

Enrique Quevedo García
Alba Milena Pacheco Villamizar
Giovanni Orlando Cancino Escalante

**El crecimiento vegetal del
durazno [*Prunus persica* (L.)
Batsch.] variedad Jarillo:**
Un estudio en tres zonas con
diversas altitudes en la
provincia de Pamplona,
Norte de Santander, Colombia

**El crecimiento vegetal del durazno [*Prunus persica* (L.)
Batsch.] variedad Jarillo:** Un estudio en tres zonas con
diversas altitudes en la provincia de Pamplona, Norte de
Santander, Colombia

El crecimiento vegetal del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad Jarillo: Un estudio en tres zonas con diversas altitudes en la provincia de Pamplona, Norte de Santander, Colombia

Enrique Quevedo García, Ph.D
Alba Milena Pacheco Villamizar
Giovanni Orlando Cancino Escalante, Ph.D



Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz

El crecimiento vegetal del durazno [Prunus persica (L.) Batsch.] variedad Jarillo: Un estudio en tres zonas con diversas altitudes en la provincia de Pamplona, Norte de Santander, Colombia / Enrique Quevedo García, Alba Milena Pacheco Villamizar y Giovanni Orlando Cancino Escalante -- Pamplona: Universidad de Pamplona. 2024.
135 p. ; 17 cm x 24 cm.

ISBN (digital): 978-628-7656-31-4

© **Universidad de Pamplona**

Sede Principal Pamplona, Km 1 Vía Bucaramanga-
Ciudad Universitaria. Norte de Santander, Colombia.

www.unipamplona.edu.co

Teléfono: 6075685303

El crecimiento vegetal del durazno [Prunus persica (L.) Batsch.] variedad Jarillo: Un estudio en tres zonas con diversas altitudes en la provincia de Pamplona, Norte de Santander, Colombia

Enrique Quevedo García, Ph.D

Alba Milena Pacheco Villamizar

Giovanni Orlando Cancino Escalante, Ph.D

ISBN (digital): 978-628-7656-31-4

Primera edición, julio de 2024

Colección Ciencias Pecuarias y Agronomía

© Sello Editorial Unipamplona

Rector: Ivaldo Torres Chávez Ph.D

Vicerrector de Investigaciones: Aldo Pardo García Ph.D

Jefe Sello Editorial Unipamplona: Caterine Mojica Acevedo

Corrección de estilo: Andrea del Pilar Durán Jaimes

Diseño y diagramación: Laura Angelica Buitrago Quintero

Cubierta de libro creada con la ayuda de Inteligencia Artificial (IA)

Hecho el depósito que establece la ley. Todos los derechos reservados.
Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin permiso del editor.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Pamplona a través del proyecto interno titulado “Aporte al estudio de la huella genómica mediante marcadores moleculares SSR de *Prunus persica* (var. amarillo jarillo y gran jarillo) y el patógeno *Monilinia fruticula* en cultivos comerciales de durazno en la provincia de Pamplona”, quien brindó el apoyo económico y logístico necesario para el desarrollo del proyecto y a todos los productores de durazno, que de alguna manera contribuyeron al éxito de esta investigación. La ayuda recibida fue fundamental para el logro de los objetivos planteados y la generación de nuevo conocimiento en el área de estudio. Igualmente apreciamos las recomendaciones por parte de la profesora Susan Cancino, MBA.

