

El progreso de la mejora genética en frutales: ¿Cómo serán las variedades y patrones en el Horizonte 2040?

Iban Eduardo¹, Pere Arús¹, Ramón Dolcet-Sanjuan²,
María José Rubio-Cabetas³⁻⁴, María Ángeles Moreno⁵
e Ignasi Iglesias⁶

¹IRTA-CRAG Bellatera, ²IRTA-Fruitcentre, ³Unidad de Hortofruticultura. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), ⁴Instituto Agroalimentario de Aragón – IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), ⁵CSIC-Estación Experimental de Aula Dei, ⁶Agromillora Group.

Según datos de 2019, las especies de fruta dulce y de frutos secos ocupaban en España 194.414 ha y 763.717 ha, respectivamente, con una superficie total de 958.131 hectáreas.

Introducción

Su aportación a la Producción Final Agraria fue del 18% (exceptuando vino, mosto y aceite de oliva), posicionándose muy cerca de las hortalizas con el 19%. Su producción ha experimentado cambios sustanciales en las últimas décadas en la tecnología de producción. Esto ha requerido una adaptación constante a los requerimientos tanto de la producción, como ambientales, de la distribución y de los consumidores. En la Unión Europea el escenario presente y futuro hay que enmarcarlo de forma unívoca en la adaptación a los requisitos de sostenibilidad ambiental impuestos en el marco del 'Green Deal' y de las estrategias 'de la granja a la mesa' y de la 'biodiversidad' que se aplicarán en la nueva PAC 2023-2027 (Iglesias, 2021a).

Entre otros objetivos establecidos, se encuentra la neutralidad de las emisiones de gases de efecto invernadero en el 'Horizonte 2050' y en una reducción del 55% en el 'Horizonte 2030'. Sin embargo, además de las consideraciones de sostenibilidad ambiental hay que tener en cuenta las exigencias de los consumidores en aspectos como la funcionalidad, la comodidad de consumo, la proximidad o la calidad gustativa. Y por supuesto, sin olvidar la sostenibilidad de las rentas de los productores, sin la cual no hay futuro para el sector productor.

La producción de fruta, ya sea dulce o de frutos secos, se basa en tres pilares fundamentales. El primero lo constituye el material vegetal, incluyendo patrones y variedades. El segundo la elección del sistema de conducción más adecuado para las condiciones edafo-climáticas y para cada combinación específica variedad/patrón. El tercer pilar lo constituye la tecnología de producción que incluye a los viveristas multiplicadores para la producción de planta de calidad, a los productores y a la tecnología de producción (riego, abonado, tratamientos, recolección, etc.).

Esta tecnología en su conjunto deberá estar encaminada a un uso eficiente de los inputs en el proceso productivo lo que supone un menor coste de producción y una mayor sostenibilidad ambiental y de las rentas de los productores. La innovación tecnológica se basa fundamentalmente en los avances en la mecanización, la sensórica o la monitorización, amén en un futuro de la robótica (Iglesias, 2021a). Son numerosas las referencias disponibles, tanto en fruta dulce como en frutos secos, que indican que aunando el progreso de la mejora genética en patrones y variedades con la innovación en la tecnología de producción son claves para el tránsito hacia la eficiencia en el uso de inputs y la intensificación sostenible (Iglesias, 2020; Iglesias et al., 2021a y b; Willet et al., 2019).

La disponibilidad de planta (patrones y variedades) de alta calidad genética y sanitaria, unido a su óptima adaptación a las diferentes zonas de cultivo, constituye el punto de partida para una innovación eficiente en fruticultura. Las mejores variedades posibilitarán una producción cada vez más sostenible ambientalmente mediante la incorporación de resistencias a plagas y enfermedades y también mejor adaptadas a las exigencias de los consumidores, y al cambio climático. En patrones, la mayor sostenibilidad vendrá por su mejor adaptación a las condiciones edáficas, con pH básico o ácido, salinidad, sequía o encharcamiento, eficiencia en el uso del agua, capacidad de control del vigor y volumen del árbol, alta eficiencia productiva e incorporación de resistencias a enfermedades y plagas (replantación, enfermedades del suelo, nematodos, pulgón lanígero, etc.).

En el presente artículo, se describen los aspectos más destacables referentes a la aportación de la mejora genética de patrones y variedades en especies frutales con la mirada puesta al 'Horizonte 2040'.

Los retos de la innovación en material vegetal

La mejora genética de frutales ha aportado soluciones a algunos de los retos planteados, como por ejemplo las nuevas variedades de manzano adaptadas a climas cálidos, las nuevas variedades autocompatibles de albaricoquero, almendro y cerezo, o las variedades de almendro de floración tardía. Pero a pesar de estos avances muchos son los retos que quedan por delante y a los que las nuevas variedades del año 2040 deberían hacer frente. Entre ellos, podríamos destacar (i) la sostenibilidad, que incluiría la adaptación a un abanico cada vez más reducido de productos fitosanitarios, fertilizantes inorgánicos y a las tecnologías de cultivo coherentes con la conservación de suelo, (ii) la adaptación al cambio climático, que incluiría la adaptación a nuevos escenarios de temperatura y pluviometría, y que implicará el aumento de la rusticidad y resiliencia en patrones y variedades, (iii) la resistencia/tolerancia frente a las plagas y enfermedades emergentes en dichos escenarios, (iv) la adaptación a las nuevas tecnologías, que incluye tanto las nuevas tecnologías de mecanización, y que suelen llevar cambios en cuanto a la arquitectura del árbol, como las nuevas estrategias de mejora basadas en marcadores moleculares. Y todo ello sin perder nunca de vista (v) la buena calidad del fruto, que implica mantener o aumentar la calidad sensorial, la presentación y la vida postcosecha, así como el desarrollo de nuevas tipologías de fruto que permitan aumentar el consumo.

Al control del vigor, a la izquierda franco de peral comparado con MA, se añade la mejor eficiencia productiva de los patrones enanizantes como el M9 en manzano (derecha con la variedad Pink Lady).

