

Selección de tecnologías adaptables para la cosecha de cítricos cultivados en ladera en Colombia

Selection of Customizable Technologies for Hillside Citrus Harvesting in Colombia

Daniel Álvarez Arango^a, Carlos Augusto Hincapié Llanos^b

^a Agros Agricultura Inteligente, Colombia.

alvarezdaniel510@gmail.com | <https://orcid.org/0000-0001-7605-8688>

^b Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
carlos.hincapie@upb.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-2652-334X>

RESUMEN

En el presente trabajo se identificaron las principales tecnologías existentes en el mundo para la cosecha de cítricos, especialmente limón Tahití (*Citrus x latifolia* Tanaka Ex Q. Jiménez). A partir de una búsqueda bibliográfica, se establecieron los criterios más importantes para la adaptabilidad de dichas tecnologías a los cultivos en zona de ladera en Colombia. Se revisaron diferentes bases de datos y se identificaron resultados de diversos países con una participación importante en el mercado global de cítricos. Posteriormente, se aplicó un proceso analítico de jerarquización (AHP) para determinar la tecnología más adaptable según los criterios establecidos. Los resultados mostraron como tendencia tecnológica más apropiada la aplicación de soluciones robotizadas para la cosecha de cítricos.

Palabras claves: limón Tahití, *Citrus x latifolia*, cosecha automatizada, cosecha robotizada.

Citation: Álvarez-Arango, D. e Hincapié-Llanos, C. A. (2021). Selección de tecnologías adaptables para la cosecha de cítricos cultivados en ladera en Colombia. *Mutis*, 11(2), 44-55. <https://doi.org/10.21789/22561498.1754>

Recibido: 14 de mayo de 2021. **Aceptado:** 15 de julio de 2021.

Copyright: ©2021. Álvarez-Arango, D. e Hincapié-Llanos, C. A.. (2021). This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

ABSTRACT

This work identified the main existing technologies for citrus harvesting in the world, especially Tahiti lemon (*Citrus x latifolia* Tanaka Ex Q. Jimenez). Based on a literature review, the most important criteria regarding the adaptability of such technologies to crops planted in hillside terrains in Colombia were established. Different databases were reviewed and results from different countries with an important participation in the global citrus market were identified. Subsequently,



an analytical hierarchy process (AHP) was applied to determine the most adaptable technology according to the established criteria. The results showed that the most appropriate technological trend was the application of robotic solutions for citrus harvesting.

Keywords: Persian lime, *Citrus x latifolia*, automated harvesting, robotic harvesting.

INTRODUCCIÓN

La producción de cítricos en Colombia ha aumentado de forma importante en los últimos años, pasando de 1.124.197 t en 2016 a 1.332.814 t en 2019. Se estima que 47 % de esa producción corresponde a naranjas, 27 % a mandarinas y 26 % a limones (MADR, 2020). En el contexto internacional, los países del hemisferio norte son los mayores productores de cítricos. En cuanto a limones y limas, la producción se concentra principalmente en México (2,87 Mt), La Unión Europea (1,64 Mt), Argentina (1,03 Mt), Turquía (1,03 Mt) y Estados Unidos (940.000 t) (USDA, 2021).

Los cítricos, que comprenden una muy variada gama de especies, son nativos de las regiones tropicales y subtropicales de Asia, desde donde se han dispersado a todo el mundo. Las mayores áreas de cultivo se encuentran en las fajas subtropicales comprendidas entre los 20 y 35 grados de latitud norte-sur (Gómez *et al.*, 2008). La producción de cítricos en Colombia no presenta mayores avances tecnológicos, los métodos de producción empleados son bastante tradicionales y los costos asociados son relativamente altos debido al uso intensivo de mano de obra y a la baja implementación de tecnologías eficientes, entre otros factores. En contraste, otros países ya cuentan con máquinas diseñadas para cosechar, lo cual ha significado un verdadero avance tecnológico, dado que su uso simplifica las labores de corte, separación de impurezas, limpieza, clasificación y empaque, disminuyendo así los elevados costos de las labores de cosecha (Puerta-Polanco, 2007). Debido a la topografía colombiana, especialmente en la región Andina, una parte importante de la producción se lleva a cabo en zonas de ladera, lo que dificulta las labores de automatización el uso de maquinaria. Esta situación conlleva a un estancamiento en el avance tecnológico del sector agrícola, pues la migración de tecnologías de otros países productivos no es, en muchos casos, compatible con las condiciones de producción en Colombia.

El método de recolección de estos productos puede determinar el grado de variabilidad en la madurez y las lesiones físicas, por lo cual esta variable influye en la composición y calidad de los frutos. Los daños mecánicos (abrasiones, rozaduras superficiales y cortes, entre otros) pueden acelerar la pérdida de agua y aumentar la susceptibilidad a los patógenos que causan enfermedades. La incidencia y gravedad de estas lesiones están influenciadas por el método de cosecha (manual frente a mecánica) y la gestión de las operaciones de recolección y manejo (Pássaro *et al.*, 2012).

