

Reingeniería y evaluación de desempeño del prototipo de una máquina plantadora de agave

Reengineering and test development of an agave planting machine

César Gutiérrez-Vaca^{1*}, Noé Saldaña-Robles¹, Alfredo Márquez-Herrera¹,
Alberto Saldaña-Robles¹, Adriana Saldaña-Robles¹, Jonathan Cepeda-Negrete¹,
Israel Enrique Díaz-Herrera¹, Adrián Flores-Ortega¹

¹Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Guanajuato. Correo electrónico: cesarg@ugto.mx (*Autor responsable)

RESUMEN

México es el mayor productor de tequila en el mundo debido, en gran parte, a que la planta de agave es endémica del país. La variedad más utilizada para producir la bebida es la Tequilana *Weber* y el estado de Jalisco es el mayor productor de agave, con 73 mil ha, seguido de Guanajuato, con 16 mil ha y de Nayarit con 12 mil ha, según datos del 2020. Dentro de las principales empresas fabricantes de tequila se encuentra Tequilera Sauza, cuyo inventario de agave en campo es cercano a 7 mil ha. Una de las labores que más mano de obra demanda el cultivo es el trasplante en terreno de asiento para el desarrollo de la planta, actividad que se realiza manualmente. Como parte de sus procesos de tecnificación e innovación y con el objeto de buscar alternativas a la escasez de mano de obra en campo, esta empresa construyó un prototipo de máquina que permite hacer el trasplante de hijuelos, el cual presentó problemas en su operación, lo que propició se hiciera una reingeniería, que consistió en un proceso de ajustes y modificaciones en algunos de sus mecanismos más importantes. Luego de realizar los ajustes, se llevaron a cabo ensayos de plantación en campo, en los cuales se mejoró el porcentaje de plantas colocadas de manera correcta en el terreno de asiento de 50% a 86% promedio, y se ha llegado a 90% de eficiencia, valor recomendado para las máquinas de siembra o plantación. Se encontró, además, que el porcentaje de patinamiento es cercano a 20%, lo que provoca que la distancia entre plantas sea 20 cm arriba de 1 m, valor recomendado en el marco de plantación. Como resultado de este trabajo, se detectó que es necesario continuar con los ajustes para incrementar la eficiencia en la plantación y modificar el sistema de transmisión para que se alcance el valor de 1 m entre plantas.

Palabras clave: maquinaria agrícola, trasplante, tequila.

ABSTRACT

Mexico is the largest producer of tequila in the world due, in large part, to the fact that the agave plant is endemic to the country. The most used variety to produce the drink is Tequilana *Weber* and the state of Jalisco is the largest producer of agave, with 73 thousand ha, followed by Guanajuato, with 16 thousand ha and Nayarit with 12 thousand ha, in 2020. Among the main tequila manufacturing companies is Tequilera Sauza, whose inventory of agave in the field is close to 7 thousand ha. One of the tasks that most labor demands the cultivation is the transplantation in the ground of seat for the development of the plant, activity that is carried out manually; as part of its processes of technification and innovation and in order to find alternatives to the shortage of labor in the field, this company built a prototype of a machine that allows the transplantation of children, this presented problems in its operation, which led to a reengineering, which consisted of a process adjustments and modifications in some of its most important mechanisms. After making the adjustments, field planting tests were carried out, in which the percentage of plants placed correctly in the seating ground was improved from 50 to 86% on average, and 90% efficiency has been reached, a recommended value for planting or planting machines. It was also found that the percentage of skating is close to 20%, which causes the distance between plants to be 20cm above 1m, a recommended value in the planting framework. As a result of this work, it was detected that it is necessary to continue with the adjustments to increase the efficiency in the plantation and modify the transmission system so that the value of 1m between plants is reached.

Keywords: agricultural machinery, transplantation, tequila.

INTRODUCCIÓN

El agave es una planta endémica de México que se desarrolla en diferentes estados del país. Jalisco y Guanajuato fueron los principales estados productores de agave en el 2020, de acuerdo con el Sistema de Información Agroalimentario y Pesquera (SIAP) del gobierno federal, como se muestra en la Figura 1, aunque ha habido esfuerzos de propagación de la planta en otras partes del mundo (McDaniel, 1985) para utilizarlas en la fabricación de productos distintos al tequila.

