47	430,33	-2,83	426,17	-1,84	425,75	-1,74	421,83	-0,80

En la tabla 15 se aprecia con mayor nitidez los valores reflejados en la figura 54, confirmando que, en el análisis semana a semana, el algoritmo NT proporciona peores resultados que el resto. En relación a los algoritmos PG y CG los resultados son similares, proporcionando PG mejores valores las semanas 2 y 3 y siendo mejores los resultados obtenidos con CG la semana 1.

A medida que se incrementa el número de parcelas a cosechar, por la fusión de varias semanas, se observa un cambio de comportamiento, de forma que el algoritmo CG proporciona peores resultados que la solución real, en todos los casos considerados, por lo que se deduce que está muy condicionado por el número de parcelas a procesar. Consecuentemente los algoritmos que proporcionan mejores resultados son el PG y el PGC, si bien este último empeora en mayor medida su comportamiento al incrementarse el número de parcelas. Destacar como, en la unión de las semanas 2 y 3, los ahorros proporcionados por los

heurísticos son muy reducidos. Esa tendencia ya se había observado en el análisis semanal, y es derivada de una eficiente planificación de las rutas por los técnicos de la cooperativa.

Observando la tabla 14, comprobamos que cuando se trata de planificaciones de semanas agrupadas la versión con población inicial mejorada es la que ofrece los mejores valores, igual que podemos apreciar en los datos de la cosechadora n°7. El resto de versiones ofrecen, en algunos casos, resultados que incluso llegan a superar a los de la ruta real, como por ejemplo, la versión con cruzamientos guiados.

Del mismo modo se observa que, en la planificación de semanas agrupadas el genético ofrece mayor distancia que cuando se suma la distancia de las semanas que las conforman por separado. Obviamente, hay que tener en cuenta que en los grupos de semanas también se contabiliza la distancia de unión entre la última parcela y la primera de la siguiente semana. En algunos casos, alguna versión, ofrece resultados incluso superiores a los de la ruta real, lo que parece indicar que el genético tiene problemas cuando el número de datos es importante.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los distintos niveles de tolerancia aplicados a las fechas de petición de cosecha de los socios:

Tabla 16. Comparación de las distancias obtenidas con distintos niveles de tolerancia con el algoritmo PGC

		Tolerancia 0 días			Tolerancia 1 día		Tolerancia 2 días	
		Distancia (km)			Distancia (km)	% reducción	Distancia (km)	% reducción
Cosechadora n° 6	S1	134,92	134,92	0,00	128,28	4,92		
	S2	60,57	57,45	5,15	56,43	6,84		
	S3	82,00	76,33	6,91	76,11	7,18		
Cosechadora n° 7	S1	41,17	40,68	1,19	39,00	5,27		
	S2	110,87	108,19	2,42	101,23	8,69		
	S3	250,33	236,58	5,49	236,58	5,49		

En la tabla 16, se puede observar que, la introducción de días de tolerancia tiene efectos positivos puesto que da como resultado una disminución de la distancia necesaria para llegar a todas las parcelas en el orden establecido. Este es el comportamiento esperado, ya que altos niveles de tolerancia también aumentan el espacio de soluciones factibles.

Si los resultados proporcionados por la aplicación se comparan, teniendo en cuenta niveles de tolerancia de 0 y 2 días, el ahorro total se encuentra cerca del 6%. Es más, si comparamos los resultados con la ruta real, este ahorro será mayor, elevándose al 20% para la primera semana de la cosechadora n° 7.

El grado en que se rebaja la distancia depende de lo agrupadas que estén las parcelas y del orden espacial que sigan en comparación con la ruta real. Así, por ejemplo en las semanas 1 y 2 de la cosechadora n°7 no hay grandes diferencias entre tolerancia nula y 1 día de tolerancia. Sin embargo, en las semanas 1 y 2 de la cosechadora n°6 y en la semana 3 de la cosechadora n°7 las diferencias ya son apreciables. Esto puede deberse a que la semana 3 es una semana que necesita de una ruta de muchos km para poder satisfacer las peticiones de todos los socios.

Tabla 17. Comparación de las distancias obtenidas con distintos niveles de tolerancia con el algoritmo PG

		Tolerancia 0 días		Tolerancia 1 día		Tolerancia 2 días	
		Distancia (km)	Distancia (km)	% reducción	Distancia (km)	% reducción	
Cosechadora n° 6	S1	134,17	134,00	0,13	128,59	4,16	
	S2	60,90	56,73	6,85	56,48	7,26	
	S3	82,92	76,59	7,63	75,94	8,42	
Cosechadora n° 7	S1	43,34	43,09	0,58	42,76	1,34	
	S2	111,29	110,29	0,90	96,45	13,33	
	S3	248,83	242,17	2,68	236,20	5,08	

Tabla 18. Comparación de las distancias obtenidas con distintos niveles de tolerancia con el algoritmo CG

		Tolerancia 0 días	Tolerancia 1 día		Tolerancia 2 días	
		Distancia (km)	Distancia (km)	% reducción	Distancia (km)	% reducción
Cosechadora n° 6	S1	135,17	134,92	0,18	128,42	4,99
	S2	60,49	57,07	5,65	57,41	5,09
	S3	82,00	76,34	6,90	76,42	6,80
Cosechadora n° 7	S1	41,22	40,89	0,80	38,22	7,28
	S2	112,96	111,80	1,03	95,85	15,15
	S3	250,33	236,83	5,39	238,17	4,86

A la vista de los resultados mostrados en las tablas 17 y 18, es necesario destacar el buen comportamiento de la versión PGC. No obstante, se observa que el aumento de los niveles de tolerancia tiene un efecto positivo en todas las versiones del genético analizadas.

En lo que respecta al genético con cruzamientos guiados se verifica que su comportamiento es bastante similar al de la versión PGC, aunque en la mayoría de los casos ofrece unos resultados peores que esta última, motivadas quizás por la influencia positiva que ejerce la inclusión de la población inicial mejorada.