La oportunidad que tiene Colombia de ser un gran competidor en la producción de cítricos a nivel mundial es evidente. Por tal motivo, es indispensable conocer el estado actual de las tecnologías a nivel global de producción, cosecha y transporte de fruta, al igual que las tendencias en los avances tecnológicos, con el fin de desarrollar o modificar herramientas que se adapten a las necesidades de la producción nacional, aportando a la investigación y al desarrollo agroindustrial (OCDE, 2015). En ese sentido, aprovechar las ventajas comparativas de Colombia, otorgadas por su ubicación geográfica, carencia de estacionalidad y capacidad de producción, requiere incrementar el nivel de competitividad de la producción nacional a través de la disminución de costos de producción y el mejoramiento de la calidad (Aguilar-Niño *et al.*, 2012).

Con base en lo anterior, y teniendo en cuenta el inventario de tecnologías existentes para la cosecha de frutas realizado, el presente estudio busca seleccionar la tecnología adecuada que pueda ser adaptada a los cultivos de cítricos establecidos en zona de ladera del territorio colombiano a través de la realización de una vigilancia tecnológica y la metodología de jerarquización analítica (AHP).

MATERIALES Y MÉTODOS

Vigilancia tecnológica

Para la realización de la vigilancia tecnológica (VT) se ejecutaron los siguientes pasos: (i) identificación del objetivo de la VT, (ii) identificación de las fuentes de consulta, (iii) búsqueda en las fuentes seleccionadas, (iv) análisis y organización de la información y (v) validación de la información. La búsqueda de tecnologías para la cosecha de fruta incorporó los siguientes parámetros, los cuales deben ser considerados para la vigilancia tecnológica en el territorio colombiano, iberoamericano y el mundo: (i) desplazamiento en laderas, (ii) cantidad de operarios para la tecnología y (iii) calidad de la fruta cosechada. Con los criterios anteriores se realizó una búsqueda de información en las bases de datos Scopus y Espacenet Patent Search para el período 2011-2020.

Selección de la tecnología más apta

Con base en la información analizada durante la fase de VT se determinaron ciertos factores que permitieron identificar la adaptabilidad de las tecnologías existentes o las tendencias tecnológicas a las condiciones de cultivo en Colombia. Los resultados fueron analizados a través de la metodología de jerarquización analítica (AHP), desarrollada por Thomas Saaty (2008).

El paso inicial fue la representación gráfica del problema en términos de la selección de la tecnología más apta. Las variables para la selección de la maquinaria se identificaron y seleccionaron a través de la revisión bibliográfica y de visitas de campo, con base en la relevancia que dicha maquinaria tiene para el proceso productivo. Estas variables son:

- Desplazamiento en ladera (D): capacidad de la máquina para avanzar en pendientes empinadas sin afectar su trabajo principal.
- Mano de obra requerida (M): número de trabajadores que la máquina requiere para ser operada y cantidad de mano de obra que esta sustituye en la realización de la labor.
- Calidad de la fruta cosechada (C): en este aspecto se tiene en cuenta el estado físico de la fruta luego de ser cosechada, los daños mecánicos causados y la forma de disponer los frutos a los contenedores para su transporte.

Para la comparación de las tecnologías se utilizó la escala numérica absoluta (tabla 1), la cual permitió determinar qué elemento fue más dominante sobre otro, de acuerdo con los criterios establecidos para la comparación. El procesamiento de la información y la generación de las matrices se desarrolló en hojas de cálculo de Microsoft Excel.

Tabla 1. Escala fundamental de números absolutos

Escala numérica	Descripción
1	Criterios de igual importancia
3	Importancia débil de uno sobre otro
5	Importancia fuerte de uno sobre otro
7	Importancia demostrada de uno sobre otro
9	Importancia absoluta de uno sobre el otro
2	Entre igual y débilmente preferible uno sobre el otro
4	Entre débil y fuertemente preferible uno sobre el otro
6	Entre fuertemente y de importancia demostrada de uno sobre el otro
8	Entre importancia demostrada y extremadamente preferible uno sobre el otro

Fuente: adaptado de Saaty (2008).

RESULTADOS

Vigilancia tecnológica

La tabla 2 presenta las principales ecuaciones de búsqueda utilizadas para realizar la vigilancia tecnológica y el número de resultados obtenido tras su aplicación.

Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda VT período 2011-2022

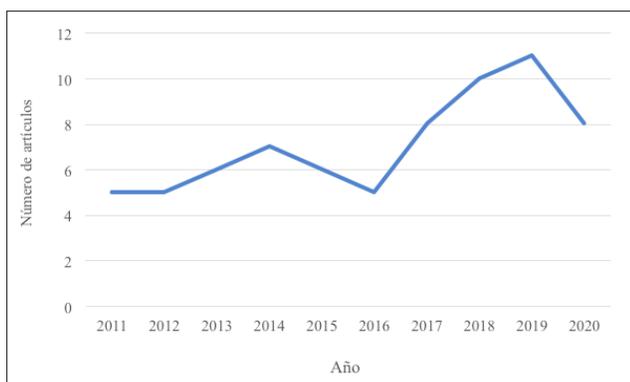
Ecuación de búsqueda	N.º de documentos	Base de datos
TITLE-ABS-KEY ("Fruit harvesting machine" OR "citrus harvesting") OR ("hill harvesting" AND "lime" OR "citrus" OR "technology for harvesting fruit")	71	Scopus
Ecuación de búsqueda	N.º de patentes	Base de datos
"Fruit harvesting machine" OR "citrus harvesting"	144	Espacenet

Fuente: elaboración propia.

Fase de análisis y organización de los resultados

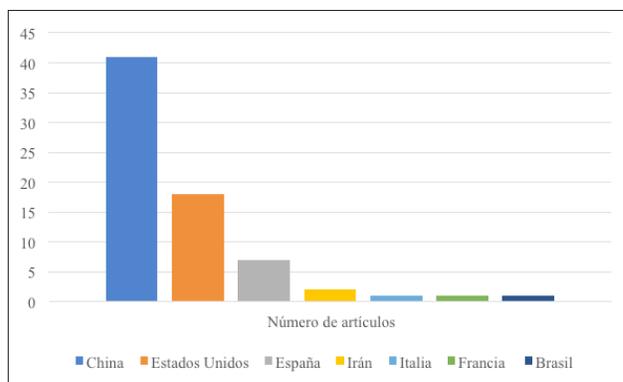
La figura 1 representa la dinámica de publicaciones obtenidas en la base de datos Scopus. Se puede observar un número constante de publicaciones, con un incremento sostenido a partir de 2017 y un leve descenso en 2020. La figura 2 muestra la relación de países con mayor número de publicaciones sobre el tema, donde China (41), Estados Unidos (18) y España (7) ocupan los tres primeros lugares.

Figura 1. Número de artículos identificados por año en Scopus (2011-2020)



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Número de artículos por país (2011-2020)



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3 se puede observar que China fue el país con mayor número de patentes durante el período de observación, con más del 68 % del total, seguido de España (7 %) y Corea del Sur (6,25 %). Los años con mayor número de patentes publicadas fueron 2014 y 2015, con aproximadamente 46 % del total para el período evaluado. El aumento en ese lapso se debió principalmente al aporte realizado por China, pues el resto de las oficinas de patentes, en conjunto, mantuvieron su tendencia a través de los años.

Tabla 3. Número de patentes por oficina de patentes (2011-2020)

Oficina	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total oficina
CN	1	7	7	22	33	7	2	1	3	15	98
ES	1		4		2	3					10
KR	3		3	2	1						9
US	2	1		2							5
IT		2		2							4
JP	3						1				4
WO	1	1								2	4
AU	1		1			1					3
EP	2		1								3
BR	1										1
EA								1			1
PL				1							1
PT					1						1
Total año	15	11	16	29	37	11	3	2	3	17	144

CN: China; ES: España; KR: Corea del sur; US: Estados Unidos; IT: Italia; JP: Japón; WO: World Intellectual Property Organization (WIPO); AU: Australia; EP: European Patent Office (EPO); BR: Brasil; EA: Eurasian Patent Organization (EAPO); PL: Polonia; PT: Portugal.

Fuente: elaboración propia a partir de datos obtenidos de Espacenet Patent Search.

Luego de obtener y validar los resultados de la consulta de las bases de datos y patentes, se seleccionaron los siguientes métodos de cosecha y tecnologías para el análisis comparativo posterior.

Sistemas de cosecha de fruta manual

Como señalan Bassan *et al.* (2013), existen diferentes métodos para cosechar la fruta:

- i. Torsión (Tr): la fruta es sujeta cuidadosamente con la mano y se estira a la vez que se le aplica una ligera torsión para removerla del árbol.
- ii. Tijeras (Tj): se realiza la escisión del pedúnculo con la ayuda de las tijeras, seguido de una selección manual.
- iii. Canasta cosechadora (Cc): consiste de una canasta metálica o un saco de tela con garras en la parte

superior que se encarga de la separación de la fruta del árbol.

- iv. Gancho (G): la fruta es removida con la ayuda de un gancho, dejándola caer al suelo para luego ser recolectada manualmente.