Contenido

Índice de tablas	9
Índice de figuras	11
Introducción	13

CAPÍTULO II 33

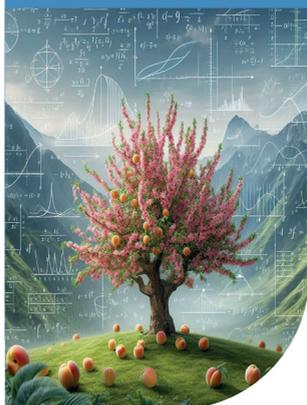
15 CAPÍTULO I

17 El crecimiento vegetal

23 Patrones de crecimiento

25 El análisis de crecimiento

29 Referencias



35 Injertación en plantas perennes

37 Proceso inicial a nivel anatómico e histológico

40 Consideraciones fisiológicas para que se realice la acción de las hormonas

42 Transporte de las hormonas

46 Características de las hormonas y sustancias que participan en la injertación

58 Mecanismo de acción para regenerar el tejido del patrón y la variedad

65 Conclusiones

66 Referencias

CAPÍTULO III 73

75 Los modelos matemáticos

79 Procesos fisiológicos que pueden ser modelados: el crecimiento y desarrollo vegetal

83 Modelos utilizados en el análisis de crecimiento de plantas

86 Estudios sobre modelos matemáticos para estimar el crecimiento vegetativo y reproductivo de las plantas

90 Referencias

CAPÍTULO IV 95

97 Introducción

99 Características, biológicas y agronómicas del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad amarillo

102 Metodología

110 Resultados

127 Conclusiones

129 Recomendaciones

131 Referencias

Índice de tablas

Tabla 3.1	Estudios sobre modelos matemáticos para estimar el crecimiento vegetativo de plantas	88
Tabla 4.1	Localización de las fincas	103
Tabla 4.2	VARIABLES UTILIZADAS EN EL ESTUDIO	106
Tabla 4.3	Modelos de regresión para estimar el largo del limbo en las tres fincas	110
Tabla 4.4	Modelos de regresión para estimar el ancho del limbo en las tres fincas	112
Tabla 4.5	Modelos de regresión para estimar el producto del largo por ancho del limbo en las tres fincas	113
Tabla 4.6	Modelos de regresión para estimar el área del limbo en las tres fincas	115
Tabla 4.7	Modelos de regresión para estimar peso seco del limbo en las tres fincas	116
Tabla 4.8	Modelos de regresión para estimar el diámetro ecuatorial del fruto en las tres fincas	118
Tabla 4.9	Modelos de regresión para estimar diámetro longitudinal del fruto en las tres fincas	119
Tabla 4.10	Modelos de regresión para estimar el peso seco del fruto en las tres fincas	121
Tabla 4.11	Modelos de regresión para estimar el Índice de Área Foliar del árbol en las tres fincas	122
Tabla 4.12	Modelos de regresión para estimar la materia seca del árbol en las tres fincas	125

Índice de figuras

Figura 1.1	División celular	18
Figura 1.2	Esquema del ciclo celular en plantas	20
Figura 1.3	Diferenciación celular en las plantas	21
Figura 1.4	Disposición de los diferentes meristemas en las plantas	23
Figura 2.1	Injerto de púa	38
Figura 2.2	Principales sitios de síntesis de las hormonas vegetales	45
Figura 2.3	Diagrama esquemático del proceso de injerto en hipocótilos de <i>Arabidopsis thaliana</i> en tres etapas formación de callos, fusión del tejido y reconexión vascular	47
Figura 2.4	Biosíntesis del ácido indolacético (AIA) a partir del triptófano	48
Figura 2.5	Esquema general de la biosíntesis de las giberelinas (Gas) y su compartimentalización subcelular en plantas superiores ...	50
Figura 2.6.	Etapa 1 de la ruta de síntesis de GAs	51
Figura 2.7	Zeatina (6-(4-hidroxi-3-metilbut-trans-2-enilamino)	53
Figura 2.8	Los metabolitos secundarios se activan en los injertos como consecuencia de la acción mecánica	57
Figura 2.9	Diferentes respuestas de crecimiento según la concentración de auxina en raíces yemas y tallos	59
Figura 4.1	Flor, Árbol, y fruto del durazno [<i>Prunus persica</i> (L.) Batsch.] variedad jarillo	99
Figura 4.2	provincia de Pamplona, región suroccidente del Departamento Norte de Santander	102
Figura 4.3	Diagrama de dispersión del modelo sigmoideal del largo del limbo	111
Figura 4.4	Diagrama de dispersión del modelo sigmoideal del ancho del limbo	112
Figura 4.5	Diagrama de dispersión del modelo sigmoideal del producto del largo por ancho del limbo	114
Figura 4.6	Diagrama de dispersión del modelo sigmoideal del área del limbo	115

Figura 4.7	Diagrama de dispersión del modelo sigmoideal del peso seco del limbo	117
Figura 4.8	Diagrama de dispersión del modelo cubico del diámetro ecuatorial del fruto	118
Figura 4.9	Diagrama de dispersión del modelo cubico del diámetro longitudinal del fruto	120
Figura 4.10	Diagrama de dispersión del modelo cubico del peso seco del fruto	121
Figura 4.11	Diagrama de dispersión del modelo sigmoideal del Índice de Área Foliar del árbol	123
Figura 4.12	Diagrama de dispersión del modelo cúbico de la materia seca del árbol	125

Introducción

La producción de durazno, específicamente la variedad Jarillo, es un motor clave para la economía de la provincia de Pamplona, Norte de Santander y representa una fuente significativa de ingresos para los agricultores. En efecto, es un producto que se ha adaptado a las condiciones ecoambientales locales siendo altamente comercializado en el mercado interno debido a su valor económico y nutricional. Más bien, se caracteriza por ser un monocultivo, así como un sistema de producción liderado por pequeños y medianos productores (Cancino-Escalante, Cancino, Quevedo, 2020; Villamizar, 2008).

De hecho, el durazno es originario de zonas templadas y se ha adaptado a climas diversos. Por lo tanto, las condiciones tropicales en el que el fotoperiodo, así como la temperatura son uniformes a lo largo del año, no hacen parte de su fisiología natural como cultivo. Por esta razón, dicha producción se realiza de manera forzada por medio de métodos de cultivo tradicionales que emulan los ambientes naturales de progreso del cultivo, permitiendo una producción más estable (Pérez, 2007).

Por su parte, en la provincia de Pamplona, la producción se ha llevado a cabo mediante la introducción de la fruta sin previo estudio técnico o científico, sino que se ha basado específicamente en la intuición campesina y de los agricultores que han trabajado con la variedad. En este sentido, el desarrollo y manejo adecuado de los cultivos de durazno requiere de investigación fisiológica que permita entender y analizar su comportamiento en diferentes condiciones ambientales.

Esta información es fundamental para el diseño de estrategias que permitan maximizar la producción y la calidad de los cultivos, minimizando el impacto ambiental y optimizando el uso de recursos. Además, la investigación fisiológica puede contribuir al desarrollo de

nuevas variedades más resistentes y adaptadas a las condiciones locales, lo que puede mejorar la productividad y la rentabilidad del sector agrícola.