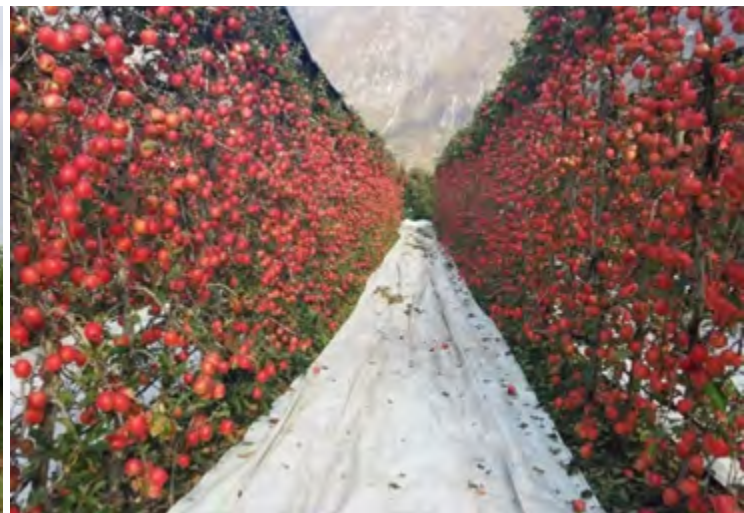
Traducción de los retos en caracteres a integrar en las nuevas variedades y patrones de las diferentes especies

Si intentamos concretar a nivel de especie, para el manzano podríamos destacar la relocalización del cultivo de variedades actuales con falta de coloración y el desarrollo de otras nuevas con alta calidad y adaptadas a climas cálidos, la resistencia al moteado, al *Penicillium* spp. y al fuego bacteriano, y nuevas tipologías con pulpa roja. En peral, también podríamos destacar la resistencia al moteado y fuego bacteriano, así como los cruzamientos interespecíficos entre variedades europeas y asiáticas para integrar las mejores características de ambas especies. En melocotonero, se deberían incorporar e integrar resistencias a varias enfermedades como la moniliosis, la sharka, la podredumbre negra (*Xanthomonas*) o el oídio, mejorar la vida del fruto en postcosecha y desarrollar nuevas tipologías de pulpa roja o piel verde en variedades de manzana tipo 'Granny Smith'. En albaricoquero, podríamos incluir avances en la resistencia a sharka, disminución de la acidez en las nuevas variedades y en la introducción de variedades autocompatibles. En cerezo y en ciruelo, la ampliación de la época de maduración y la disminución de los requerimientos de frío, así como la introducción de nuevas variedades autocompatibles. En cerezo, además deberíamos añadir la resistencia al rajado de frutos y a moniliosis. En almendro, se están estudiando los caracteres asociados a la calidad de fruto y la resistencia a enfermedades fúngicas de gran incidencia en nuevas áreas de expansión, así como el porte y arquitectura de los árboles para los nuevos sistemas de cultivo (Montesinos et al., 2021).

Retos actuales en portainjertos

Adaptación a factores abióticos agravados por el cambio climático:

tolerancia a sequía o asfixia radicular en suelos con problemas de encharcamiento, suelos básicos o ácidos, y tolerancia a las temperaturas más altas en la época de producción, así como a la falta de reposo invernal en alguno de los componentes de la combinación patrón-variedad. Por otro lado, la obtención de patrones tolerantes a enfermedades de suelo, que controlen el vigor y que posean un uso eficiente del agua. Así, se han establecido las bases moleculares de la tolerancia a la asfixia radicular en ciruelos mirabolanes (Amador et al., 2012; Rubio-Cabetas et al., 2018) y ala clorosis por deficiencia de hierro en mirabolanes e híbridos almendro x melocotonero (Gonzalo et al., 2011; 2012). Los estudios en sequía han sido los más numerosos (Bielsa et al., 2019, 2018b, 2018a, 2016) demostrando que los híbridos almendro x melocotonero y los ciruelos mirabolanes tienen dos respuestas a la sequía diferentes habiendo identificado un biomarcador (Bielsa et al., 2021).





Además de la tolerancia a la replantación, al fuego bacteriano y al pulgón lanígero, la mayor eficiencia productiva del portainjerto G-41 (micropropagado) de la serie "Geneva" se traduce en un incremento de la rentabilidad para el productor con respecto al M9-337T. En la figura, comparación de patrones injertados con la variedad de manzana 'Honey Crisp' en Cornell (USA) en su octavo año de producción. Fuente: Robinson (2018, Com. Personal).

De entre los híbridos G×N, 'Monegro' destaca por un uso más eficiente del agua (Bielsa et al., 2018a). Otros estudios de sequía con híbridos del género *Prunus* spp. con distinta base genética (GF 677, Cadaman, ROOTPAC 20 y ROOTPAC® R), demuestran que GF 677 y ROOTPAC® R poseen un uso más eficiente del agua (Jiménez et al., 2013). En particular, se encontró una acumulación de azúcares osmoprotectores y de prolina en el patrón GF 677 como mecanismo de adaptación a la sequía. En la misma línea, se están estudiando los mecanismos moleculares que regulan la arquitectura del almendro, la influencia del portainjerto y la interacción entre éste y la variedad a la hora de desarrollar un porte o unas ramificaciones determinadas y así, seleccionar patrones y variedades con distintos tamaños, portes y arquitecturas de copa, que puedan satisfacer las necesidades de los nuevos sistemas de cultivo en marcos más intensivos. Todo ello hará posible el desarrollo de marcadores genéticos útiles en la selección asistida para estos caracteres de interés si a la vez se estandarizaran los métodos de fenotipado.