5.4.3 Determinación del número óptimo de camiones

El número óptimo de camiones que garantiza el mínimo coste de la cosecha se ha determinado con el módulo de flota, de acuerdo con el método explicado en el epígrafe 4.5.2.1. Si el número de camiones asignados al transporte de la cosecha, en condiciones reales, es inferior a la propuesta por el módulo de la flota, la cosechadora registrará tiempos de espera excesivos, como se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Análisis de los tiempos de espera de la cosechadora

	Semana	Parcelas	Nº de parcelas con tiempos excesivos de espera	Tiempo total de espera (h)	Tiempo espera con nº óptimo de transportes (h)	Ahorro con nº óptimo de transportes (h)
Cosechadora nº6	1	48	0	0,08	0,08	0
	2	35	4	1,24	0,2	1,04
	3	42	4	1,76	0,64	1,12
	Total	125	8	3,08	0,92	2,16
Cosechadora nº7	1	38	6	4,77	0,53	4,24
	2	45	2	0,69	0,27	0,42
	3	45	7	2,12	0,26	1,86
	Total	128	15	7,58	1,06	6,52

Puede observarse que, en un total de 23 parcelas, el número de camiones realmente asignados no ha sido el óptimo. Este número representa el 9,01% del número total de parcelas, lo que sugiere la necesidad de una mejor gestión del transporte para corregir el intervalo de tiempo de 8,68 horas pérdidas en espera de camión con respecto al escenario óptimo. También se ha observado un tiempo de espera de 1,98 horas para el cual el coste de añadir un nuevo medio de transporte no supone un ahorro.

5.4.4 Evaluación económica de los ahorros conseguidos

Para el análisis económico de los ahorros conseguidos con la utilización de los algoritmos heurísticos, se han considerado las planificaciones realizadas semana a semana, por ser las que han reportado un mayor ahorro en km recorridos y por ser el tipo de planificación más usada actualmente por la Cooperativa.

Para trasladar los ahorros en tiempos de desplazamiento a unidades monetarias es necesario conocer el coste horario de funcionamiento de la máquina que, para los socios de la cooperativa, es de 315 €h⁻¹, para la cosechadora y de 50 €h⁻¹ para el medio de transporte. Además se ha utilizado para la conversión de distancia a tiempo, una velocidad media de desplazamiento de 20 km h⁻¹. Los ahorros se han evaluado teniendo en cuenta el desplazamiento y los tiempos de espera (consecuencia del módulo de rutas y del módulo de

flota, respectivamente). El ahorro en tiempos de espera se ha determinado como el ahorro que supone la incorporación de nuevos medios de transporte.

En la tabla 20 se observan los resultados obtenidos con el algoritmo PGC, por ser el algoritmo que nos ha proporcionado un mayor ahorro. No obstante, es necesario señalar que los ahorros obtenidos con los algoritmos PG y CG han sido similares a los obtenidos con el algoritmo PGC y muy superiores a los obtenidos con el algoritmo NT.

Tabla 20. Ahorros conseguidos con el algoritmo PGC

		Ahorro en desplazamientos (€)	Ahorro tiempos de espera (€)	Ahorro total (€)
Cosechadora nº 6	S1	72,45	0,00	72,45
	S2	135,45	122,85	258,30
	S2	198,45	72,45	270,90
	S1_S2_S3	406,35	195,30	601,65
Cosechadora nº 7	S1	119,70	705,60	825,30
	S2	15,75	44,10	59,85
	S3	119,70	267,75	387,45
	S1_S2_S3	255,15	1017,45	1272,60

Si observamos conjuntamente los resultados de las dos cosechadoras, los ahorros obtenidos debidos a la disminución de los tiempos de espera son mayores que los obtenidos con el módulo de gestión de rutas. Sin embargo, este comportamiento es diferente cuando nos fijamos en la cosechadora nº6. Esto se debe a que aumenten los costes de recolección debido a la introducción de un nuevo medio de transporte.

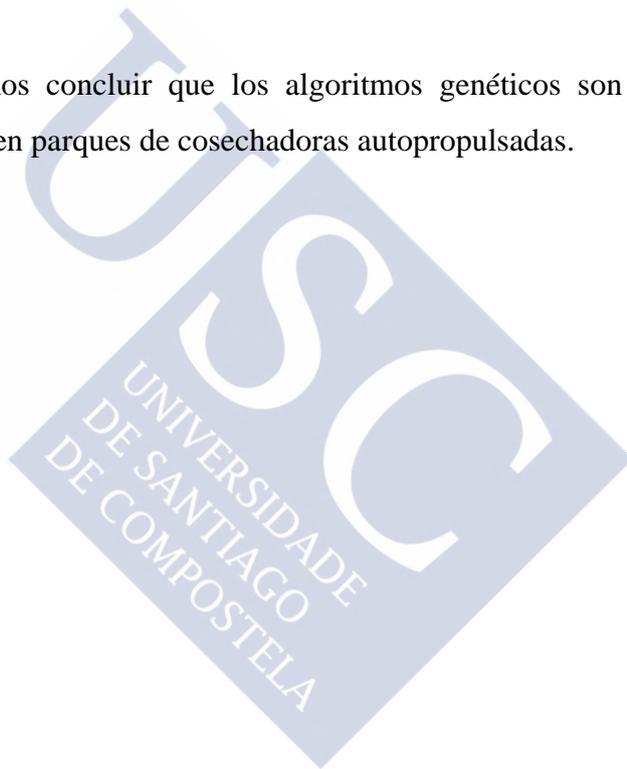
En general, se observa que el sistema de ayuda a la decisión supone un ahorro medio de 937,13 € para el periodo de estudio.

Para evaluar el ahorro global por campaña se ha supuesto que esta tendencia de las tres semanas analizadas se amplía al total de la campaña (con una duración aproximada de 6 semanas) y que el ahorro obtenido sería similar para las 4 cosechadoras que posee la cooperativa, resultando un ahorro de 7497 €

Si suponemos que se pueden lograr unos ahorros similares para la campaña de recolección del raigrás, estaríamos hablando de un ahorro anual de 14994 € o lo que es lo mismo, un ahorro superior a los 3748 € por cosechadora y año.

A estos ahorros, habría que sumarles las horas de trabajo de los técnicos para planificar el trabajo de las cosechadoras manualmente y también debería considerarse el coste de oportunidad. El sistema de ayuda a la decisión no sólo supone un ahorro en términos económicos, sino que permite que las cosechadoras tengan más tiempo disponible para la recolección de otras parcelas. Esta particularidad es especialmente importante en nuestra latitud, ya que el periodo de recolección está muy limitado por las condiciones meteorológicas.

Consecuentemente, podemos concluir que los algoritmos genéticos son herramientas válidas para la gestión de rutas en parques de cosechadoras autopropulsadas.