En este aspecto la importancia económica del durazno para la región de Norte de Santander, Colombia, hace que sea necesario contribuir al desarrollo de su cultivo como un sistema eficiente de producción. Conociendo los factores que afectan el crecimiento, así como el desarrollo de la planta, se puede mejorar su manejo agronómico en cuestiones relacionadas con sus necesidades nutricionales, hídricas y de fertilización lo cual haría más competitivo el cultivo. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue construir modelos de regresión que permitan estimar el crecimiento vegetativo del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo, en tres localidades con diferentes altitudes en la provincia de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

El libro está dirigido a una audiencia diversa que abarca tanto a los agricultores locales como a investigadores, académicos y responsables de la toma de decisiones en el sector agrícola. Para los agricultores de la región, constituye una fuente invaluable de conocimiento que puede mejorar significativamente sus prácticas agronómicas, permitiéndoles optimizar la producción de durazno.

En consecuencia, se desarrolla en cuatro capítulos:

Capítulo I

Aquí se presentan los aspectos conceptuales sobre el crecimiento vegetal, su análisis e importancia biológica.

Capítulo II

Se enfoca en la fisiología del proceso de injertación en plantas perennes.

Capítulo III

Se aborda los modelos matemáticos para predecir el crecimiento y desarrollo vegetal.

Capítulo IV

Se presenta un estudio sobre el crecimiento vegetativo en durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo en diferentes altitudes mediante la utilización de modelos matemáticos.

CAPÍTULO I

El crecimiento vegetal, su análisis e importancia biológica



CAPÍTULO I

EL CRECIMIENTO VEGETAL, SU ANÁLISIS E IMPORTANCIA BIOLÓGICA

El crecimiento vegetal

El crecimiento vegetal es un proceso fundamental en los seres vivos y se manifiesta como un aumento en el número, así como en el tamaño de las células en los diferentes órganos de las plantas. Es un fenómeno complejo y regulado por múltiples factores que incluyen la división, la diferenciación y la elongación celular. A través de estos procesos, las células pueden crecer y desarrollarse para cumplir sus funciones específicas en los tejidos y órganos de los organismos (Pérez, 2017; Martínez, 2016).

Por su parte, el desarrollo vegetal es la continuación creciente de fases que conducen a determinar la morfología del organismo hasta llegar a la fase adulta (Turco et al., 2018). Es decir, conlleva a un incremento irreversible en tamaño, el cual esta comúnmente acompañado, aunque no necesariamente por un aumento en la materia seca y una extensión del protoplasma. Lo anterior produce generalmente cambios simultáneos en la forma, la división celular, elongación, diferenciación, fotosíntesis, síntesis, respiración, translocación de nutrientes, absorción y transpiración (Ali, 2014; Pimienta et al., 2006).

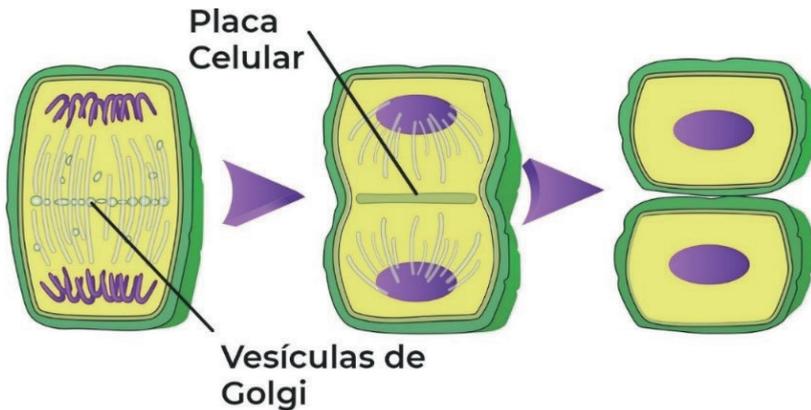
El crecimiento, así como el desarrollo, son eventos relacionados con el progresivo desenvolvimiento de la información genética de una planta. El proceso genético se enmarca en el ámbito del ciclo celular y se relaciona con la duplicación del DNA y la división nuclear en las células madre. Pese a la gran cantidad de formas celulares en el ámbito natural de las plantas y de sus órganos, la variación cinética del crecimiento en el ámbito anatómico obedece, como mencionado

con anterioridad a los siguientes tres aspectos (Pérez, 2017; Martínez, 2016).

a) División celular en plantas

Proceso fisiológico que permite el fraccionamiento de una célula para originar dos células hijas, no siempre iguales. La citocinesis empieza con el desarrollo de la placa celular a través de la fusión de centenas de vesículas, las cuales se despegan del aparato de Golgi (Figura 1.1). Posteriormente, las vesículas se unen y forman la lámina media que luego se transforma en las membranas celulares de las células hijas. Sin embargo, es importante resaltar que el crecimiento de las células vegetales demanda una interdependencia de procesos de crecimiento citoplasmático, extensión de la pared celular y división, pero el conocimiento que vinculan estos mecanismos es pobremente comprendido (Sablowski, 2016).