El Consejo Regulador del Tequila (CRT) es el organismo que dictamina la zona de denominación de origen del tequila (DOT),¹ en la cual se encuentran reconocidos cinco estados de la república: Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas. La norma indica que el agave producido en esta zona es susceptible de utilizarse en la elaboración de la bebida alcohólica llamada tequila. Todos los municipios que conforman Jalisco es-

¹ Zona DOT, de acuerdo al CRT; <https://www.crt.org.mx/index.php/es/pages-3/geografia-de-la-dot>

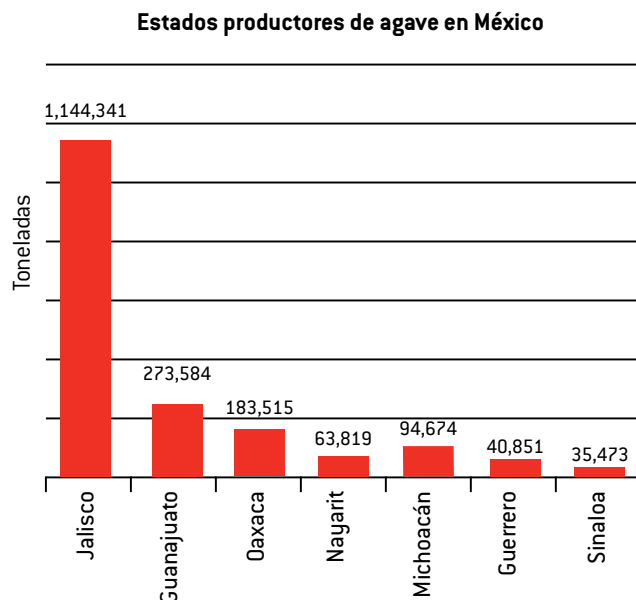


Figura 1. Estados con mayor producción en México en 2020.

tán dentro de la DOT, no así los de los otros estados. Sin embargo, la planta de agave se produce en 18 de los 32 estados del país, y se utiliza no sólo para la elaboración de tequila, sino en diversos productos como miel, jara-be, inulina, pellets, entre otros.

De acuerdo con el SIAP, en 2020 se plantaron 129,982 ha a lo largo del territorio nacional, con una densidad de población promedio de 3,500 plantas/ha,² lo que representa un aproximado de 450 millones de plantas. Considerando que el trasplante se realiza de forma manual y que en un jornal pueden plantar hasta 800 plantas por día, la cantidad necesaria de mano de obra para desarrollar esa actividad es de 500 mil jornales. La temporada de trasplante comienza al inicio de año y concluye antes del inicio del verano, pues las lluvias dificultan el acceso a las zonas donde se encuentra el cultivo, por lo que seis meses es el tiempo promedio para realizar esta actividad. Por lo anterior, la planeación de suministro de planta y de los sitios donde se establecerá el cultivo es esencial, al igual que contar con las cuadrillas de jornaleros que llevarán a cabo esa labor.

En algunos estados del país, la mano de obra disponible para las actividades agrícolas cada vez es menor, por lo que conseguir personal no es tarea fácil. El pago y condiciones de trabajo deben ser atractivas para que los trabajadores opten por continuar en actividades agrícolas y no desplazarse a la industria, que supone mayor comodidad y mejores prestaciones. Las empresas fabricantes de tequila de Jalisco, las cuales cuentan con sus propias parcelas de agave, han encontrado que

el pago de 1.5 a 2.2 pesos por planta trasplantada, es lo que más conviene tanto a ellas como al trabajador. Por menos de ese valor es difícil encontrar trabajadores dispuestos a plantar agave. Tomando el valor de pago más alto, trasplantar una hectárea de agave, a las empresas les representa un costo de 7,700 pesos; esto sin considerar los costos adicionales de transporte y manejo de la planta hasta el lugar donde será colocada (Molenhuis, 2001 y Lazarus & Selley, 2005). De manera adicional, cinco personas en una jornada serían capaces de sembrar 800 plantas en una hectárea, sin embargo, lo común es encontrar cuadrillas de 30 jornaleros, las cuales, en conjunto, serían capaces de plantar hasta 6 ha/día, sin embargo, al considerar los tiempos muertos esa cantidad se ve reducida.