Tolerancia a factores bióticos:

incorporación de resistencias a plagas y enfermedades, tanto a las actuales como a las emergentes. Entre ellas, cabría destacar la incorporación de resistencia/

tolerancia a fuego bacteriano, fitóftora o armillaria en portainjertos de manzano y peral, con fácil propagación clonal. En este caso, se puede mencionar la selección de los nuevos portainjertos de manzano en Geneva (USA), que incorporan resistencia al pulgón lanígero, fuego bacteriano y problemas de replantación (Robinson, 2020; Reig et al., 2018a). La solución a los nematodos agalladores se ha dado con los ciruelos mirabolán (*P. cerasifera*) diploides, como 'Adara' (Moreno et al., 1995a), los ciruelos hexaploides de crecimiento lento (*P. insititia* y *P. domestica*) como 'Adesoto' (Moreno et al., 1995b), 'Penta' y 'Tetra' (Nicotra et al.,), así como con los híbridos de hoja roja de la serie 'Garfi' x 'Nemared' (G×N): 'Garnem', 'Felinem' y 'Monegro' (Felipe, 2009). Aportan la resistencia a nematodos, además de otros caracteres de interés como el tamaño de la planta, vigor, productividad y la facilidad de propagación. Su éxito radica principalmente en transmitir un buen vigor, su resistencia (o inmunidad en el caso de algunos ciruelos) a nematodos del género *Meloidogyne* (Pinochet et al., 1999), su adaptación a suelos calcáreos y buena tolerancia a clorosis, además de un buen comportamiento en replantación. Posteriormente, se han desarrollado nuevos portainjertos del género *Prunus* con base genética de almendro, ciruelo y melocotonero,

tolerantes a la asfixia de raíces en suelos pesados, a nematodos agalladores y a la caliza activa en suelos calizos con pH elevado y algunos de ellos además con un eficiente control del vigor (Iglesias et al., 2020; Reig et al., 2018b; Font i Forcada et al., 2020). La identificación de los genes asociados a la resistencia de nematodos agalladores en almendro facilitará los trabajos de selección y la introducción de este carácter resistente en las nuevas selecciones (Duval et al., 2014).

Control del vigor del árbol, alta eficiencia productiva y buena calidad de fruto en los nuevos portainjertos híbridos de peral, con base genética de *Pyrus communis*, *Pyrus amygdaliformis* y *Pyrus elaeagrifolia*, y derivados de cruces interespecíficos entre especies adaptadas a suelos calizos y condiciones de sequía, y fácil propagación clonal (Simard, 2009; Claveria et al., 2012; Musachi et al., 2021). En manzano, son numerosos los trabajos de selección de patrones que permiten controlar el vigor y además mejorar la eficiencia productiva del M9, destacando por su impacto presente y futuro en el sector productor la serie "Geneva" de Estados Unidos. En melocotonero, hay que citar diferentes selecciones de ciruelos (Adesoto 101) e híbridos interespecíficos como los de la serie RootPAC que aportan un control eficiente del vigor además de una buena eficiencia productiva (Font

(A) Ramificación de un ideotipo de almendro y (B) arquitectura de una variedad con mayor vigor en ‘Garnem’ (izquierda) o menor vigor en ‘GN-8’ (derecha).



Portainjertos disponibles en diferentes especies de fruta dulce ordenados en función del vigor conferido a la variedad injertada.
Fuente: Iglesias (2021a).



	MUY ALTO	ALTO	ALTO-MEDIO	MEDIO	MEDIO-BAJO	BAJO
MANZANO	Franco, M-25	M-4, M-793, MM-111	M-7, MM-106, G-257, G-969	M-26, G-41, G-213	M-9, EMLA o NAKB, G-11	M-27, B-9, G-65
PERAL	Kirschensaler, BP-3, OHF-93	OHF-87, BP-1, Fox-9	BA-29 Pyrodwarf	M-A	M-H	M-C
MELOCOTONERO	GF-677 Garnem	Montclar, GF-305 Cadaman	Rootpac-R Tetra, Penta	Adesoto-101 Rootpac-40 Isthara	MP-29, Roopac 20	
CEREZO	F-12/1, Colt Santa Lucia (SL-64)	Adara, Maxma-14 Gisela 12, PI-KU 1	Gisela-6 Weiroof-158	Gisela 5 Clinton	Gisela-3, Lake Cass, Crawford	Clare Demil
ALBARICOQUERO	Franco albaricoquero	Mirobolan 29C	Montclar, GF-305 AP-65	Adesoto-101 Isthara		
CIRUELO EUROPEO CIRUELO JAPONÉS	Marianna 2624 Marianna GF 8/1	Mirobolan 29C Adara	Rootpac-R Tetra, Penta	Isthara Adesoto-101 Miral 3278-AD	Rootpac-20	
ALMENDRO	GF-677 Garnem	Garrigues Nemaguard	Rootpac-R	Adesoto IRTA-1 Isthara	Rootpac-20	

i Forcada et al., 2020; Reig et al., 2020; Iglesias et al., 2018, 2000). Actualmente, se está ensayando otro híbrido almendro x melocotonero (‘GN-8’) resistente a nematodos y de la misma serie que los citados anteriormente, con una considerable reducción del vigor. En la misma línea, se están estudiando los mecanismos moleculares que regulan la arquitectura del almendro, la influencia del portainjerto y la interacción entre éste y la variedad a la hora de desarrollar un porte o unas ramificaciones determinadas y así, seleccionar patrones y variedades con distintos tamaños y portes que puedan satisfacer las necesidades de los nuevos sistemas de cultivo en marcos más estrechos (Montesinos et al., 2021).

Obtención de nuevos portainjertos híbridos de *Prunus*, con polivalencia para diferentes especies frutales de hueso, con gradación de niveles de vigor, que garanticen un buen calibre y otros parámetros de calidad del fruto, estabilidad de la producción, reducción de costes de producción y de fácil propagación clonal (Bielsa et al., 2021, Iglesias, 2019; Iglesias y Torrents, 2020; Iglesias et al., 2020; Mestre et al., 2020; Reig et al., 2018b; 2018c; 2019; Font i Forcada et al., 2019; 2020).