Figura 1.1
División celular



Fuente: El ciclo celular de OpenStax College, Biología (CC BY 3.0), 2023.

b) Crecimiento celular en plantas

El crecimiento en las plantas se refiere al incremento en tamaño, número y complejidad de las células, tejidos, así como los órganos de una planta a través de su ciclo de vida. Se produce mediante la división celular, la elongación y la diferenciación celular, siendo influenciado por factores internos como la genética de la planta y factores externos, como la accesibilidad de agua, nutrientes y luz (Sablowski & Carnier, 2013).

La diversidad de maneras como se divide y especializa las células explica la aparición durante el crecimiento y desarrollo de diversos tejidos y órganos en las distintas especies de plantas. Como se observa en la Figura 1.2, el ciclo celular presenta dos etapas principales: la fase de interfase y la fase mitótica. Durante la interfase que se subdivide en tres fases denominadas G1, S y G2, la célula crece y se prepara para la división celular:

- **Fase G1 (Gap 1):** la célula crece y se prepara para la replicación del ADN.
- **Fase S (Síntesis):** en esta fase la célula replica su material genético, es decir, su ADN. Esto ocurre en el núcleo de la célula donde se forma una copia idéntica del ADN original.
- **Fase G2 (Gap 2):** en esta fase la célula continúa creciendo para posteriormente realizar la división celular (mitosis). Se producen proteínas y orgánulos adicionales para ayudar en la división celular.

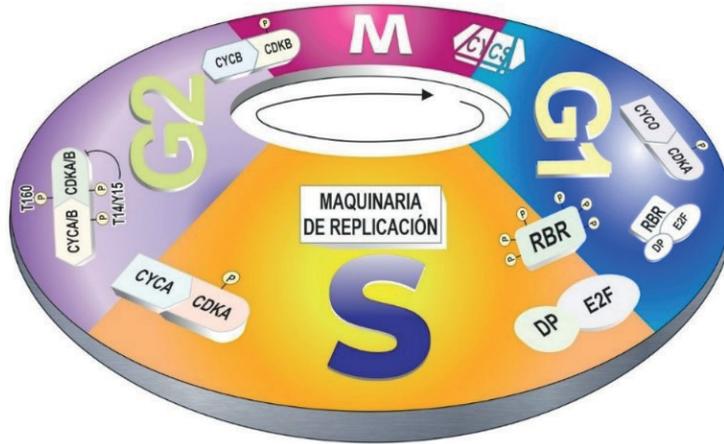
Es de resaltar que, en cada una de estas sub-fases, diferentes complejos de proteínas como los complejos CYCD/CDKA, CYCA/B y CYCB/CDKB, participan en la regulación del ciclo celular. Estos complejos junto con otros factores reguladores como RBR y E2F/DP, aseguran que la célula avance de una fase a otra en el momento adecuado (Garza et al., 2014; Sablowski & Carnier, 2013).

Después de la interfase se inicia la fase mitótica, donde se lleva a cabo la división celular en dos células hijas idénticas, es decir, la célula divide su ADN en grupos (dos) y fracciona su citoplasma para

formar dos células hijas (Sablowski & Carnier, 2013).

Figura 1.2

Esquema del ciclo celular en plantas



Fuente: Adaptado de Garza et al., 2014.

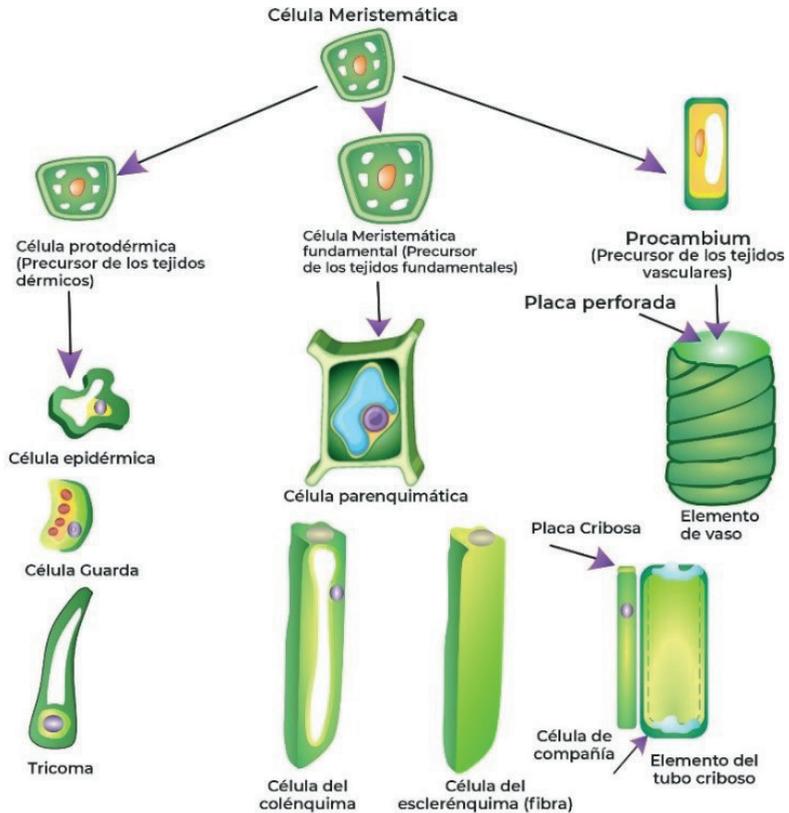
c) Diferenciación celular en plantas

La diferenciación celular en las plantas es un proceso mediante el cual las células indiferenciadas se especializan y adquieren características estructurales. Es un proceso complejo que se inicia con las células meristemáticas indiferenciadas que se encuentran en los meristemos apicales, los cuales son los tejidos especializados ubicados en la punta de las raíces y los meristemos de las plantas (Sablowski, 2016; Sablowski & Carnier, 2013).