Sistemas de cosecha de fruta mecanizada

La cosecha mecanizada de fruta ha sido investigada y aplicada desde los años 60 del siglo 20 (Coppock, 1961). Los métodos más usados son:

- i. Sacudidora de ramas (Sr): funciona gracias a un peso retirado del centro de un eje que es rotado para producir un movimiento vibratorio y que es ubicado en las ramas del árbol a través de un mecanismo de agarre. Se ha determinado que este método causa daños mecánicos notables en las ramas del árbol, como cortes totales o parciales, además de no ser muy eficiente, pues causa

caída del follaje y de fruta no madura (Hedden & Coppock, 1968).

- ii. Sacudidora de copa lateral (Sc) o *canopy shaker*: se fija a las ramas secundarias del árbol y provoca un movimiento vibratorio vertical, buscando minimizar los daños ocasionados, principalmente en la fruta y el árbol, y aumentar el porcentaje de fruta cosechada (Futch & Roka, 2005). Luego de que la fruta cae al piso, se requiere de mano de obra para terminar de recolectarla, ya sea en vehículos adaptados para el cargue o en canastas plásticas. Este sistema puede ser autopropulsado o adaptado a un tractor.

Sistemas de cosecha de fruta automatizados

Los sistemas de cosecha mecanizados no tienen la posibilidad de mantener la calidad de la fruta como lo puede hacer el ojo humano. Por lo tanto, se consideró el desarrollo de cosechadoras automatizadas individuales de fruta que realizan la interpretación de patrones a través de imágenes capturadas por cámaras. Por ejemplo, en Francia se desarrolló el proyecto MAGALI, donde una cámara se fija en el camino del dispositivo para detectar las frutas en el árbol, enviando la señal a un brazo mecánico que se encarga de cosechar la fruta con una trayectoria lineal. Este proyecto fue suspendido en 1996/97 debido a que no cumplía con los criterios necesarios para la viabilidad comercial (Ward, 2003). Por su parte, el Proyecto Eureka contaba con un agarrador esférico y una cámara a blanco y negro con filtros de onda de 560 nm. La detección de las frutas maduras se realizaba por medio de un clasificador bayesiano, aunque presentaba problemas en la detección de la distancia para el agarre de la fruta.

El principal programa de cosecha robotizada a nivel mundial comenzó en la Universidad de Florida (Estados Unidos) en 1980 (Bachche, 2015). Posteriormente, numerosas investigaciones alrededor del mundo han estudiado soluciones robóticas para la cosecha de frutas y vegetales frescos, y algunas empresas han desarrollado modelos funcionales que han lanzado al mercado. Por ejemplo, en Reino Unido, la empresa DogTooth creó un robot capaz de cosechar fresas autónomamente a través del cultivo, seleccionarlas y ubicarlas en los contenedores que serán vendidos. La *startup* Abundant Robotics, ubicada en California (Estados Unidos), ha desarrollado

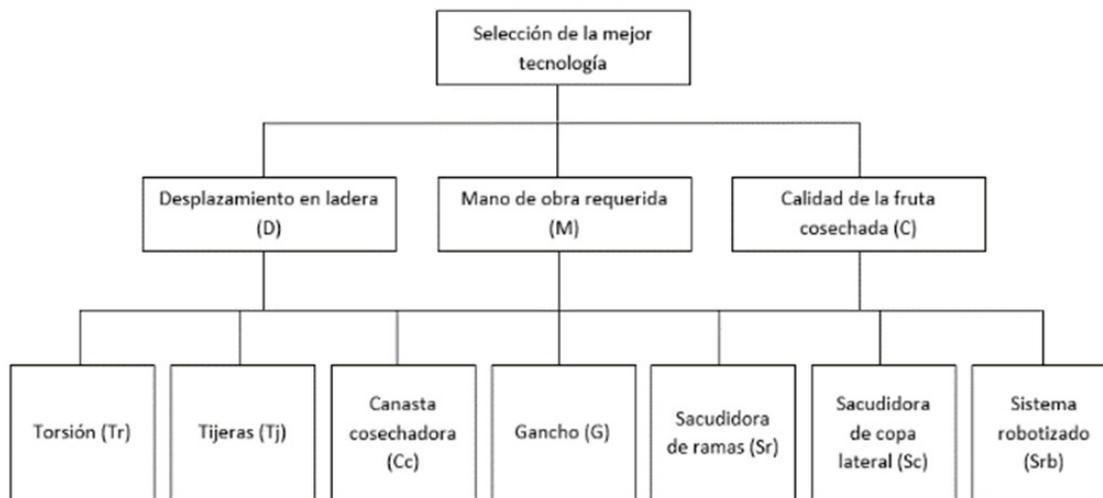
un robot capaz de cosechar manzanas por medio de vacíos. Este robot usa algoritmos de visión artificial para ubicar las manzanas en los árboles y posteriormente colectarlas en canastillas. Por otra parte, la empresa estadounidense FFRobotics desarrolló un robot capaz de reducir el costo de mano de obra para la recolección de la fruta, el cual cuenta con un sistema avanzado de procesamiento de imágenes y una pinza en forma de mano para la cosecha de la fruta. Todos estos avances funcionan principalmente con un sistema de detección del fruto, que puede ser una cámara combinada con un sensor de distancia, un brazo robótico multi ejes que le da facilidad de movimiento para llegar al fruto y un dispositivo cosechador, como un par de pinzas, la boca de una aspiradora, tijeras o una mano robótica (Mehta & Burks, 2014).