6 CONCLUSIONES

Del examen y posterior análisis de los datos que se reflejan en el capítulo de “Resultados y discusión” se pueden extraer una serie de conclusiones que se relacionan a continuación.

A partir de los resultados obtenidos en los análisis de ciclo realizados se deduce que el sistema propuesto por Buckmaster, en nuestras condiciones, tiende a mayorar la utilización de la cosechadora, frente a lo realmente observado. La asunción de una simplificación en el análisis de ciclos individuales, debido a no tener registrados los tiempos de espera de camión, conduce a mayorar la eficiencia del transporte con este método. El método Buckmaster proporcionará resultados más fiables en este caso.

Por otra parte, en el mismo estudio se ha observado que los vehículos de extendido y compactado de forraje en el silo en ningún momento condicionan la duración del ciclo total (es una actividad con gran holgura en el proceso). Se ha observado además que, a pequeñas distancias entre finca y silo, será la capacidad efectiva de la cosechadora ($t\ h^{-1}$) la que determinará el número de camiones que debemos utilizar para no incrementar los costes. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia pierde importancia la capacidad de la cosechadora y gana importancia la velocidad media del transporte.

No obstante considerar únicamente como variables de decisión la capacidad efectiva de la cosechadora y la distancia entre finca y silo no parece suficiente para determinar el número de camiones que debemos utilizar en la recolección del maíz forrajero de una parcela. Será necesario considerar como variables adicionales la velocidad media, la geometría de la parcela y su superficie entre otras.

De los resultados obtenidos en este trabajo puede concluirse que usando la función de regresión podremos utilizar el análisis de ciclos para planificar el número de transportes necesarios, mientras que con el método de Buckmaster será necesario ir variando el número de unidades de transportes hasta obtener el número más rentable.

En relación con el estudio realizado con los dos tipos de cosechadoras analizadas, con tolva y sin tolva, se concluye que no hay diferencias significativas a la hora de cosechar las fincas. Si bien, la cosechadora sin tolva es más sensible al incremento de superficie de la parcela. La mayor velocidad que posee la cosechadora con tolva incorporada se compensa con el mayor número de kilómetros que recorre para cosechar la misma superficie y el tiempo que

necesita invertir para la descarga de forraje al transporte. En fincas de más de 1,5 hectáreas los kilómetros recorridos por la cosechadora con tolva son significativamente mayores que los recorridos por la cosechadora sin tolva (para un nivel de significación del 5%).

No obstante las distintas trayectorias seguidas a la hora de cosechar las parcelas por las dos cosechadoras, no se traducen en una mayor o menor capacidad efectiva de trabajo (ha h^{-1}), aun cuando la cosechadora con tolva tiene una mayor libertad de movimientos que la cosechadora sin tolva, que debe realizar giros que faciliten tanto su maniobra como la maniobra del transporte que la acompaña. A pesar del menor peso, la cosechadora sin tolva es más lenta debido, fundamentalmente, a la coordinación necesaria entre la cosechadora y el transporte en el que descarga el maíz.

Los diferentes costes horarios de las dos cosechadoras, unido a que no hay diferencias en la capacidad efectiva de trabajo (ha h^{-1}), hace que no haya diferencias significativas en los costes de cosecha. Por lo tanto, la única limitación a la hora de plantear la cosecha será el número de transportes disponibles, la cosechadora sin tolva tiene mayor demanda de transporte.

Respecto al estudio del proceso de descarga en silo se puede concluir que la anchura del silo influirá en la capacidad de forraje a ensilar, derivado fundamentalmente por la posibilidad de introducir un mayor número de equipos para la realización de las labores de extendido y compactado. Adicionalmente se puede concluir que, a medida que avanza el llenado del silo se reduce la capacidad de procesado de forraje, debido a una mayor extensión de las capas a compactar, por el incremento de la extensión de la rampa de acceso. Cuando el silo se aproxima a su capacidad máxima se reduce significativamente el área de actuación y se incrementan las pendientes transversales, lo que dificulta la coordinación de los equipos de compactado, haciéndose más notable la reducción en el rendimiento del llenado.

En relación a la incidencia de la pendiente de la rampa de acceso al silo, se ha observado que con valores inferiores al 20 % adquiere mayor importancia una correcta coordinación de los equipos de extendido y compactado, frente al impacto de la propia rampa. Valores de pendiente de la rampa superiores al 25 % parecen tener un efecto ralentizador sobre las operaciones de llenado, probablemente derivado de una mayor dificultad de trabajo de los equipos en pendientes elevadas. No obstante son necesarios estudios adicionales que relacionen el volumen de forraje extendido y compactado con la densidad de dicho forraje.

La implementación de herramientas de ayuda a la decisión para la gestión de rutas de las cosechadoras ha mostrado ser fundamental en aras a una mayor eficiencia en el proceso de cosechado. No obstante la necesidad de recurrir a métodos heurísticos al enfrentarnos a problemas NP Hard, hace que la calidad de las soluciones obtenidas varíe sustancialmente en las distintas simulaciones realizadas.

En general, la utilización de algoritmos genéticos ofrece mejores resultados que la programación manual de las rutas, aunque cuando aumenta el número de parcelas los resultados de la solución heurística empeoran. Cuando se incrementan el número de parcelas (agrupación de semanas) todos los algoritmos empeoran su comportamiento, si bien este empeoramiento se hace más acusado en el algoritmo con cruzamientos guiados. La versión con población inicial mejorada y cruzamientos guiados ofrece los mejores resultados en la planificación por semanas, sobre todo con uno y dos días de tolerancia. Con tolerancia nula la idoneidad ya no resulta tan apreciable, ya que las otras versiones, en ocasiones, también se sitúan como la opción más válida.

La dispersión de las parcelas y la relación del número de parcelas por propietario no han afectado al comportamiento del heurístico. Sin embargo, si se consideran los niveles de tolerancia, las distancias recorridas por la cosechadora se reducen significativamente, con ahorros que pueden alcanzar hasta el 20%, en comparación con las distancias reales.

Si no se consideran los niveles de tolerancia, se observa que el proceso de recolección es más sensible a una gestión correcta del transporte que a una gestión óptima de rutas. En general, la utilización de la aplicación con un número de días de tolerancia elevado tiene un efecto positivo, ya que contribuye a que la reducción de las distancias sea mayor y, consecuentemente, que el ahorro económico también sea mayor.