Retos y nuevos métodos de mejora genética de variedades y patrones

La mejora genética convencional de especies frutales está limitada por dos caracteres esenciales de los árboles: el gran tamaño de las plantas y los largos períodos intergeneracionales (desde la polinización hasta la evaluación de la descendencia pasan entre 2 o 6 años según la especie). Esto supone un elevado coste debido a la ocupación de mucho espacio durante un largo periodo de tiempo. Para muchas especies, en 20 años se pueden hacer dos o tres generaciones efectivas, lo que es claramente insuficiente. Por lo tanto, es imprescindible reducir el tiempo entre generaciones y entre polinización y selección y, al mismo tiempo, llevar al campo únicamente aquellas plantas que tengan



PROYECTOS DE RIEGO LLAVE EN MANO

Solicita presupuesto: www.ritec.es/presupuesto



FABRICANTES • INSTALADORES • SOPORTE TÉCNICO 24/7

35 años de experiencia.

Especialistas en fertirriego.

Diseño agronómico.

Proyectos en más de 60 países.

Solicita presupuesto: www.ritec.es/presupuesto



APP MÓVIL
EQUIPO DE FERTIRIEGO
NUTRITEC



una alta probabilidad de ser seleccionadas. La primera parte es una cuestión de manejo en campo e invernadero, y la segunda, de selección precoz basada en el ADN y desarrollo de sistemas para una rápida propagación clonal.

La mejora basada en la **información genética** puede lograrse por dos vías: la primera consiste en seleccionar con marcadores de ADN todos aquellos caracteres para los que esto sea posible en estado de plántula. Este tipo de selección es practicada rutinariamente por cada vez más programas de mejora de frutales, pero por ahora se limita a algunos caracteres de herencia mendeliana simple. Se trata de integrar también los de herencia más compleja, ya que muchos de los caracteres de interés agronómico son cuantitativos. Esto supone desarrollar e implementar aproximaciones de selección genómica basada en el conocimiento de la asociación entre un elevado número de marcadores y los diferentes fenotipos de interés, y en la creación de complejos modelos estadísticos (Guajardo et al., 2020) y recoger sistemáticamente toda la información fenotípica (Bielsa et al., 2021; Mignard et al., 2021). Esto significará trabajar con muchos marcadores al mismo tiempo para predecir el comportamiento de cada plántula basándonos en el modelo estadístico creado con la información del conjunto de marcadores y fenotipos utilizados. Para implementar la selección genómica se debería obtener un número de plántulas muy superior al actual, por lo que las técnicas de polinización o de rescate de embriones mediante cultivo 'in vitro' deberán también ser mejoradas para lograr más semillas y plantas viables con menos esfuerzo. En resumen, se deberían obtener más plántulas en las que se deberá analizar un número elevado de marcadores (decenas o centenares) mientras todavía están en el invernadero. Esto permitiría pasar a campo un número limitado de plantas que deberían ser fenotipadas en detalle y usando para ello tecnologías de fenotipado de última generación siempre que sea posible (Lobato-Gómez et al., 2021a).

Esta aproximación, que sigue la norma de que el genotipo es el mejor fenotipo posible en esta primera fase, se complementa con el acortamiento del período intergeneracional gracias al crecimiento forzado de las plantas usando técnicas de cultivo in vitro, cámaras de cultivo o invernaderos, minimizando el período de germinación, juvenilidad, injerto, etc. Se trata de maximizar el número de generaciones por unidad de tiempo y, por tanto, la ganancia de selección (Watson et al., 2018).

Otro factor importante a tener en cuenta es que muchos de los genes que nos interesan vendrán de otras especies o de genotipos exóticos con muchas características indeseables. La integración en el genoma de estos genes se ha hecho raramente en frutales (p. ej. genes de resistencia al moteado en manzano) porque requiere un proceso larguísimo, ya que no se trata solamente de introducir el gen deseado, sino de

recuperar el resto del genoma de los materiales elite descartándose así las características no deseadas. Esto ya es posible gracias a aproximaciones como la introgresión asistida por marcadores (Serra et al., 2016) que permite integrar un fragmento de ADN con un gen de interés dentro del pool genético comercial en dos generaciones de retrocruzamiento. Además, la creación de colecciones de líneas con muy pocos fragmentos cromosómicos procedentes de materiales silvestres o exóticos en el fondo genético elite de algunos frutales, permitirá rescatar para la mejora nueva diversidad procedente de especies lejanas y altamente variables.

Algunas de las variedades antiguas o modernas, actualmente en cultivo, tienen enormes cualidades y son apreciadas por los consumidores, pero se convierten en obsoletas a causa de las mejoras introducidas en variedades más modernas, o de la necesidad de determinados caracteres en las variedades futuras (específicamente los que confieran mayor adaptación al cambio climático y los requerimientos de sostenibilidad y agricultura verde). Integrar en estos genotipos excepcionales otros genes que puedan mejorarlos manteniendo sus propiedades varietales básicas se considera inviable por métodos convencionales, en particular porque la reconstrucción de los genomas heterocigotos en generaciones segregantes aparece como un puzzle de imposible resolución. Métodos, como la "resíntesis", basados en la selección con marcadores que cubran bien el genoma (Eduardo et al., 2020) permiten encontrar parejas de líneas altamente homocigotas que cruzadas resultan en individuos parecidos a la variedad original, pero con algunos cambios relevantes (p. ej. época de maduración). Además, una vez obtenidas, las dos líneas parentales pueden ser mejoradas con relativa facilidad integrando genes de interés de otros orígenes, lo que permite una constante puesta al día de la variedad.