A medida que las células meristemáticas se dividen, algunas se diferencian en células especializadas como células de la epidermis, células del tejido vascular, células del parénquima y células del floema y xilema (Figura 1.3). La diferenciación celular en las plantas es un proceso controlado por la regulación de la expresión génica, donde ciertos genes se activan o desactivan para determinar la identidad de la célula. Además, la comunicación intercelular también juega

un papel importante en la diferenciación celular en las plantas, ya que las células especializadas interactúan entre sí para formar tejidos y órganos completos.

Figura 1.3
Diferenciación celular en las plantas



Fuente: Adaptado de <http://www.efn.uncor.edu/dep/biologia/intrbiol/planta1.htm#Tejidosveg>, 2023.

Consecuentemente, los meristemos son tejidos embrionarios que se manifiestan en la planta a lo largo de todo su ciclo de vida y son garantes del crecimiento constante de la planta, debido a la capacidad de división y diferenciación. Los tejidos meristemáticos originan otros tejidos fundamentales en el óptimo desarrollo de la planta. Los tejidos meristemáticos primarios determinan el crecimiento en longitud y los secundarios favorecen el crecimiento en espesor de las dicotiledóneas leñosas y gimnospermas (Chuncho, Chuncho & Aguirre, 2019).

Los tejidos constituidos por células con capacidad de división celular son llamados tejidos meristemáticos, por el contrario, los que no poseen capacidad de división celular son denominados tejidos permanentes. Dentro de los tejidos meristemáticos se destacan el meristema apical, cambium vascular y felógeno; por su parte el tejido de soporte, conducción y almacenamiento del tallo son los denominados de tejidos permanentes. Se clasifican los tejidos meristemáticos en diferentes tipos y éstos a su vez se clasifican según varios criterios (Filho, 2016):

De acuerdo con su posición:

- Meristema apical: el ápice de un órgano.
- Meristema lateral: en la periferia de un órgano.
- Meristema intercalar: entre los tejidos que él mismo produce.

De acuerdo con su origen:

- Meristema primario: se origina de células que no han perdido su potencial de división.
- Meristema secundario: procede de células diferenciadas que logran su capacidad de división nuevamente.

En la fase de germinación de la semilla se genera el cuerpo primario de la raíz, que proviene del meristemo apical, situado en la parte inferior de la radícula del embrión. Las células del meristemo radical se fraccionan y presentan pequeños cambios generando tres tejidos meristemáticos primarios: la protodermis, el meristema fundamental y el procambium, el cual genera los tejidos definitivos de la raíz. Mediante la división de las células, el cuerpo primario experimenta un

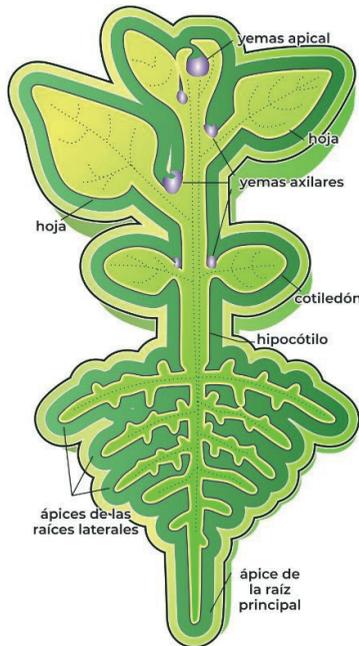
crecimiento en longitud, también denominado crecimiento primario (Filho, 2016).

Patrones de crecimiento

El crecimiento en las plantas ocurre en los meristemas, los cuales se encuentran generalmente en los extremos de las raíces, tallos, en la parte central de la hoja, así como en el cambium vascular. Por su parte, las yemas vegetativas tienen los meristemas axilares arriba de los nudos en las monocotiledóneas o en la base de las hojas en las dicotiledóneas (Figura 1.4). Asimismo, los meristemas apicales (primarios) se forman durante el desarrollo embrionario, mientras que los meristemas derivados (secundarios) del cambium vascular se producen después de la germinación (Hudson et al., 2014).

Figura 1.4

Disposición de los diferentes meristemas en las plantas



Fuente: Adaptado de Hartmann et al., 2011.

Ahora bien, el crecimiento puede ser indeterminado cuando ocurre en las estructuras que se renuevan constantemente por meristemas vegetativos, por ejemplo, los de las raíces, tallos y hojas. Cuando un meristemo indeterminado se transforma en reproductivo (cuando forma una flor) sufre similar diferenciación que un determinado. En efecto, las plantas con crecimiento determinado o indeterminado suelen llamarse monocarpicas o policarvas, según sea su comportamiento. Las policarvas son generalmente anuales, mientras que las bianuales se presentan como plantas monocarpicas que viven dos o más años antes de florecer un a sol a vez, para morir, aunque son monocarpicas se pueden considerar como perennes (Hudson et al., 2014).