Por último, se puede concluir que la utilización de algoritmos genéticos en la planificación de las rutas de las cosechadoras autopropulsadas de forraje se traduce en ahorros significativos de tiempo y dinero para la cooperativa, proporcionando una mayor disponibilidad de la cosechadora de forraje autopropulsada, lo cual constituye una característica clave cuando hay limitaciones de tiempo causadas por la mala climatología.



7 BIBLIOGRAFÍA

- Adesogan, A. T. & Newman, Y. C. (2010). *Silage harvesting, storing, and feeding*, University of Florida, IFAS Extension, www.edis.ifas.ufl.edu.
- Ali, O., Verlinden B. & Van Oudheusden, D. (2009). *Infield logistics planning for crop-harvesting operations*, *Engineering Optimization*, 41(2), 183-197.
- Almarales, A. & Frias, W. L. (1999). *Estudio de tres factores durante la cosecha mecanizada del arroz*, Libro resumen del Primer Congreso de Arroz de Riego y Secano del área del Caribe, Cuba.
- Amiama, C., Bueno, J., Álvarez, C. J. & Pereira, J.M. (2005). *Diseño e implementación de un sistema de localización vehicular y telemetría en cosechadoras de forrajes*, III Congreso de Agroingeniería. Sociedad Española de Agroingeniería. León.
- Amiama, C., Bueno, J., Álvarez, C. J. & Pereira, J. M. (2008a). *Design and field test of an automatic data acquisition system in a self-propelled forage harvester*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(2), 192-200.
- Amiama, C., Bueno, J. & Álvarez, C. J. (2008b), *Influence of the physical parameters of fields and of crop yield on the effective field capacity of a self-propelled forage harvester*, *Biosystems Engineering*, 100 (2), 198-205.
- Amiama, C., Bueno, J., & Pereira, J. M. (2010). *Prediction of effective field capacity in forage harvesting and disk harrowing operations*, *Transactions of ASABE*, 53 (6), 1739-1745.
- Amponsah, S. K. & Salhi, S. (2004). *The investigation of a class of capacitated arc routing problems: the collection of garbage in developing countries*, *Waste Management*, 24 (7), 711-721.
- Anderson, A. W. (1988), *Factors affecting machinery costs in grain production*, American Society of Agricultural Engineers, Microfiche collection, USA.
- Angelelli, A. & Speranza, M. (2002). *The application of a vehicle routing model to a waste-collection problem, Two case studies*, *Journal of the Operational Research Society*, 9, (53), 944-952.

- Ansorge, D. & Godwin, R. J. (2007). *The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction, Part 1: Single axle-studies*, Biosystems Engineering, 98 (1), 115-126.
- ASAE STANDARDS, 48TH ED, D497.4. (2001). *Agricultural machinery management data*, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- ASAE (2005a). *Uniform terminology for agricultural machinery management. Standards of the Amer. Soc. Agr. Engineers*. St. Joseph, MI.
- ASAE (2005b). *Agricultural machinery management. Standards of the Amer. Soc. Agr. Engineers*. St. Joseph, MI.
- ASAE (2005c). *Agricultural machinery management data. Standards of the Amer. Soc. Agr. Engineers*. St. Joseph, MI.
- Aubert, B. A., Schroeder, A. & Grimaudo, J. (2012). *IT as enabler of sustainable farming: an empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology*, Decision Support Systems, 54 (1), 510–520.
- Audsley, E & Wheeler, J. (1978). *The annual cost of machinery calculated using actual cash flows*, Journal of Agricultural Engineering Research, 23 (2), 189-201.
- Barbeyto Nistal, F. (2001). *Del manejo técnico a los resultados económicos. Una revisión del vacuno de leche en Galicia a través del programa de gestión de explotaciones (1980-1999)*, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia. Santiago de Compostela.
- Barbeyto F. & López C. (2010). *Resultados del Programa de Gestión de Vacuno de Leche en Galicia en 2008*. Consellería de Medio Rural. Xunta de Galicia. Galicia, España, 99.
- Benson, E. R., Hansen, A. C, Reid, J. F., Warman, B. L. & Brand, V. (2002). *Development of an in-field grain handling simulation in ARENA*. ASAE Paper No. 02-3104. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Bentley, W. (1990). *Wouldn't you like to have all of your land in one place-land fragmentation in northwest Portugal?*, Human Ecology, 18(1), 51-79.
- Bochtis, D. D. & Sørensen, C. G. (2009). *The vehicle routing problem in field logistics part I*, Biosystems Engineering, 104 (4), 447-457.

- Bochtis, D. D. & Sørensen, C. G. (2010). *The vehicle routing problem in field logistics: Part II*, Biosystems Engineering, 105 (2), 180-188.
- Bochtis, D. D. & Vougioukas, S. G. (2008). *Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern*, Biosystems Engineering, 101, 1-12.
- Bolsen, K. (2000). *Silage management: three important practices*, Dairy Lines, 6(7).
- Brotcorne, L., Laporte, G. & Semet, F. (2003). *Ambulance location and relocation models*, European Journal of Operational Research, 147 (3), 451-463.
- Buckmaster D. R. (2006). *A systems approach to forage harvest operations*, Proceedings of the ASABE Annual International Meeting, Portland, Oregon, 9–12 July 2006. ASAE Paper No.061087, 2950 Niles Rd., St Joseph, MI 49085-9659, USA, 2006.
- Buckmaster, D. R. & Hilton, J.W. (2005a). *Cycle analysis of harvest, transport, and unload systems*, Documentation: Computers and Electronics in Agriculture, 47, 137-147.
- Buckmaster, D. R. & Hilton, J.W. (2005b). *Expanded Cycle Analysis – Forage or Biomass Harvest*, Written for presentation at the 2005 ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE Tampa Convention Center Tampa, Florida 17 - 20 July 2005.
- Buckmaster, D. R. & Hilton, J.W. (2005c). *Computerized cycle analysis of harvest, transport, and unload systems*, Computers and Electronics in Agriculture, 47 (0), 137-149.
- Bueno, J., Amiama, C. & Hernanz, J. L. (2006). *No-tillage drilling of Italian ryegrass (Lolium multiflorum L.): Crop residue effects, yields and economic benefits*. Soil and Tillage Research, 95 (0), 61-68.
- Busato, P., & Berruto, R. (2007). *Advanced logistic design and management of biomass supply chain by simulation toolbox*, In Proceedings of the 15th Biomass Conference. 2007 8-11 May (pp. 597-603). Berlin, Germany.
- Caramia, M. & Guerriero, F. (2010). *A milk collection problema with incompatibility constraints*, Interfaces, 40(2), 130-143.
- Carpente, L., Casas, B., Fiestras, G., García-Jurado, I., Jácome, C. & Puerto, J. (2007). *A model and heuristic algorithms for solving a time optimization problem in an agricultural cooperative*, VIII Congreso Galego de Estatística e Investigación de Operacións. Santiago de Compostela.