Si se tienen en cuenta los buenos precios en la venta del agave que se cosecha, cubrir los costos de trasplante no representa un mayor problema para aquellos que están dentro de la zona DOT, ya que reciben un mejor precio por el agave al momento de la venta; no es el caso de quienes están fuera de la DOT, cuyos ingresos son menores, por lo que la mecanización del trasplante puede ser una alternativa para reducir los costos y mejorar los ingresos. En el mismo contexto, la problemática de escasez de mano de obra en campo lleva a la reflexión de la viabilidad de mecanizar el trasplante, no en el sentido de desplazar la mano de obra y quitar las fuentes de trabajo, sino de tener maquinaria agrícola disponible que realice las actividades fatigosas, repetitivas y monótonas, permitiendo a los trabajadores realizar las actividades más productivas.

² Datos obtenidos en encuesta de campo.



Figura 2. Hijuelo de planta de agave, propagación tradicional.



Figura 3. Hijuelo de planta de agave, propagación biotecnológica.³

MATERIALES Y MÉTODOS

En la actualidad se manejan dos tipos de plantas para el desarrollo de agave: hijuelos de planta madre (Figura 2) e hijuelos de planta micropropagada (Figura 3) (Baldwin, 2009). En ambos casos, la labor de trasplante en terreno de asiento es manual, por lo que es necesaria una cantidad importante de jornales para llevar a cabo esta actividad. El prototipo de máquina plantadora de agave que construyó la empresa Sauza (Figura 4) está previsto para colocar hijuelos de planta de agave en forma tradicional.

La máquina plantadora de agave es una estructura general con enganche frontal en los tres puntos del tractor agrícola. Al frente de la máquina, un disco cortapaja sirve para quitar restos de material que obstruyan el correcto funcionamiento. A continuación, una reja abresurco se encarga de abrir el suelo donde se colocará la planta. Un eje de soporte y motriz montado sobre un par de ruedas de acero, por tracción genera el movimiento del sistema de cadenas y catarinas, en las cuales se ensamblan unidades mecánicas de trasplante que colocan la planta en el suelo abierto. Las plantas se ponen en la zona de suministro de la unidad de trasplante, parte superior de la máquina, y se llevan al lugar de plantación. Dos rejas de aporque se encargan de arriamar suelo a la planta y un par de ruedas compresoras concluyen la labor de trasplante al dejarla debidamente colocada, como se muestra en la Figura 2.

En un primer ensayo se realizaron pruebas en campo para determinar el porcentaje de plantación que alcanza la máquina, para así detectar posibles fallos o conflictos mecánicos que impidieran que el prototipo de máquina plantadora funcionara como se esperaba. El total de los ensayos se realizaron en terrenos agrícolas de la Universidad de Guanajuato (1,720 msnm), en suelo arcilloso, el cual se barbechó con humedad a punto de marchitamiento permanente; para hacerlo se utilizó un tractor de 70 hp a la barra de tiro, al que a su vez se le enganchó la plantadora de agave y el sistema hidráulico del tractor, que proporciona la energía hidráulica para mover la bandeja retráctil donde se almacena la planta. La velocidad de avance del tractor se ubicó en primera baja, lo que permitió a los operarios ir colocando la planta una a una, a un ritmo que se puede sostener a lo largo del surco (Gómez *et al.*, 2006). Se colocaron 40 plantas en la bandeja de almacenamiento y los operarios las fueron tomando y suministrando a las unidades de trasplante, responsables de colocarlas en el terreno de asiento.

Como medida de evaluación, se consideró como plantación correcta aquellas plantas colocadas de manera vertical por la unidad de trasplante, y que además quedaron cubiertas con tierra y debidamente apisonadas. Aquellas plantas que quedaron con una inclinación mayor a 45° o con ausencia de esta, se consideraron como fallo.

A lo largo de una hilera se pudieron observar di-

³ Imagen proporcionada por el Departamento de Desarrollo e Innovación Agrícola, Casa Sauza.



Figura 4. Prototipo de máquina plantadora de agave.

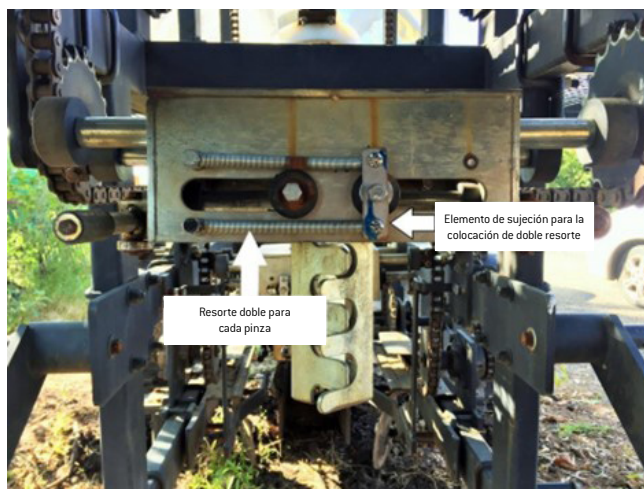


Figura 5. Unidad de trasplante de la máquina plantadora de agave.