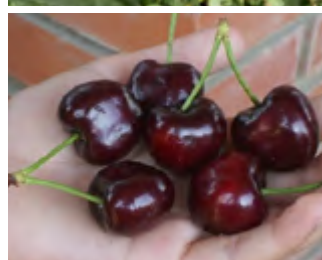
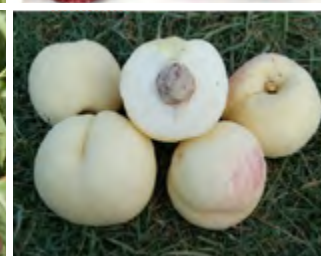
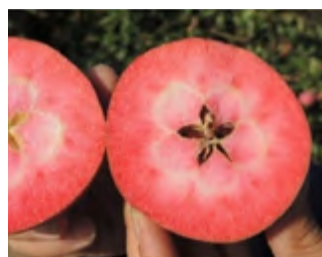
Las aplicaciones anteriores requieren la integración rutinaria de la toma de muestras (habitualmente de hoja) y extracción de ADN, además del estudio de un número variable de marcadores en muchos individuos, en períodos relativamente cortos de tiempo (días o semanas) y a precios bajos. Esto es posible, particularmente con el uso de determinadas plataformas de SNPs

Ejemplo de intensificación de las plantaciones en manzano (Wenatchee, Washington-USA) gracias a la mejora genética de los patrones utilizados, desde el franco al fondo con un marco de 6 x 7 m, derecha e izquierda M7 a 4 x 2 m y M9 en primer plano a 3,2 x 0,8 m



(marcadores de un solo nucleótido). Para ello la empresa tiene que disponer de una infraestructura interna que pueda cubrir estas necesidades o acceder a un servicio externo que proporcione eficientemente esta información. El pequeño tamaño de muchas empresas de mejora de frutales hace más viable la segunda opción que la primera, abriendo una oportunidad de mercado para servicios ya existentes o nuevos que puedan ofrecer a los mejoradores lo que necesitan, idealmente con un conocimiento suficiente del sector que permita extraer el máximo rendimiento de estas poderosas herramientas. Al mismo tiempo, la concepción de la mejora debe evolucionar hacia una planificación con objetivos muy precisos con respecto a las características deseadas en una nueva variedad, con la integración de herramientas de predicción para seleccionar parentales y descendencias, con la utilización de descendencias más numerosas y con una visión de los objetivos deseados más a largo plazo que impliquen varias generaciones de mejora.

La segunda vía hacia la obtención de nuevas variedades es la **edición génica**, es decir la modificación controlada de secuencias específicas de genes de función conocida que puedan producir efectos de interés en una variedad existente. Esta metodología, difiere de las plantas transgénicas en que las variedades cultivadas no contienen ADN externo. El nuevo fenotipo se consigue a base de modificar, a veces mínimamente, la secuencia de ADN de un gen en el lugar del genoma donde este gen se encuentra. El proceso de edición suele requerir la creación de plantas transgénicas, pero los genes transferidos se depuran previamente de la variedad final editada. La aplicación de esta técnica en frutales puede significar la remodelación de variedades ya existentes con la inclusión de características nuevas que aumenten su valor. Todo ello en un período corto de tiempo, inferior incluso al que supondría la resíntesis mencionada anteriormente. Existen algunos ejemplos conocidos de variedades de frutales obtenidos por transformación genética, como la ciruela europea resistente a sharka o las manzanas Artic® en las que el fruto no se oxida. Sin embargo, la edición génica en frutales está todavía en su infancia, aunque exista ya una pequeña lista de caracteres modificados genéticamente mediante esta tecnología (Lobato-Gómez et al., 2021b).



- » **Kisabelle**
- » **Rockit**
- » **Q-Tee**
- » **FAV1-24**
- » **Perla-3501**
- » **Ice Peach**
- » **Cristalina**
- » **Lucia Myrtea**

Ejemplos de innovación varietal en diferentes especies frutales. Los avances en la creación de variabilidad unido a las nuevas técnicas de edición génica, acelerarán como nunca hasta ahora el proceso de mejora genérica de variedades y patrones.

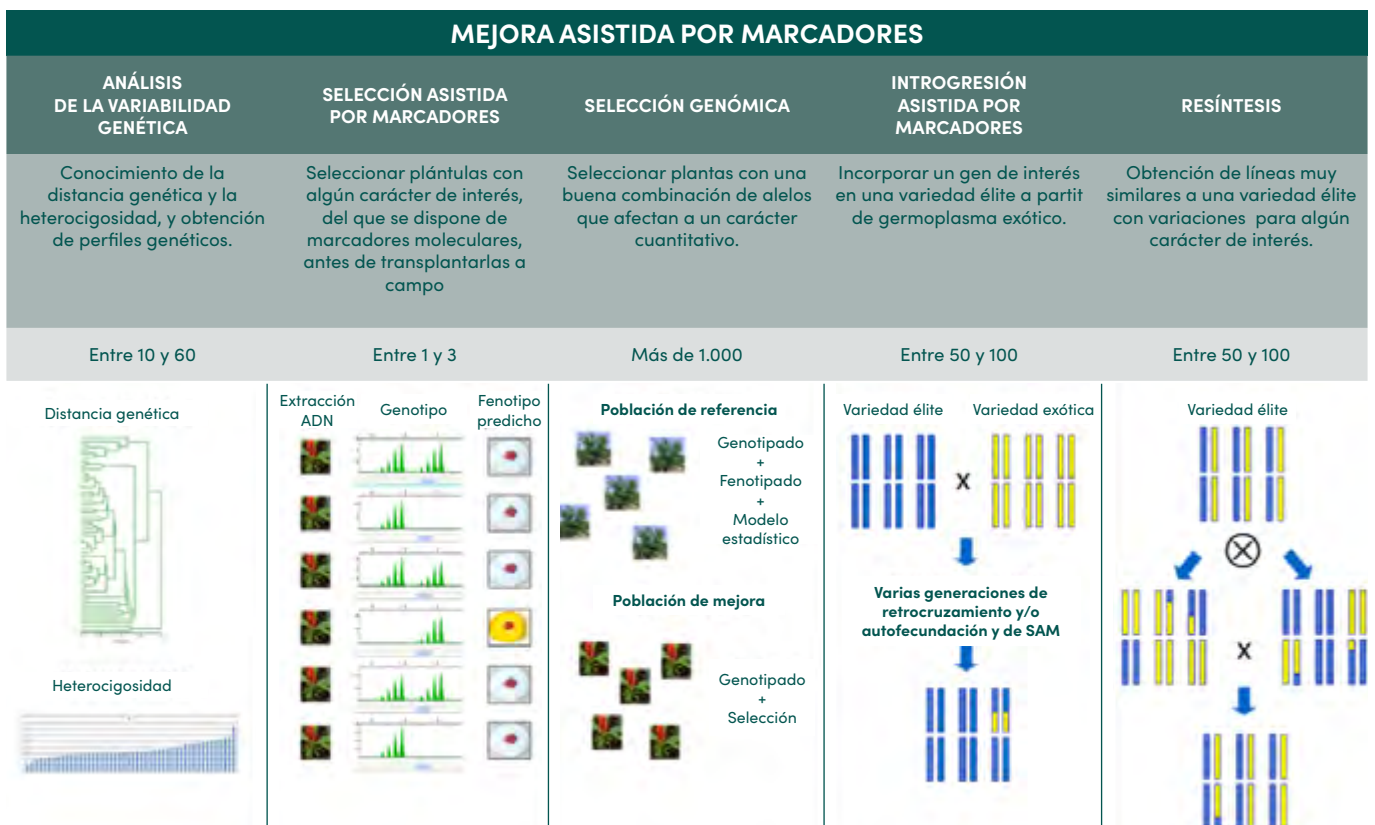
La combinación de los mejores patrones y variedades, unido a la arquitectura bidimensional de la copa y la tecnología de producción caracterizaran la fruticultura en el Horizonte 2040 integrando eficientemente la monitorización, digitalización, mecanización y robótica para el uso eficiente de los inputs. A la izquierda tratamiento multilínea en viña (Over Tree Row), a la derecha recolección robotizada en manzana.