- Cascudo, N. (2011). *Caracterización da recolección mecanizada de millo forraxeiro na Comunidade Autónoma galega*, Trabajo Fin de Master, Universidad de Santiago de Compostela.
- Chalellier, V. & Pflimlin, A. (2006). *Dairy systems in the European regions of the Atlantic area*, In: Proceedings of the Final Seminar of the Green Dairy, Rennes, France, 117.
- Chalellier, V. & Pflimlin, A. (2006). *Dairy systems in the European regions of the Atlantic area*. En: Proceedings of the European workshop of the Green Dairy Project. 11-30.
- Colvin, S., McConnell, K., & Catus, B. (1989). “TERMS”: A computer model for field simulation, Transactions of the ASAE, 32(2), 391-392-396..
- COMISIÓN EUROPEA (2009a). *Prospects for agricultural markets and income in the European Union 2008- 2015*. Directorate-General for Agriculture and Rural Development, 37 pp. En: <http://ec.europa.eu/agriculture/analysis/>.
- COMISIÓN EUROPEA (2009b). *Agricultural commodity markets outlook 2009-2018*. Directorate-General for Agriculture and Rural Development, 168 pp. En: <http://ec.europa.eu/agriculture/analysis/>.
- Contreras, R., Pinninghof, J. & Osses, E. *Sistema de apoyo a procesos productivos en Pymes: Un caso de aplicación*, Universidad de Concepción, Chile
- Conway, J. (2008). *Bunker Silo/Pile Density Study*, Findings and Industry Applications 2008 Feed Dealers Meetings, www.ansci.cornell.edu.
- Corberán, A., Martí, R. & Romero, A. (2000). *Heuristics for the Mixed Rural Postman Problem*, Computers & Operations Research, 27 (2), 183-203.
- Corberán, A., Martí, R. & Sanchis, J. M. (2002). *A GRASP heuristic for the mixed Chinese postman problem*, European Journal of Operational Research, 142 (1), 70-80.
- Craessaerts, G., Maertens, K. & De Baerdemaeker, J. (2005). *A Windows-based design environment for combine automation via CANbus*, Computers and Electronics in Agriculture, 49 (0), 233–245.
- Crolla, D. A. & Horton, D. N. L. (1984). *Factors affecting the dynamic behaviour of higher speed agricultural vehicles*, Journal of Agricultural Engineering Research, 30, 277-288.

- Crossley, C. P. (1987). *The application of a computer program to the analysis of sugar cane transport— a case study*, Journal of Agricultural Engineering Research, 36 (1), 17-30.
- D'Amours L. D. & Savoie P. (2005). *Density profile of corn silage in bunker silos*, Canadian Biosystems Engineering, 47, 221-228.
- Darr, M. (2012). *CAN bus technology enables advanced machinery management*, Resource: Engineering & Technology for a Sustainable World, 19.5, 10-11.
- Dooley, A. E., Parker, W. J. & Blair, H. T. (2005). *Modelling of transport costs and logistics for on-farm milk segregation in New Zealand dairying*, Computers and Electronics in Agriculture, 48 (0), 75-91.
- Dwyer, M. J. & Wheeler, J. A. (1987). *Preliminary results from the on-farm evaluation of an experimental farm transport vehicle*, Journal of Agricultural Engineering Research, 38 (1), 15-26.
- Earl, R., Thomas, G. & Blackmore, B. S. (2000). *The potential role of GIS in autonomous field operations*, Computers and Electronics in Agriculture, 25 (0), 107-120.
- Escariz, A., & Bueno, J. (2007). *Analysis of self-propelled harvester activity in silage corn harvest*, Technical Report. Lugo, Spain: University of Santiago of Compostela.
- E.U., FADN. (2007). European Commission Farm Accountancy Data Network. <http://ec.europa.eu/agriculture/rica/index.cfm>. Accessed 25 January 2013.
- Faiz, S., Krichen, S. & Inoubli, W. (2014). *A DSS based on GIS and Tabu search for solving the CVRP: The Tunisian case*, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 17, 105–110.
- Fernández, B., Dagnac, T., González, A., Valladares, J., Pereira, S. & Flores, G. (2009). *Sistemas de producción de leche en Galicia. Evolución y estado actual*. In: Pastos, XXXIX (2), 251-299.
- Ferrer, J. C., Mac Cawley, A., Maturana, S., Toloza, S., & Vera, J. (2008). *An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations*, International Journal of Production Economics, 112, 985-999.

- Fountas, S., Wulfsohn, D., Blackmore, S., Jacobsen, H. L. & Pedersen, S. M. (2006). *A model of decision making and information flows for information-intensive agriculture*, *Agricultural Systems*, 87 (2), 192–210.
- Fountas, S., Sorensen, C., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Liakos, V. & Gemtos, T. (2015). *Farm machinery management information system*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 110 (0), 131-138.
- Gebresenbet, G. & Ljungberg, D. (2001). *IT—Information Technology and the Human Interface: Coordination and Route Optimization of Agricultural Goods Transport to attenuate Environmental Impact*, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80 (4), 329-342.
- Ghiani, G., Guerriero, F., Laporte, G. & Musmanno, G. (2003). *Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies*, *European Journal of Operational Research*, 151 (1), 1-11.
- Ghiani, G & Musmanno, R. (2006). *Recent algorithmic advances for Arc Routing Problems*, *Computers & Operations Research*, 33 (12), 3361-3362.
- Golden, B. L., Dearmon, J. S. & Baker, E. K. (1983). *Computational experiments with algorithms for a class of routing problems*, *Computers & Operations Research*, 10 (1), 47-59.
- González, X. P. (2002). *Evaluación de los procesos de concentración parcelaria mediante sistemas de información geográfica*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- González, A., Vázquez, O. P. & López, J. (2007). *Presión de pastoreo y concentrado en la producción eficiente de leche en zonas húmedas*, *Actas XLVI Reunión Científica de la S.E.E.P. Vitoria*, 445-451.
- Grenier, G. (2001). *Bus CAN sur machines agricoles: les technologies de l'information au service de l'agriculture de précision et de la traçabilité*, *Ingénieries*, 25, 67-76.
- Grisso, R. D., Kocher, M. F., Adamchuck, V. I., Jasa, P. J. & Schroeder, M. A. (2004). *Field efficiency determination using traffic pattern indices*, *Applied Engineering in Agriculture*, 20 (5), 563-572.