Las plantas perennes en general, no convierten todos sus meristemas vegetativos en reproductivos. Por ejemplo, las plantas leñosas, emplean parte de sus meristemas axilares para formar órganos reproductivos, pero mantienen las yemas terminales para la formación de las partes vegetativas. La expansión de la lámina no es uniforme durante el desarrollo de la hoja y algunas zonas se desarrollan más que otras. Hay un gradiente de maduración a lo largo de la hoja, desde el extremo a la base, de tal manera que las regiones basales; partes centrales de la hoja y cerca del nervio principal crecen más rápidamente. A menudo, el aumento de espesor de la lámina continúa después de cesar la expansión del área. Normalmente es debido a la proliferación de las células del mesófilo en empalizada y tiende a ser pronunciada en condiciones de elevada intensidad luminosa (Hudson et al., 2014; Romero-Arias et al., 2010).

En este sentido, es adecuado señalar que el crecimiento y el desarrollo de las plantas se identifica por la suma de unidades repetidas llamadas fitómeros que pueden ser un nodo, entrenudo, hoja y brote axilar. Los fitómeros dependen de los cambios de temperatura específico, como lo describen en sus trabajos (Davidson et al., 2015).

El análisis de crecimiento

El análisis de crecimiento comprende los métodos empleados para medir los aspectos del crecimiento de un cultivo. Asimismo, este término generalmente comprende el estudio matemático, de incremento en tamaño o peso del material acumulado por la planta o sus órganos y las dimensiones de los tejidos asimilatorios como por ejemplo el área foliar. Los valores se toman en periodos regulares a través del tiempo del crecimiento del cultivo (Di Benedetto & Tognetti, 2016).

Ahora bien, el crecimiento de un cultivo sigue la ley de interés compuesto. Los índices o parámetros de crecimiento como la Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC), la Tasa Relativa de Crecimiento (TRC) así como la Tasa de Asimilación Neta (TAN) aumentan con la temperatura y el flujo de luz fotosintéticamente activa en un intervalo específico para un cultivo en particular. Las funciones de crecimiento calculadas de manera tradicional incluyen el efecto de variables de ambientes controlados y no controlados. En las partes bajas de los trópicos y subtrópicos los niveles de las tasas de asimilación neta y las de crecimiento relativo pueden exceder a los valores obtenidos en regiones de temperatura fría. Estas diferencias son amplias y han sido encontradas en varios trabajos, atribuibles a la alta radiación y temperatura (Di Benedetto & Rattin, 2008).

Aunque el crecimiento en los cultivos presenta comportamientos análogos en la producción de área foliar, acumulación de materia seca y Tasa de Asimilación Neta, también se observan diferencias en la velocidad de producción de estos parámetros; estos son afectados en forma directa por la arquitectura de la planta, los estados de desarrollo, estado fitosanitario y por las variables climatológicas predominantes durante el crecimiento. El rendimiento y el crecimiento de los cultivos con relación al ambiente han sido analizados usando conceptos del análisis de crecimiento, a pesar de que muchos de los resultados experimentales obtenidos, no han sido claros y en algunos casos han sido decepcionantes (Segura, 2013; Di Benedetto & Tognetti, 2016).

El propósito de cuantificar los índices de crecimiento es describir cómo las especies responden a situaciones en un entorno específico. En experimentos destinados a hacer comparaciones de respuesta

fisiológica, el uso de índices es un mecanismo adecuado para cuantificar el éxito de una especie en un hábitat determinado (Grime, 1989). Idealmente, estos índices deberían ser independientes de las variables ambientales, sin embargo, en la práctica, resulta difícil lograr este objetivo en trabajos de campo. Las comparaciones de los índices de crecimiento dentro y entre experimentos serían menos ambiguas si las fuentes de variación climáticas diferentes a los tratamientos impuestos pudieran ser eliminados. En este sentido, para lograr un análisis de crecimiento es necesario efectúa, dos tipos de mediciones básicas (Di Benedetto & Tognetti, 2016).

- El peso de la biomasa de los órganos o del total de la planta y la cuantificación de la materia orgánica de la planta.
- La dimensión del sistema asimilatorio (Área foliar) o el contenido de proteína, o de clorofila de las hojas de la planta o plantas en un cultivo.

Los datos iniciales se colectan de plantas individuales o de doseles enteros por área de cubrimiento. Igualmente, se puede medir el peso fresco, la materia seca, el volumen, longitud, ramificación, entre otros (Corchuelo, 1986). Por ello, el empleo de medidas indirectas para calcular el crecimiento se fundamenta en el cálculo y utilización de fórmulas y son: la relación de Área Foliar (RAF), Área Foliar Específica (AFE), Razón de Peso Foliar (RPF), Índice de Área Foliar (IAF), Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC) y Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) (Pommerening & Muszta, 2016; Barrera, Suarez & Melgarejo, 2010).

Es así como la TAN mide la capacidad de una planta para incrementar la materia seca a través de su área de superficie asimilatoria, representado de esta forma su eficiencia fotosintética. Por su parte, los RAF y TRC son utilizados en la evaluación sensitiva del crecimiento de las plantas a diferentes condiciones ambientales (Barrera, Suarez & Melgarejo, 2010).