Siendo la edición génica una tecnología con un potencial enorme, su aplicación puede estar comprometida a corto-medio plazo por varias razones. Los aspectos regulatorios son todavía un factor limitante en Europa, ya que las plantas editadas tienen igual consideración que las transgénicas y la posibilidad de que este marco legal cambie, a qué plazo y en qué sentido es de muy difícil predicción. Sin embargo, estas limitaciones regulatorias se han reducido o desaparecido en un creciente número de países del resto del mundo, lo que debe ser tenido en cuenta por las empresas que se dirigen a un mercado global. Hay otros elementos de tipo comercial, como ¿va a tener la misma aceptación por el consumidor una variedad procedente de edición génica que otra convencional?. Es posible que esta aceptación sea más fácil en especies de gran cultivo que suelen formar parte de alimentos procesados, pero quizás en frutales y hortalizas, que se consumen en fresco, o en otros productos como el vino existan mayores reticencias. En otro orden de cosas, hay aspectos de tipo más técnico, uno de los cuales es si el problema que se pretende resolver depende de la modificación de un gen o un pequeño número de genes.

Muchas veces la solución no se conoce y obliga a un período de experimentación previa que puede ser largo, con costes y riesgos evidentes. Otra cuestión es si la variedad de interés es fácilmente editable. En muchas especies de frutales, solamente algunos genotipos son tratables para esta tecnología mientras que, en otras, como en casi todos los frutales de hueso, la especie es recalcitrante al uso de tecnologías *in vitro*. En cualquier caso, la edición génica va a ser una metodología de uso creciente en los programas de mejora, que tendrán que integrarla de una manera u otra dentro de su plan de investigación y desarrollo.

Las variedades o portainjertos seleccionados a partir de programas de mejora, basados en el cruzamiento de parentales con caracteres de interés, que incorporan ahora o en un futuro las técnicas de selección asistida por marcadores, siguiendo estrategias de resíntesis o de edición génica, necesitan ser propagados clonalmente, con garantías sanitarias y de estabilidad varietal. Las empresas de propagación *in vitro* de portainjertos y variedades han incorporado el microinjerto y el crecimiento en invernadero o vivero en su sistema productivo de plantas listas para su plantación en campos de todo el mundo. Los costes de producción de dichas plantas son, en gran parte, debidos a la mano de obra especializada requerida para la correcta manipulación de los brotes en condiciones asépticas. La reducción de dichos costes en las empresas propagadoras pasa por el diseño de sistemas de cultivo *in vitro* que permitan reducir los tiempos de manipulación de las plántulas y su automatización (Dolcet-Sanjuan y Mendoza 2020).

Objetivos para los que se pueden utilizar las principales estrategias de mejora basadas en marcadores moleculares y la edición génica y esquema de cada una de ellas.



Las empresas tanto de mejora de frutales como las viverísticas, propagadoras o multiplicadoras del material vegetal, tienen una gran oportunidad para abordar los retos del futuro en la innovación de variedades y patrones, de forma que esta innovación se traslade de forma eficiente al sector productor. Ello requerirá un período importante de cambios para conseguir adaptarse a unos retos tecnológicos sin precedentes, que requerirán una inversión importante en conocimiento e infraestructura. Estos retos, supondrán también nuevas oportunidades, que ya han sido o están siendo realizadas por los mejoradores de cultivos herbáceos (cultivos extensivos y hortícolas), por lo que existen modelos donde inspirarse en el caso de los frutales. En este caso, el pequeño tamaño de muchas de las empresas de mejora y propagadoras de frutales supone una singularidad adicional, que necesitará aproximaciones innovadoras y posiblemente implicará una importante remodelación del sector.

Conclusiones

La mejora genética de patrones y variedades ha experimentado un importante avance en los últimos años, aunque diferencial entre especies y con un mayor avance en variedades. Los retos de futuro son múltiples y pasan por una producción sostenible ambientalmente para los productores y por una adaptación a los requerimientos de los circuitos comerciales y de los consumidores. La consecución de estos retos se basa fundamentalmente en la innovación en material vegetal y en la tecnología de producción.

Con respecto a la innovación en variedades y portainjertos, el camino recorrido en las últimas décadas ha sido muy destacable, pero deberá acelerarse ante los retos urgentes del futuro como son la adaptación al cambio climático y a una fruticultura de precisión ó 4.0, conducente al uso eficiente de los inputs mediante una intensificación sostenible. El hecho de tratarse de numerosas especies frutales, de muchas variedades y patrones, con superficies reducidas en comparación con los cultivos extensivos (cereales, hortícolas, etc.), disminuye el impacto de la innovación en cada especie por la dispersión de los recursos en la obtención de nuevas variedades y patrones.