- Grisso, R., Perumpral, J., Vaughan, D., Roberson, G. & Pitman, R. (2010). *Predicting tractor diesel fuel consumption*, Virginia Tech Cooperative Extension, 442-073.
- Gunnarsson, C., Vagström, L. & Per-Anders, H. (2008). *Logistics for forage harvest to biogas production. Timeliness, capacities and costs in a Swedish case study*. *Biomass & Bioenergy*, 32, 1263-1273.
- Hansen, A. C., Hornbaker, R. H. & Zhang, Q. (2003). *Monitoring and analysis of in-field grain handling operations*, ASAE Paper No 701P1103e. In Proc. of Intl. Conf. on Crop Harvesting. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Hansen, A., Zhang, Q., & Wilcox, T. (2007). *Modeling and analysis of row crop harvesting patterns by combines*. *Transactions of the ASABE*, 50, 5-12.
- Harrigan, T.M. (1998). *Chopped silage harvest systems: A guide to costs and labor requirements*, AEIS 650. Agricultural Engineering Information Series. Agricultural Engineering Department, Michigan State University, East Lansing Mich.
- Harrigan, T.M. (2003). *Time-motion analysis of corn silage harvest systems*, *Applied Engineering in Agriculture*. 19 (4), 389.
- Hoffmann, T., Schemel, H. & Füll, C. (2013). *Compaction of grass silage taking vibrating stresses into account*, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1), 114-123.
- Holland, J. H. (1992). *Genetic algorithms*, *Scientific American*, 267, 66-72.
- Holmes, B. J. & Muck, R. E. (2000). *Factors affecting bunker silo densities*, *Applied engineering in agriculture*, 16 (6), 613-619.
- Hunt, D. (1967). *A FORTRAN program for selecting farm equipment*, *Agricultural Engineering*, 48 (6), 332-335.
- Hunt, D. (1995). *Farm Power and Machinery Management*, 9th Ed. Ames, Iowa: Iowa State University Press.
- Hunt, D. (2001). *Farm Power and Machinery Management*, (tenth ed.). Iowa State Press, Ames, Iowa.

- IGE (2008). *Datos estadísticos básicos de Galicia 2008*. Instituto Galego de Estatística, Xunta de Galicia, 48, pp. Santiago de Compostela (España).
- IGE (2011). *Maquinaria agrícola. Galicia e Provincias*. Instituto Galego de Estatística, en: <http://ige.es>.
- INE (2008). *Encuesta sobre la Estructura de las Explotaciones Agrícolas*, Instituto Nacional de Estadística. En: <http://www.ine.es>.
- Jha, M. & Schonfeld, P. (2004). *A highway alignment optimization model using geographic information systems*, Transportation Research Part A, 6, (38), 455–481.
- Kay, R. D., Edwards, W. M. & Duffy, P. A. (2008). *Farm management*, Published by McGraw-Hill. Sixth edition.
- Keeler, M. & Skuras, D. G. (1990). *Land fragmentation and consolidation policies in Greek agriculture*, Geography, 75(1), 73-76.
- Keller, T. (2005). *A model for the prediction of the contact area and the distribution of perpendicular stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters*, Biosystems engineering, 92(1), 85-96.
- Krallmann, J. & Foelster N. (2002). *Remote service systems for agricultural machinery*, Proceedings of the Conference of ASAE, Chicago, Illinois, 26–27 July 2002. ASAE Paper En el. 059-068, 2950 Niles Rd., St Joseph, MI 49085-9659, USA.
- Landers, A. (2000). *Resource Management Farm Machinery: Selection, Investment and Management*. Farming Press, United Kingdom.
- Laporte, G. (1992). *The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms*, European Journal of Operational Research, 59 (3), 345-358.
- Lavoie, G., Gunjal, K. & Raghavan, G. S. V. (1991). *Soil compaction, machinery selection, and optimum crop planning*, Transactions of the ASAE, 34(1), 2-8.
- Le Gal, P. Y., Le Masson, J., Bezuidenhout, C. N. & Lagnage, L. F. (2009). *Coupled modelling of sugarcane supply planning and logistics as a management tool*, Computers and Electronics in Agriculture, 68(0), 168-177.

- Linseisen, H. (2001). *Development of a precision farming information system*, Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France.
- López, Y. (2000). *Situación y perspectivas de la producción láctea en Galicia*. En: *Reforma Láctea: El control de la producción a debate*, Seminario Europeo AEFPR-PAC S6, Santiago de Compostela.
- MAGRAMA (2011). *Anuario de estadística 2010*, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (En: <http://www.marm.es>).
- MAGRAMA (2012). *Anuario de Estadística 2011*, España: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Maria, J., Coutinho-Rodriguez, J. & Current, J. (2005), *Interactive destination marketing system for small and medium-sized tourism destinations*, Tourism (Zagreb), 1, (53), 45–54.
- Marzolf, F., Trépanier, M. & Langevin, A. (2006). *Road network monitoring: algorithms and a case study*, Computers & Operations Research, 33 (12), 3494-3507.
- Mauttone, A., Cancela, H. & Urquhart, M. (2003). *Diseño y optimización de rutas y frecuencias en el transporte colectivo urbano, modelos y algoritmos*, En XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, 299–310, Santiago, Chile.
- Mazzetto, F., & Calcante, A. (2010). *Come valutare i costi della manutenzione (How to evaluate maintenance costs)*. II Contoterzista, 3, 1-6.
- McAllister, T. A. & Hristov, A. N. (2000). *The fundamentals of making good quality silage*, Advances in Dairy.
- Medina, J. & Yepes, V. (2003). *Optimization of touristic distribution networks using genetic algorithms*, Sort: Statistics and Operations Research Transactions, 27 (1), 95-112.
- Messer, H. J. M. & Hawkins, J. C. (1977). *Influence of moisture-content and chop length of forage maize on silage bulk-density and pressure on bunker silo walls*, Journal of Agricultural Engineering Research, 22 (2), 175-182.
- Morris, J. (1988). *Estimation of tractor repair and maintenance costs*, Journal of Agricultural Engineering Research, 41 (3), 191-200.