Existen patentes de sistemas robotizados (Srb) de cosecha, tales como el brazo robótico para la recolección de frutos con sensor de distancia para detección de fruta, creado por la empresa Kubota Ltda., ubicada en Osaka, Japón (Takashi, 1984), el robot con cinco ejes de movimiento, vehículo incorporado y sistema de control que permite la recolección de cítricos a través de un par de pinzas (Qinghai, 2017), y el sistema de recolección de fruta por medio de un vehículo que cuenta con un aparato vibratorio (Cui *et al.*, 2010) a power supply (2, por citar los ejemplos más sobresalientes.

DISCUSIÓN

La figura 3 presenta la jerarquía de los criterios definidos para el análisis de selección. En la parte superior de la figura se encuentra el objeto de análisis, mientras que en la parte inferior se ubican los criterios y las alternativas a considerar. En el proceso de selección se determinaron las necesidades básicas de los cultivos de cítricos colombianos y las tecnologías potenciales a ser implementadas. Como resultado, se identificaron las variables Torsión (Tr), Tijeras (Tj), Canasta Cosechadora (Cc), Gancho (G), Sacudidora de ramas (Sr), Sacudidora de copa lateral (Sc) y Sistemas Robotizados (Sr). Luego de analizar el funcionamiento de los sistemas robotizados, se concluyó que no varía mucho el rendimiento, método de cosecha y funcionamiento por la similitud en que son construidos. Por ende, todos los tipos de robots se agrupan en esta variable con el objetivo de facilitar su análisis.

Figura 3. Jerarquización y objeto de análisis



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con las revisiones realizadas, los agricultores consideran que el criterio más importante para la selección de una tecnología es la mano de obra, pues esta representa su mayor problema debido a la creciente escasez de fuerza laboral en las zonas rurales del país, su baja calificación, inestabilidad y ciertos problemas en materia laboral. Por lo tanto, en la matriz de análisis se estableció este criterio con un mayor peso frente a los demás, seguido del desplazamiento en ladera y la calidad de la fruta cosechada. En la tabla 3 se pueden observar los valores asignados y organizados de acuerdo a la metodología AHP (Saaty, 2008). Por ejemplo, en la fila M, columna D, se asignó un valor de cuatro (4,00) mientras que en la localización inversa (fila D, columna M) se asignó el valor inverso (1/4), y así sucesivamente hasta completar la tabla. En la tabla 5 puede verse la normalización de la matriz de la tabla 4 y en la última columna la ponderación de cada criterio. Este valor representa el nivel de importancia que tiene cada uno de los criterios para el agricultor. Así, cada criterio afectó la elección de cualquier alternativa, por lo que se evaluó la relevancia que tiene cada uno de estos para el objeto del análisis.

Tabla 4. Comparación de los criterios apareados

	D	M	C
D	1,00	0,25	2,00
M	4,00	1,00	0,50
C	0,50	2,00	1,00

D: desplazamiento en ladera; M: mano de obra requerida; C: calidad de la fruta cosechada.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Matriz normalizada de comparación de criterios apareados

	D	M	C	Peso
D	0,18	0,08	0,57	0,21
M	0,73	0,31	0,14	0,39
C	0,09	0,62	0,29	0,39

D: desplazamiento en ladera; M: mano de obra requerida; C: calidad de la fruta cosechada.

Fuente: elaboración propia.

Haciendo uso de la escala presentada en la tabla 1 se evaluó nuevamente cada criterio con el fin de comparar las alternativas. La tabla 6 fue calculada de igual forma que la tabla 5, pero considerando el desplazamiento en ladera (D) como criterio principal en cada alternativa; las demás alternativas se evaluaron de

la misma manera. En la tabla 7 se evaluó la alternativa con el criterio de mano de obra requerida (M) y en la tabla 8 con el criterio de calidad de la fruta (C). Adicionalmente, en la última columna se expuso el peso o ponderación del criterio sobre el que está siendo evaluado.