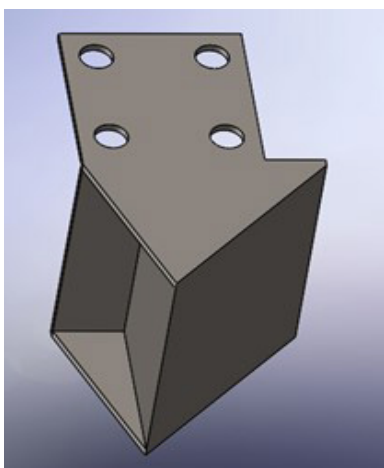


Figura 6. Diseño del nuevo elemento aporcadore de suelo.



Figura 7. Elemento aporcadore roto.

ferentes problemáticas relacionadas con los diversos mecanismos que componen la máquina plantadora. A continuación se enumeran las más relevantes:

- Elementos mecánicos de las unidades de trasplante que no permiten el cierre o apertura de pinzas de manera adecuada.
- Elementos aporcadore rotos que no permiten arriar suelo a la planta para un correcto trasplante.
- Ruedas de tracción con patinamiento, lo que provocó espacios entre plantas mayores a los necesarios, idealmente de un metro entre plantas.
- Restos de rastrojo o material vegetal atascaron la reja abresurco, al punto de bloquear e impedir el proceso de trasplante.

Para cada una de las problemáticas detectadas, se realizaron ajustes y se diseñaron nuevos elementos para alcanzar el nivel de operatividad requerido por la máquina.

En la Figura 5 se muestra la vista lateral de la unidad de trasplante. Para mejorar el nivel de apertura y cierre de las pinzas que sostiene la planta de agave, se ajustó el ángulo de trabajo de los resortes y se duplicó la cantidad de estos para incrementar la fuerza de sujeción en la pinza y evitar la caída de la planta.

Fue necesario diseñar un nuevo sistema de aporque de suelo (Figura 6), dado que los elementos aporcadore del prototipo (Figura 7) se rompieron durante los ensayos, con lo que quedó en evidencia su fragilidad ante las significativas reacciones que se generan entre el suelo y los elementos que entran en contacto con él. El diseño se



Figura 8. Rueda de tracción del prototipo.



Figura 9. Rueda de tracción con aletas incorporadas.



Figura 10. Rueda de tracción del prototipo, sin disco cortapaja.



Figura 11. Rueda de tracción del prototipo, con disco cortapaja.

basa en utilizar placa de acero soldada, sin utilizar tornillería que genere puntos débiles en el elemento.

Para incrementar la tracción, se añadieron aletas y cartabones en la periferia de la rueda de acero responsable de esta función, de tal manera que el área de contacto de las aletas con el suelo se duplicara, lo cual se puede apreciar en las figuras 8 y 9.

Para evitar el atascamiento de rastrojo o material vegetal en la reja abresurco, se incorporó un disco corta paja, similar al que utilizan las sembradoras de granos, cuya función es cortar los restos sobre el suelo (Figuras 10 y 11).

Una vez realizados los ajustes antes descritos y otros de menor relevancia, pero necesarios para mejorar el

desempeño del prototipo, se procedió a realizar un segundo ensayo de campo en el sitio, con las condiciones descritas en párrafos anteriores. En este se utilizó el mismo criterio de evaluación para determinar el porcentaje de plantación alcanzado, luego del proceso de reingeniería.

Después del primero y segundo ensayos, realizados en las instalaciones de la Universidad de Guanajuato, se llevó a cabo un tercer ensayo en la zona agavera del estado de Jalisco, de manera específica en un predio perteneciente a la empresa Sauza, localizado en el municipio de Tequila. En esa zona, el tipo de suelo es franco arcilloso, el cual al momento del ensayo se encontraba barbechado



Figura 12a. Acierto y fallo en el intento de plantación.



Figura 12b. Fallo en ambos intentos de plantación.



Figura 13. Segundos ensayos en campo, buen porcentaje de plantación.