- Muck, R. Y. & Holmes, B. J. (2000). *Factors affecting bunker silo densities*, Applied Engineering in Agriculture, 16 (6), 613-619.
- Muck, R.E., Holmes B.J. & Savoie, P. (2004). Packing practice effects on density in bunker silos. 2004 ASAE/CSAE annual international meeting. 1-4 August. Ottawa, Ontario, Canada.
- Muck, R. E. & Kung L. (2007). *Chapter 40. Silage Production at: Forages*, The Science Grassland Agriculture, 6th Edition, Wiley- Blackwell Publishing by Barnes R. F., Nelson C. J., Moore K.J., and Collins M. (Eds).
- Oksanen, T. & Visala, A. (2009). *Coverage path planning algorithms for agricultural field machines*, Journal of Field Robotics, 26 (8), 651-668.
- Oppen, J. & Løkketangen, A. (2008). *A tabu search approach for the livestock collection problem*, Computers & Operations Research, 35 (10), 3213-3229.
- Osman, Y. H. & Laporte, G. (1996). *Metaheuristics: a bibliography*, Annals of Operations Research, 63, 511-623.
- Osorio , L. & Urias , L. (2002). *Evaluación tecnológico-explotativa de la cosechadora John Deere durante la cosecha de cebada en Bajío Guanajuatense*, UACH, Chapingo, México, (Tesis de diploma).
- Osvald, A. & Zadnik, L. (2008). *A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food*, Journal of Food Engineering, 85 (2), 285-295.
- Pacheco, J., Alvarez, A., Casado, S. & González-Velarde, J. L. (2009). *A tabu search approach to an urban transport problem in northern Spain*, Computers & Operations Research, 36 (3), 967-979.
- Palmer, R. J., Wild, D. & Runtz, K. (2003). *Improving the efficiency of field operations*, Biosystems Engineering, 84(3), 283-288.
- Parmar, R. S., McClendon, R. W. & Potter, W. D. (1996). *Farm machinery selection using simulation and genetic algorithms*, Transactions of the ASAE, 39(5), 1905-1909.
- Pearn, W. L. & Wu, T. C. (1995). *Algorithms for the rural postman problem*, Computers & Operations Research, 22 (8), 819-828.

- Pitla, S. K., Lin, N., Shearer, S. A. & Luck, J. D. (2014). *Use of controller area network (CAN) data to determine field efficiencies of agricultural machinery*, *Applied Engineering in Agriculture*, 30 (6), 829-839.
- Pisinger, D. & Ropke, S. (2007). *A general heuristic for vehicle routing problems*, *Computers & Operations Research*, 34 (8), 2403-2435.
- Power, D. J. (2002). *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*, Greenwood/ Quorum, Westport, CT.
- Prins, C., (2004). *A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem*. *Comput. Oper. Res.* 31: 1985–2002.
- Ravula, P. P., Cundiff, J. F. & Grisso, R. D. (2003). *Cotton Logistics as a Model for Analysis of Biomass Transportation Issues*, In ASAE annual international meeting, Las Vegas, Nevada 27-30.
- Ravula, P. P., Grisso, R. D. & Cundiff, J. S. (2007). *Comparison between Two Policy Strategies for Scheduling in a Biomass Logistic System*. Paper number 071095, ASAE Annual; Minnesota.
- Ravula, P. P., Grisso, R. D., & Cundiff, J. S. (2008). *Cotton logistics as a model for a biomass transportation system*, *Biomass & Bioenergy*, 32, 314-325.
- Recio, B. & Rubio, F. (2004). *Decision Support System for Farms Mechanization*, Paper number 043040, ASAE Annual, Vila Real, Portugal, 25-25.
- Renschler, C. S., Flanagan, D. C., Engel, B. A., Kramer, L. A. & Sudduth, K. A. (2002). *Site-specific decision-making based on RTK GPS survey and six alternative elevation data sources: watershed topography and delineation*, *Transactions of ASAE*, 45(6), 1883-1895.
- Resch, C. (2002). *Economía de la alimentación del ganado vacuno de leche en Galicia*, Ed. Pregando S.L. 134 pp. A Coruña (España).
- Rochat, Y., & Taillard, E. (1995). *Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing*. *Journal of Heuristics*, 1, 147-167.

- Rothmund, M., Auernhammer, H. & Demmel, M. (2002). *First results of transborder-farming in Zeilitzheim (Bavaria, Germany)*, Proceedings of the EurAgEng Conference, Budapest, Hungary, 1–4 July 2002.
- Rotz, C. A. (2004). *The Integrated Farm System Model: A Tool for developing more economically and Environmentally Sustainable Farming Systems for the Northeast*. Northeast Agricultural and Biological Engineering Conference Sponsored by ASAE University Park, Pennsylvania.
- Rotz, C. A. & Harrigan, T. M. (1997). *Economics of silage-based cropping system*, In NRAES-99, Silage: Field to Feedbunk. Proc. from the Silage: Field to Feedbunk North American Conference, 3–12. Ithaca, N.Y.: Northeast Regional Agricultural Engineering Service.
- Rotz, C. A. & Harrigan, T. M. (2005). *Predicting suitable days for field machinery operations in a whole farm simulation*, Applied engineering in agriculture, 21(4), 563-571.
- Rotz, C. A., Corson, M. S. & Coiner, C. U. (2007). *Integrated Farm System Model*, Reference Manual, Version 2.1. Available at: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/19020000/ifsmreference.pdf> [Accessed 18 Mar 2008].
- Rotz, C. A., Muhtar, H. A. & Black, J. R. (1983). *A multiple crop machinery selection algorithm*. Trans. of the ASAE, 26 (6), 1644-1649.
- Ruppel, K. A., Pitt, R. E., Chase, L. E. & Galton, D. M. (1995). *Bunker silo management and its relationship to forage preservation on dairy farms*, Journal of Dairy Science, 78 (1), 141-153.
- Ryerson, A. E. F. & Zhang, Q. (2007). *Vehicle path planning for complete field coverage using genetic algorithms*, Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal, IX (Manuscript PM ATOE 07).
- Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J. & Current, J. (2008). *Implementing a multi-vehicle multi-route spatial decision support system for efficient trash collection in Portugal*, Transportation Research Part A, 42, 922–934.