Tabla 6. Matriz A_D tecnologías comparada con desplazamiento en ladera (D)

	Tr	Tj	Cc	G	Sr	Sc	Srb	Peso
Tr	1	1	1	1	3	5	2	0,20
Tj	1	1	1	1	3	5	3	0,21
Cc	0,33	1	1	1	3	5	3	0,19
G	0,33	1	1	1	1	5	3	0,17
Sr	0,33	0,33	0,33	1	1	5	0	0,10
Sc	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	1	0,33	0,04
Srb	0,50	0,33	0,20	0,33	3,00	3,00	1	0,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Matriz A_M comparada con mano de obra requerida (M)

	Tr	Tj	Cc	G	Sr	Sc	Srb	Peso
Tr	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,14	0,11	0,04
Tj	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,14	0,11	0,04
Cc	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,14	0,11	0,04
G	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33	0,14	0,11	0,04
Sr	3,00	3,00	3,00	3,00	1,00	0,33	0,11	0,10
Sc	7,00	7,00	7,00	7,00	3,00	1,00	0,33	0,26
Srb	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	3,00	1,00	0,48

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Matriz A_C tecnología comparada con calidad de la fruta (C)

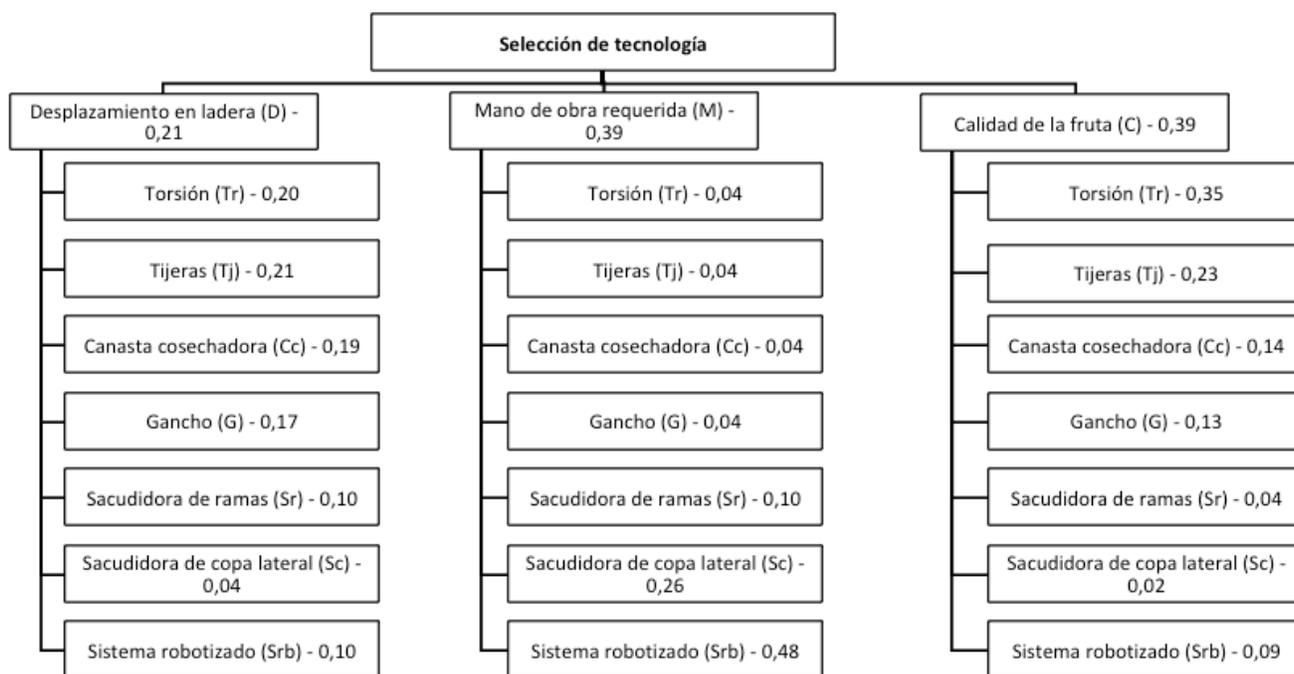
	Tr	Tj	Cc	G	Sr	Sc	Srb	Peso
Tr	1,00	3,00	3,00	5,00	7,00	9,00	3,00	0,35
Tj	0,33	1,00	3,00	3,00	7,00	9,00	3,00	0,23
Cc	0,33	0,33	1,00	1,00	5,00	7,00	3,00	0,14
G	0,20	0,33	1,00	1,00	5,00	7,00	3,00	0,13
Sr	0,14	0,14	0,20	0,20	1,00	3,00	0,33	0,04
Sc	0,11	0,11	0,14	0,14	0,33	1,00	0,14	0,02
Srb	0,33	0,33	0,33	0,33	3,00	7,00	1,00	0,09

Fuente: elaboración propia.

La información obtenida de las tablas anteriores se compiló y se ordenó en la representación gráfica de la solución AHP, como se muestra en la figura 4. Con

los datos obtenidos se analizaron las alternativas, realizando una multiplicación de la ponderación en cada criterio respecto al objetivo.