En cuanto al Índice de Área Foliar este varía no solamente periódicamente sino diariamente. En efecto, en los cultivos es indispensable promover su expansión con métodos culturales tales como la

fertilización planificada y un aumento en la temperatura de irrigación del agua, así como mejorar la eficiencia fotosintética ajustando correctamente las distancias entre surcos, las plantas y seleccionando la época de siembra más apropiada. Ahora bien, un Índice de Área Foliar crítico es usual en algunas especies herbáceas como los pastos, cuando se dan condiciones de alta respiración de los tejidos vegetales bajo sombra y se cosecha toda la materia seca. Sin embargo, la ocurrencia y uso de un Índice de Área Foliar óptimo en cambio

de un Índice de Área Foliar crítico obviamente podría resultar en una baja de la productividad (Pommerening & Muszta, 2016).

A su vez, el estudio del crecimiento ha sido utilizado de dos formas distintas denominadas clásica y funcional. El estudio clásico del crecimiento contempla medidas hechas a intervalos comparativamente largos de tiempo y empleando un gran número de plantas, tiene en cuenta que la dirección durante los eventos fisiológicos sigue relativamente una serie infrecuente de largas cosechas (con muchas repeticiones de las medidas básicas como es el área foliar y la materia seca). Esta aproximación es con respecto al crecimiento de la planta, aproxima los procedimientos al cálculo y cambio de las tasas medias del crecimiento vegetal (Barrera, Suarez & Melgarejo, 2010; Hunt, 1982).

El estudio clásico se asocia al rendimiento y el estudio funcional incluye medidas y momentos de tiempo más comunes utilizando un número reducido de plantas. La diferencia entre los dos se basa en el uso que del método de regresión hace el análisis funcional e incluye al menos los siguientes índices (Aguilar et al., 2018; Di Benedetto & Tognetti, 2016).

- Índice de Área Foliar (IAF).
- Duración del Área Foliar (DAF).
- Tasa Relativa de Crecimiento del cultivo (TRC).
- Tasa de Asimilación Neta (TAN).

Además, se utilizan 3 tipos distintos de enfoques para realizar el análisis de crecimiento clásico que no están integrados en un solo concepto. El primero indica que la Tasa Relativa de Crecimiento (TRC) es producto de la Tasa de Asimilación Neta (TAN) por la Relación de Área Foliar (RAF) como expresado en la siguiente ecuación:

$$TRC=TAN \times RAF$$

La segunda forma de realizar el análisis clásico de crecimiento fue formulada por Watson (1952) y comprende el uso del concepto del Índice de Área Foliar y se dirige a establecer la Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) el cual es el producto del Índice de Área Foliar (IAF) y la Tasa de Asimilación Neta (TAN), mostrada en la siguiente ecuación de identidad:

$$TCC=IAF \times TAN$$

El tercer concepto es el llamado análisis integrado de crecimiento propuesto por (Wilson, 1981ab) el cual integra los anteriores dos enfoques realizados sobre el crecimiento de las plantas y la TRC es un componente del TCC e integra en el cálculo del crecimiento otro componente que no se tenía en cuenta dentro del TCC; la materia seca total representada en la biomasa producida por un cultivo por unidad de área, dando su inclusión como resultado la siguiente ecuación de identidad:

$$TCC=Biomasa \times TRC$$

Más allá del simple cálculo del crecimiento hay una variedad de aproximaciones, comúnmente llamadas “análisis de crecimiento” que pueden ser utilizadas por medio de modelos matemáticos para cuantificar el crecimiento de las plantas o vegetación recurriendo a integrales múltiples. Estas aproximaciones que usan matemáticas consisten en el estudio directo de la cinética de crecimiento, indiferente de las interacciones entre los diferentes procesos de absorción. Esta clase de análisis debe conducirse paralelamente con trabajos de campo a partir de un modelo teórico y los resultados interpretarlos con relación a parámetros del ambiente (Di Benedetto & Tognetti, 2016; Pommerehning & Muszta, 2016).

Referencias

- Aguilar, C.C., Juárez, L.P., Campos, A.I.H., Alía, T.I., Sandoval, V.M. & López, M.V. (2018). Análisis de crecimiento y rendimiento de uchuva (*Physalis peruviana* L.) cultivada en hidroponía e invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 24: 191–202.
- Ali, O., Mirabet, V., Godin, C. & Traas, J. (2014). Physical Models of Plant Development. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 30(1), 59–78.
- Barrera, J. Suarez, D. & Melgarejo, L.M. (2010). *Análisis de crecimiento en plantas En: Experimentos en fisiología de plantas*. Capítulo 2. (pp.25-38). Primera Edición. Universidad Nacional de Colombia. Editor: Luz Marina Melgarejo.
- Chuncho, G., Chuncho, C. & Aguirre, Z. (2019). *Anatomía y morfología vegetal*. Universidad Nacional de Loja. Ecuador. 134 páginas
- Corchuelo, R. G. (1986). *Análisis del crecimiento. Fisiología de cultivos*. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Agronomía. Bogotá, 8 pp.
- Davidson, A., Da Silva, D., Quintana, B., & DeJong, M T. (2015). *The phyllochron of P. persica shoots is relatively constant undercontrolled growth conditions but seasonally increases in the field inways unrelated to patterns of temperature or radiation*. *Scientia Horticulturae*, 184,106–113.
- Di Benedetto, A. & Rattin, J. (2008). Transplant in sweet maize: A Tool for improving productivity. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*, 2 (2), 96-108.
- Di Benedetto, A. & Tognetti, L. (2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *RIA*, 42, (3), 258-282.
- Filho, JM. (2016). *Fisiología de semillas de plantas cultivadas*. 2. Ed. Londrina: PR; ABRATES, 663 pp.