Figura 14. Tercer ensayo del prototipo de máquina plantadora de agave, Tequila, Jalisco.

a punto de marchitamiento permanente. Para este ensayo se utilizó un tractor de doble tracción con potencia de 70 hp a la barra de tiro, con velocidad de avance en primera baja, lo que permite la alimentación de planta a las unidades de trasplante por los dos operarios, a un ritmo constante a lo largo de la hilera de plantación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se puede apreciar que el nivel de plantación en la primera versión del prototipo alcanzó un nivel de 50% de plantas colocadas de manera correcta en el terreno de asiento. Entre las plantas incorrectas, los fallos observados fueron: ausencia de plantas, las cuales soltó antes de tiempo la misma unidad de trasplante, y plantas derribadas por las pinzas de la unidad de trasplante al momento de liberarlas para colocarlas en el terreno. La Figura 12 muestra los fallos ocurridos a lo largo del ensayo.

El segundo ensayo, donde el prototipo de máquina plantadora de agave contiene los trabajos de reingeniería realizados, incrementa el nivel de plantación, como se puede apreciar en la Tabla 2.

En la Figura 13 se puede apreciar una de las repeticiones en la que se alcanzó un buen nivel de plantación, lo que demuestra que la reingeniería realizada mejoró el desempeño del prototipo. Aun con lo anterior, se siguieron presentando fallos que sugieren debe seguirse trabajando en los elementos del prototipo. El nivel de plantación o siembra recomendado para plantadoras o sembradoras comerciales es de 90% (Aykas *et al.*, 2017). Si bien es cierto que el prototipo mejoró de manera significativa, al pasar de 50% a 86% de plantación, aún quedan espacios de mejora para lograr y superar el porcentaje de plantación recomendado (Hunt, 2008).

El tercer ensayo realizado en el municipio de Tequila, en el estado de Jalisco, arrojó resultados similares

Tabla 1. Primer ensayo plantación del prototipo.

Repetición	Plantas correctas	Plantadas incorrectas	% de plantación
1	23	17	57
2	22	18	55
3	15	25	37
Promedio			50%

al segundo ensayo, ya que alcanzó 85% de plantación en las diferentes repeticiones realizadas. La Figura 14 muestra la plantación de varias hileras de agave con nivel de plantación aceptable a la vista de los involucrados en el proceso de plantación. Sin embargo, la distancia entre plantas logrado fue de 1.2 m, que no coincide con 1 m necesario en campo, debido al efecto de patinamiento que ocurre en las máquinas agrícolas.

CONCLUSIONES

La reingeniería realizada al prototipo de plantadora de agave permitió contar con una máquina funcional que se llevó a campo para evaluar su desempeño en la plantación mecanizada de agave. Se incrementó el porcentaje de plantación del prototipo, ya que se alcanzó una eficiencia cercana al rango de desempeño de las plantadoras comerciales existentes para otros cultivos.

La prueba de campo en zona de plantación de la empresa fue satisfactoria, ya que se alcanzó un porcentaje cercano al valor recomendable. A pesar de que el sistema de transmisión está diseñado para trabajar a intervalos específicos, la distancia entre plantas no coincide con la requerida, ya que el efecto de patinamiento

Tabla 2. Segundo ensayo plantación del prototipo.

Repetición	Plantas correctas	Plantadas incorrectas	% de plantación
1	34	6	85%
2	36	4	90%
3	33	7	82.5%
Promedio			86%

es significativo, por lo que deberá revisarse y atenderse para lograr la distancia deseable entre plantas.

LITERATURA CITADA

- AYKAS, E., Akdeniz, R. C., Kömekçi, F., & Kömekçi, C. (2017). Determining the Field Performance and Cost Analysis of Walk Behind Type Semi-Automatic Hand Feed Vegetable Transplanter. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 13(3), 149-154.
- BALDWIN, R. (2009). Propagation Methods for Agave©. In *Combined Proceedings International Plant Propagators' Society* (Vol. 59, p. 276).
- GÓMEZ, F. M., Ruelas, J. G., Serwatowsky, R., & López, C. G. (2006). Trasplante mecanizado de hortalizas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(1), 5-11.
- HUNT, D. (2008). *Farm power and machinery management*. Waveland Press.
- LAZARUS, W., & Selley, R. (2005). *Farm machinery economic cost estimates for late 2005*.
- McDANIEL, R. G. (1985). *Field evaluations of Agave in Arizona*.
- MOLENHUIS, J. R. (2001). *Budgeting farm machinery costs. Factsheet—Ministry of Agriculture*.