Figura 4. Matriz de Solución AHP



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, después de evaluar la afectación de cada criterio con el objeto de análisis y de realizar la multiplicación de los valores ponderados de cada variable, se obtuvieron los resultados descritos en la tabla 9. De esta manera, se encontró que el sistema robotizado es el más apropiado para la cosecha de cítricos en ladera, de acuerdo con los criterios evaluados y las condiciones existentes en la región. Los sistemas robotizados para cosechas de cítricos han sido ampliamente evaluados y usados alrededor del mundo, especialmente en terrenos planos (Ferreira *et al.*, 2018).

Tabla 9. Resultados análisis de jerarquización

Método de cosecha	Calificación
Sistema robotizado (Srb)	0,24
Torsión (Tr)	0,20
Tijeras (Tj)	0,15
Sacudidora de copa lateral (Sc)	0,12
Canasta cosechadora (Cc)	0,11
Gancho (G)	0,10
Sacudidora de ramas (Sr)	0,08

Fuente: elaboración propia.

La automatización de procesos como la cosecha de frutas es un reto. Sin embargo, existen esfuerzos importantes en temas como la visión para la detección de frutos (Aloisio *et al.*, 2012; Cubero *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2011; Mehta & Burks, 2014) y la integración con el *Internet of things* (IoT) (Li *et al.*, 2016). Este tipo de sistemas cada vez son más asequibles, especialmente por el uso de dispositivos móviles para la ejecución de algunas de las funciones necesarias para el proceso, como la detección de la madurez de la fruta y su localización (Cubero *et al.*, 2014; Ferreira *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2018; Vidal *et al.*, 2013). No obstante, aún se requieren avances en el diseño y la construcción de este tipo de dispositivos para la cosecha en zonas de ladera, puesto que en los principales países desarrolladores de estas tecnologías (ver figura 2) los cultivos se siembran en terrenos planos, lo cual se evidenció en la ausencia de literatura y patentes para terrenos de ladera.

Es claro que los costos iniciales del sistema robotizado son sustancialmente mayores con respecto a las otras alternativas. Sin embargo, los métodos manuales presentan gastos variables (salarios y prestaciones) de forma continua en el tiempo, mientras que un sistema robotizado requiere una alta inversión inicial y costos de mantenimiento por un período significativo. Por lo tanto, es vital comparar y evaluar cada caso de manera particular y no establecer una conclusión definitiva al respecto. Es importante resaltar que en el mundo se están realizando esfuerzos por buscar alternativas de cosecha automatizada a precios razonables y que los precios de este tipo de tecnología cada vez son menores (Kuznetsova, 2020).

CONCLUSIONES

Los países industrializados donde se cultivan cítricos son los mayores generadores de publicaciones y patentes sobre tecnologías para la cosecha de estos productos agrícolas. Por sus condiciones topográficas, las tecnologías en automatización de procesos de cosecha de frutas son enfocadas hacia el terreno plano, por lo que el conocimiento que se genera para terrenos de ladera es prácticamente inexistente.

Luego de haber aplicado el proceso analítico se concluyó que la implementación del sistema robotizado (Srb) es potencialmente la mejor opción para los cultivos de cítricos desarrollados en ladera en

Colombia. Aunque el sistema de cosecha por torsión dio un muy buen resultado, es importante tener en cuenta que al implementar robots se puede incrementar la productividad, pues estos pueden trabajar a un ritmo constante y más horas al día, sin sufrir fatiga o cansancio. Recordando que una de las principales problemáticas del sector es la consecución de mano de obra temporal calificada para el momento de la cosecha, el Srb podría ser una solución a este problema.

El desarrollo del sector cítrico colombiano debe tener como mira la investigación de la aplicabilidad de la robótica en el campo, pues las condiciones topográficas de los cultivos tradicionales en Colombia no permiten la adaptación de maquinaria arrastrada por tractores, como sucede en otros países.

Se recomienda, para futuras investigaciones, realizar un estudio económico que permita determinar la factibilidad financiera en el largo plazo de la alternativa seleccionada.

REFERENCIAS

- Aguilar-Niño, P., Escobar-Quijano, M. J., & Pássaro-Carvalho, C. P. (2012). Situación actual de la cadena de cítricos en Colombia: limitantes y perspectivas. En L. F. Garcés-Giraldo (ed.), *Cítricos: cultivo, poscosecha e industrialización* (pp. 7-47). Corporación Universitaria Lasallista.
- Aloisio, C., Mishra, R. K., Chang, C. Y., & English, J. (2012). Next generation image guided citrus fruit picker. *2012 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2012*, 37-41. <https://doi.org/10.1109/TePRA.2012.6215651>
- Bachche, S. (2015). Deliberation on design strategies of automatic harvesting systems: A survey. *Robotics, 4*(2), 194-222. <https://doi.org/10.3390/robotics4020194>
- Bassan, M. M., Mourão-Filho, F. A. A., Caron, V. C., Couto, H. T. Z., & Jacomino, A. P. (2013). The harvesting system affects the quality and conservation of the 'Tahiti' acid lime. *Scientia Horticulturae, 155*, 72-77. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.03.008>