Los importantes avances experimentados en las herramientas de creación de variabilidad y de selección de descendencias, como la edición genética, abren un camino prometedor al permitir reducir el período entre generaciones y posibilitar una selección más eficiente. Y en el Horizonte 2040, sin lugar a dudas, el camino recorrido habrá sido espectacular y difícil de predecir al albor de los enormes avances de la ciencia al servicio de la mejora genética y de la innovación. Combinado este avance con el de las nuevas tecnologías de producción como la mecanización, la sensorica, la monitorización o la robótica, no es difícil imaginar cómo serán las plantaciones del futuro y los frutos que consumiremos. Una historia apasionante para dar respuesta a los retos de la alimentación en nuestro planeta para el siglo XXI.

Referencias

- Amador ML, Sancho S, Bielsa B, Gomez-Aparisi J, Rubio-Cabetas MJ (2012) Physiological and biochemical parameters controlling waterlogging stress tolerance in *Prunus* before and after drainage. *Physiol. Plant.* 144, 357–68. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01568.x>
- Bielsa, B., Bassett, C., Glenn, D.M., Rubio-Cabetas, MJ (2018a) Assessing field *Prunus* genotypes for drought responsive potential by carbon isotope discrimination and promoter analysis. *Agronomy* 8, 42. <https://doi.org/10.3390/agronomy8040042>
- Bielsa B, Hewitt S, Reyes-chin-wo S, Dhingra A, Rubio-Cabetas MJ (2018b) Identification of water use efficiency related genes in ‘Garnem’ almond-peach rootstock using time-course transcriptome analysis. *PLoS One* 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205493>
- Bielsa B, Leida, C, Rubio-Cabetas MJ (2016) Physiological characterization of drought stress response and expression of two transcription factors and two LEA genes in three *Prunus* genotypes. *Sci. Hortic. (Amsterdam)* 213, 260–269.
- Bielsa B, Montesinos Á, Espiau MT, Ansón JM, Jaime SJ, Laya D, Sanz MA, Estopañán G, González V, Grimplet J, Rubio-Cabetas MJ (2021) Mejora genética del almendro en el CITA. Pasado, presente y futuro. *Agricultura* 1047, 48-55.
- Bielsa B, Sanz M, Rubio-Cabetas M (2019) Uncovering early response to drought by proteomic, physiological and biochemical changes in the almond × peach rootstock ‘Garnem’. *Funct. Plant Biol.* 46, 994–1008. <https://doi.org/10.1071/FP19050>
- Bielsa, B.; Sanz, M.Á.; Rubio-Cabetas, M.J. ‘Garnem’ and Myrobalan ‘P.2175’: Two Different Drought Responses and Their Implications in Drought Tolerance. *Horticulturae* 2021, 7, 299. <https://doi.org/10.3390/horticulturae709029>
- Claveria E, Asín L, Iglesias I, Vilardell P, Bonany J, Simard MH, Dolcet-Sanjuan R (2012) In Vitro Screening for Tolerance to Iron Chlorosis as a Reliable Selection Tool in a Pear Rootstock Breeding Program. *Acta Hort.* 935, 199-206.
- Dolcet-Sanjuan R, Mendoza CR (2020) Reactor system for in vitro culture of plant material, kit for transforming a receptacle into a reactor suitable for the system and method for in vitro culture of plant material using the reactor system. *WIPO PCT WO 2020/109637 A1*. Priority date: November 29th, 2018.
- Duval H, Hoerter M, Polidori J, Confolent C, Masse M, Moretti A, et al. (2014) High-resolution mapping of the RMia gene for resistance to root-knot nematodes in peach. *Tree Genet Genomes* 10,297–306. <https://doi.org/10.1007/s11295-013-0683-z>
- Eduardo I, Alegre S, Alexiou K, Arús P (2020) Resynthesis: Marker-based partial reconstruction of elite genotypes in clonally-reproducing plant species. *Frontiers in Plant Science* 11, 1205 23456789(),-volV() 0123458697(),-volV()
- Felipe AJ (2009) ‘Felinem’, ‘Garnem’, and ‘Monegro’ almond × peach hybrid rootstocks. *HortScience* 44, 196–197.
- Font i Forcada C, Reig G, Giménez R, Mignard P, Mestre L, Moreno MA (2019) Sugars and organic acids profile and antioxidant compounds of nectarine fruits influenced by different rootstocks. *Sci. Hortic.* 248, 145-153. (<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.12.010>)
- Font i Forcada C, Reig G, Mestre L, Mignard P, Betrán JÁ, Moreno MÁ (2020) Scion × rootstock response on production, mineral composition and fruit quality under heavy-calcareous soil and hot climate. *Agronomy* 10(8), 1159 (doi:10.3390/agronomy10081159)