- Siemens, J., Hamburg, K. & Tyrell, T. (1990). *A farm machinery selection and management program*, Journal of Production Agriculture, 3 (2), 212-219.
- Silva del Rio N. (2010). *Opportunities to Improve Corn Silage Quality in California Alfalfa & Forage Symposium*, Nov. 30-Dec. 1-2, Visalia Convention Center, Visalia, CA..
- Singh, C.D. & Singh, R.C. (2011), *Computerized instrumentation system for monitoring the tractor performance in the field*, Journal of Terramechanics, 48, 333-338.
- Sokhansanj, S. & Turhollow, A. F. (2002). *Baseline cost for corn stover collection*, Applied Engineering in Agriculture, 18 (5), 525-530.
- Sokhansanj, S., Mani, S. & Bi, X. (2004). *Dinamyc simulation of McLeod Harvesting system for wheat, barley and canola crops*, Presented at the 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting. Ottawa, Ontario, Canada. August 1-4, Paper N° 048010, ASAE, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- Sørensen, C. G. & Nielsen, V. (2005). *Operational analyses and model comparison of machinery systems for reduced tillage*, Biosystems Engineering, 92 (2), 143-155.
- Sørensen, C. G. & Bochtis D. D. (2010). *Conceptual model of fleet management in agriculture*, Biosystems Engineering, 105 (1), 41-50.
- Sparovek, G. & Schnug, E. (2001). *Soil tillage and precision agriculture: a theoretical case study for soil erosion control in Brazilian sugar cane production*, Soil & Tillage Research, 61(1-2), 47-54.
- Tan, K. C., Chew, Y. H. & Lúe, L. H. (2006). *A hybrid multi-objective evolutionary algorithm for solving truck and trailer vehicle routing problems*, European Journal of Operational Research, 172 (3), 855-885.
- Tarantilis, C. & Kiranoudis, C. (2002). *Using a spatial decision support system for solving the vehicle routing problem*, Information and Management, 5, (39), 359–375.
- Taylor, R. K., Schrock, M. D. & Staggenborg, S. A. (2001). *Using GPS Technology to assist machinery management decisions*, Presented at the 2001 Mid-Central Conference of the ASAE, St. Joseph, Missouri, March 30-31, Paper N° MC01-204. ASAE, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659 USA.

- Taylor, R. K., Schrock, M. D. & Staggenborg, S. A. (2002). *Extracting machinery management information from GPS data*, Proceedings of the 2002 ASAE Annual International Meeting, Chicago, Illinois, 28–31 July 2002. ASAE Paper No. 021008, 2950 Niles Rd., St Joseph, MI 49085-9659, USA.
- Thomas, J. (2006). *Property rights, and fragmentation and the emerging structure of agriculture in central and eastern European countries*, Journal of Agricultural and Development Economics, 3 (2), 225-275.
- Udompetaikul, V., Upadhyaya, S. & Vannucci, B. (2011). *The effect of tire inflation pressure on fuel consumption of an agricultural tractor operating on paved roads*, Transactions of the ASABE, 54 (1), 25-30.
- Uehara, G. & Tsuji, G. Y. (1993). *The IBSNAT project*, Systems approach to agricultural development. Penning de Vries, F.W.T., Teng, P.S. (eds.) Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 505-514.
- Van Dijk, T. (2000). *Effects of land consolidation in practice: Analysis of post-war experience in The Netherlands*, Land Markets and Consolidation in Central Europe. Delft, Netherlands: Proceedings of Urban data management society, 11-15.
- Van Dijk, T. (2004). *Land consolidation as Central Europe's panacea reassessed*, In Proceedings of Symposium on Modern Land Consolidation, September 10-11. France: Volvic (Clermont-Ferrand).
- Ward, S. M. & Comerford, P. (1985), *Fuel consumption of grass silage mechanisation systems*, Energy in Agriculture, 4, 365-368.
- Wilkinson, J. M. & Toivonen, M. I. (2005). *World silage*, Chalcombe Publications, Painshall, Lincoln, UK.
- Witney, B. (1995). *Choosing & Using Farm Machines*. Land Technology Ltd. Scotland (U.K.).
- Witney, B. (1996). *Choosing and Using Farm Machines*. Edinburgh, Scotland, UK: Land Technology Ltd.
- Yule, I. J., Kohnen, G. & Nowak, M. (1999). *A tractor performance monitor with DGPS capability*, Computers and Electronics in Agriculture, 23 (0), 155.

Zhang, N., Wang, M. & Wang, N. (2002). *Precision agriculture a worldwide overview*,
Computers and Electronics in Agriculture, 36 (0), 113-132.







Los resultados del estudio muestran que a pequeñas distancias entre finca y silo, será la capacidad de la cosechadora ($t h^{-1}$) la que determinará el número de camiones que debemos utilizar para no incrementar los costes. Del mismo modo, se observa que dos variables como la capacidad de la cosechadora y la distancia entre finca y silo no son suficientes para determinar el número de camiones que debemos utilizar en la recolección del maíz forrajero de una parcela, será necesario considerar variables como la velocidad media, geometría de la parcela, cosechador, etc. Los resultados obtenidos, del estudio realizado con los dos tipos de cosechadoras, muestran cómo la necesidad de coordinación con el vehículo de transporte determina la actividad de la cosechadora sin tolva, si bien, se concluye que no hay diferencias significativas a la hora de cosechar las fincas. Se concluye, que la única limitación a la hora de plantear la cosecha será el número de transportes disponibles, ya que la cosechadora sin tolva tiene mayor demanda de transporte. Por otro parte, del estudio del proceso de descarga en silo se puede concluir que la anchura del silo influirá en la capacidad de forraje a ensilar, derivado fundamentalmente por la posibilidad de introducir un mayor número de equipos para la realización de las labores de extendido y compactado. Por último, se concluye que la utilización de algoritmos genéticos ofrece mejores resultados que la programación manual de las rutas, se puede obtener un ahorro de más del 15% en las distancias de viaje en comparación con la programación manual e incluso de más del 20% si las fechas de recolección no son tan estrictas. La mayor disponibilidad de la cosechadora constituye una característica clave cuando hay limitaciones de tiempo causadas por la mala climatología.