- Coppock, G. (1961). Picking citrus fruit by mechanical means. *Florida State Horticultural Society Proceedings*, 1362, 247-251. <https://journals.flvc.org/fshs/article/download/101013/96957>
- Cubero, S., Aleixos, N., Albert, F., Torregrosa, A., Ortiz, C., García-Navarrete, O., & Blasco, J. (2014). Optimised computer vision system for automatic pre-grading of citrus fruit in the field using a mobile platform. *Precision Agriculture*, 15(1), 80-94. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9324-7>
- Cubero, S., Lee, W. S., Aleixos, N., Albert, F., & Blasco, J. (2016). Automated systems based on machine vision for inspecting citrus fruits from the field to postharvest — A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 1623-1639. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1767-1>
- Cui, H., Zhou, H., Xu, L., & Cui, Y. (2010). CN101982039A. Nantong Guangyi Electromechanical Co. Ltd, China.
- Ferreira, M. D., Sanchez, A. C., Braunbeck, O. A., & Santos, E. A. (2018). Harvesting fruits using a mobile platform: A case study applied to citrus. *Engenharia Agricola*, 38(2), 293-299. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n2p293-299/2018>
- Futch, S. H., & Roka, F. M. (2005). *Continuous canopy shake mechanical harvesting systems*. University of Florida. <https://ufdcimages.uflib.ufl.edu/IR/00/00/27/32/00001/HS23900.pdf>
- Gómez, B. G., Caicedo, A. A., & Gil, V. L. F. (comp.) (2008). *Tecnología para el cultivo de cítricos en la región Caribe colombiana*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. <https://doi.org/10.21930/978-958-8311-91-3>
- Hedden, S., & Coppock, G. (1968). Effects of the tree shaker harvest system on subsequent citrus yields. *Florida State Horticultural Society Proceedings*, 81, 48-52. <http://journals.fcla.edu/fshs/article/viewFile/99937/95907>
- Kuznetsova, A. A. (2020). Rational Pricing of fruit-harvesting robots. *Proceedings of 13th International Conference Management of Large-Scale System Development, MLSD 2020*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/MLSD49919.2020.9247787>
- Li, B., Zhou, A., Yang, C., & Zheng, S. (2016). The design and realization of fruit harvesting robot based on IOT. *Proceedings of the 2016 International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology (ICCIA), 2016*. <https://doi.org/10.2991/iccia-16.2016.29>
- Li, P., Lee, S. H., & Hsu, H. Y. (2011). Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems. *Procedia Engineering*, 23, 351-366. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2514>
- Mehta, S. S., & Burks, T. F. (2014). Vision-based control of robotic manipulator for citrus harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 102, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.01.003>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2020). *Cadena del cítricos, Indicadores e instrumentos. Primer semestre 2020*. MADR. [https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2020-03-30 Cifras Sectoriales.pdf](https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2020-03-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf)
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2015). *Revisión de la OCDE de las políticas agrícolas: Colombia 2015*. OCDE. <https://www.oecd.org/colombia/Colombia-Revision-OCDE-Políticas-Agrícolas-2015.pdf>
- Pássaro, C., Navarro, P., & Aguilar, A. (2012). Poscosecha. En L. F. Garcés-Giraldo (Ed.), *Cítricos: cultivo, poscosecha e industrialización* (pp. 223-284). Corporación Universitaria Lasallista.
- Peng, H., Shao, Y., Hu, Y., Wu, D., Chen, Y., & Lin, G. (2018). Maturity analysis of citrus based on machine vision and android mobile platform technology. *Proceedings 3rd International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City (ICITBS), 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICITBS.2018.00088>
- Puerta-Polanco, F. M. (2007). *Maquinaria y mecanización agrícola*. UNAD. <https://www.academia.edu/download/53141885/201619.pdf>

- Qinghai, L. (2017). CN108076832A. China.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Takashi, T. (1984). US4663925A. Kubota Corp, EE. UU.
- United States Department of Agriculture [USDA]. (2021). *Citrus: world markets and trade*. USDA. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/Citrus.pdf>
- Vidal, A., Talens, P., Prats-Montalbán, J. M., Cubero, S., Albert, F., & Blasco, J. (2013). In-line estimation of the standard colour index of citrus fruits using a computer vision system developed for a mobile platform. *Food and Bioprocess Technology*, 6(12), 3412-3419. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-1015-2>
- Ward, G. (2003). *New mechanical and robotic harvesting technologies to increase fruit production efficiency*. Department of Agriculture, Government of Western Australia.