- Gonzalo MJ, Moreno MA, Gogorcena Y (2011) Physiological responses and differential gene expression in *Prunus* rootstocks under iron deficiency conditions. *J. Plant Physiology* 168: 887-893. doi:10.1016/j.jplph.2010.11.017
- Gonzalo MJ, Dirlwanger E, Moreno MA, Gogorcena Y (2012) Genetic analysis of iron chlorosis tolerance in *Prunus* rootstocks. *Tree Genetics & Genomes* 8: 943-955. DOI 10.1007/s11295-012-0474-y
- Guajardo V, S Solís, R Almada, C Saski, K Gasic, Moreno MA (2020) Genome-wide SNP identification in *Prunus* rootstocks germplasm collections using Genotyping-by-sequencing (GBS): phylogenetic analysis, distribution of SNPs and prediction of their effect on gene function. *Scientific Reports* 10 (1467), 1-14 (doi.org/10.1038/s41598-020-58271-5)
- Iglesias I (2019) Costes de producción, sistemas de formación y mecanización en frutales, con especial referencia al melocotonero. *Revista de Fruticultura* 69, 50-59.
- Iglesias I, Torrents, J (2020) Millora Genètica de portaempelts de presseguer: la visió des d'una empresa viverística. In: Dossier Tècnic DARP num. 103: "Novetats en portaempelts de presseguer".
- Iglesias I, Torrents J, Moreno MA, Ortíz M (2020) Actualización de los portainjertos utilizados en cerezo, duraznero y ciruelo. *Revista Frutícola* 42(2), 8-18.
- Iglesias I (2021a) Retos para una agricultura eficiente y sostenible. *Vida Rural* 500, 82-90.
- Iglesias, I (2021b) La intensificación sostenible como respuesta al Pacto Verde de la Unión Europea: retos y ejemplos en la producción agrícola y el consumo alimentario. *Revista de Fruticultura* 79, 45-57.
- Iglesias I, Foles P, Oliveira C (2021b) El cultivo del almendro en España y Portugal: situación, innovación tecnológica, costes, rentabilidad y perspectivas. *Revista de Fruticultura* 81, 6-49.
- Iglesias I, Torrents, J, Zuñiga, M, Marzo C, Giori, M (2021c) Nuevos modelos agronómicos para una producción eficiente de ciruelo japonés y americano. *Revista de Fruticultura, Especial Albaricoquero* 70-99.
- Jiménez S, Dridi J, Gutiérrez D, Moret D, Irigoyen JJ, Moreno MA, Gogorcena Y (2013) Physiological, biochemical and molecular responses in four *Prunus* rootstocks submitted to drought stress. *Tree Physiology* 33: 1061-1075 (doi:10.1093/treephys/tpt074).
- Lobato-Gómez M, Guajardo V, Solís S, Martínez-García PJ, Gasic K, Moreno MA (2021a) Genetic study of flower traits in a segregating peach-almond progeny. *Acta Hort.*, 1307: 63-69. DOI 10.17660/ActaHortic.2021.1307.10
- Lobato-Gómez M, Hewitt S, Capell T, Christou P, Dhingra A, Girón-Calva PS (2021b) Transgenic and genome-edited fruits: background, constraints, benefits, and commercial opportunities. *Hortic Res.* 8, 166.
- Mestre L, Reig G, Font i Forcada C, Moreno MA (2020) Influència de portaempelts de prunera en el comportament agronòmic i qualitat de fruit de la varietat de préssec 'Catherina'. Dossier Tècnic 'Novetats en portaempelts de presseguer' 103, 15-20.
- Mignard P, Beguería S, Reig G, Font i Forcada C, Moreno MA (2021) Genetic origin and climate determine fruit quality and antioxidant traits on apple (*Malus x domestica* Borkh). *Sci. Hortic.* 285 (2021) 110142 (<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110142>)
- Montesinos Á, Thorp G, Grimplet J, Rubio-Cabetas MJ (2021) Phenotyping Almond Orchards for Architectural Traits Influenced by Rootstock Choice. *Horticulturae* 7, 159. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7070159>
- Moreno MA, Tabuenca MC, Cambra R (1995a) Adesoto 101, a plum rootstock for peaches and other stone fruit. *HortScience* 30 (6), 1314-15. <https://doi.org/10.21273/hortsci.30.6.1314>.
- Moreno MA, Tabuenca MC, Cambra R (1995b) Adara, a plum rootstock for cherries and other stone fruit species. *HortScience* 30 (6), 1316-17. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.6.1316>.
- Mussacchi S, Iglesias I, Neri D (2021) Training systems and sustainable orchard management for European pear (*Pyrus communis* L.) in the Mediterranean Area: A Review. *Agronomy* 11, 1765. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091765>
- Nicotra A, Moser L (1997) Two new plum rootstocks for peach and nectarines: Penta and Tetra. *Acta Hort.*, 451, 269-271. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.451.30>.
- Pinochet J, Calvet C, Hernández-Dorrego A, Bonet A, Felipe A, Moreno MA (1999) Resistance of peach and plum rootstocks from Spain, France, and Italy to rootknot nematode *Meloidogyne javanica*. *HortScience* 34 (7): 1259-1262. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.34.7.1259>.
- Rubio-Cabetas MJ, Pons C, Bielsa B, Amador ML, Marti C, Granell A (2018) Preformed and induced mechanisms underlies the differential responses of *Prunus* rootstock to hypoxia. *J. Plant Physiol.* 228, 134-149. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.06.004>
- Reig G, Lordan J, Fazio G, Grusak MA, Hoying S, Cheng, Francescotto P, Robinson T (2018a) Horticultural performance and elemental nutrient concentrations on 'Fuji' grafted on apple rootstocks under New York State climatic conditions. *Sci. Hortic.* 227, 22-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2017.07.002>
- Reig G, Font i Forcada C, Mestre L, JA Betrán, MA Moreno (2018b) Potential of new *Prunus cerasifera* based rootstocks for adapting under heavy and calcareous soil conditions. *Sci. Hortic.* 234, 193-200. (<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.037>)
- Reig G, Zarrouk O, Font i Forcada C, Moreno MA (2018c) Anatomical graft compatibility study between apricot cultivars and different plum based rootstocks. *Sci. Hortic.* 237:67-73. (<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.035>)
- Reig G, Salazar A, Zarrouk O, Font i Forcada C, Val J, Moreno MA (2019) Long-term graft compatibility study of peach-almond hybrid and plum based rootstocks budded with European and Japanese plums. *Sci. Hortic.* 243, 392-400. (<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.038>)
- Serra O, Donoso JM, Picañol R, Batlle I, Howad W, Eduardo I, Arús P (2016) Marker-assisted introgression (MAI) of almond genes into the peach background: a fast method to mine and integrate novel variation from exotic sources in long intergeneration species. *Tree Genetics & Genomes* 12:13. DOI: 96 10.1007/s11295-016-1056-1.
- Simard ME (2009) French contribution to rootstocks breeding and evaluation. *International Conference on Fruit Tree Rootstocks / Portinnesti degli alberi da frutto. Universidad de Pisa (Italia), Junio 2009.* Pág 33-43.
- Watson et al (2018) Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding *Nature Plants* 4, 27-29.
- Willet et al (2019) Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet Comissions.* [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)