- Garza Aguilar, S., Sánchez, V., Godínez-Palma, S. & Lara Núñez, A. (2014). Avances recientes en el estudio del ciclo celular en plantas. *Revista Educación Bioquímica*, 33(2), 39-47.
- Grime, J.P. (1989). The stress debate: symptom of impending synthesis? en Calow, P. and Berry, R.J. (eds.). *Evolution, ecology, and environmental stress*. Academic Press, London, 3-17.
- Hartmann, H., Kester, D. E., Davies, F. T. & Geneve, R. L. (2011). *Hartmann & Kester's Plant Propagation: Principles and Practices*. (8th ed.). Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall International.
- Hudson, T., Hartmann, Dale E., Davies F., Robert, L. & Geneve. R. (2014). *Biology of Plant Propagation*. In: *Plant Propagation: Principles and Practice*, 17-52p. Pearson Education, Inc. Published by Pearson Prentice Hall.
- Hunt, R. (1982). *Plant Growth Curves*. The functional Approach to Plant Growth Analysis. Edward Arnold Publisher Ltd. London. 248 pp.
- Martínez, D. (2016). *Manual teórico: fisiología vegetal*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Escuela de Biología, 147 pp.
- Pérez, F. (2017). *Fisiología vegetal: Morfogénesis, crecimiento y desarrollo reguladores del crecimiento. Aplicaciones agronómicas de los reguladores del crecimiento. Desarrollo reproductivo. Fisiología de la germinación. Bases fisiocológicas de la bioproducción. Fisiología de la post cosecha. Fisiología del enraizamiento fisiología del injerto*. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa, Perú, 382 pp.
- Pimienta, E., Muñoz, A., Ramírez, B. & Méndez, L. (2006). *Desarrollo vegetal*. Universidad de Guadalajara.

- Pommerening, A., & Muszta, A. (2016). Relative plant growth revisited: Towards a mathematical standardisation of separate approaches. *Ecological Modelling*, 320, 383–392.
- Romero-Arias, J., Barrio, R., Álvarez-Buylla R., Varea, C. & Hernández-Machado, A. (2010). Modelo de diferenciación celular en la floración de *Arabidopsis thaliana*. *Revista Especializada en Ciencias Químico-biológicas*, 13(2), 91-102
- Sablowski R. (2016). Coordination of plant cell growth and division: collective control or mutual agreement? *Current Opinion in Plant Biology*, 34,54–60.
- Sablowski, R., & Carnier Dornelas, M. (2013). Interplay between cell growth and cell cycle in plants. *Journal of Experimental Botany*, 65(10), 2703–2714.
- Segura, J. (2013). Introducción al desarrollo. *Concepto de hormona Vegetal*, Capítulo 18. 349-376. En: Fundamentos de fisiología vegetal 2.^a Edición J. Azcón-Bieto, m. talón. Mcgraw-Hill - Interamericana de España, S. L.
- Turco, G., Carla Romina Vidal, C., Basconsuelo, S. & Malpassi, R. (2018). Biología: crecimiento y desarrollo, ¿son sinónimos en las plantas? Río Cuarto: UniRío Editora.
- Wilson, W. (1981a). Analysis of Growth, Photosynthesis and Light Interception for Single Plants and Stands. *Annals of Botany*, 48, 501 - 512.
- Wilson, W. (1981b). Analysis of Light Interception by Single Plants. *Annals of Botany*, 48,601 - 605.



CAPÍTULO II

Fisiología del proceso de injertación en plantas perennes

CAPÍTULO II

FISIOLOGÍA DEL PROCESO DE INJERTACIÓN EN PLANTAS PERENNES

Injertación en plantas perennes

El injerto es una antigua práctica en la horticultura y la agricultura para propagar de manera asexual a las plantas. Esta técnica se ha aplicado en la propagación de árboles frutales en China desde alrededor del año 1560 A.C., así como en la región del mediterráneo (500 A.C) en la época del Imperio Romano (Mudge et al., 2009). Aunque solo en los últimos 14 años se han dilucidado y entendido los mecanismos bioquímicos y moleculares subyacentes a este proceso (Fariborz et al., 2022). Es así como Fuentes et al. (2014) y Stegemann y Bock (2009), entre otros, describieron que las células tanto del patrón como del injerto propiamente dicho intercambian material genético.

La técnica permite la unión física de dos plantas diferentes para formar un organismo único, combinando así características deseables en una sola planta. La parte inferior de la planta llamada portainjerto proporciona la raíz y el sistema de soporte mientras que la parte superior, conocida como injerto, proporciona el tallo, las hojas y las flores. Al unir estas dos partes, se forma una sola planta que puede tener una mayor resistencia a las enfermedades y tolerancia a las condiciones climáticas extremas, así como generar un incremento en la producción del cultivo (Mudge et al., 2009).

En términos fisiológicos es la unión de dos tejidos que intercambian tanto agua como nutrientes del patrón a la variedad. En la primera etapa de la formación del injerto se desarrolla un tejido calloso (tejido indiferenciado) debido a la intervención de procesos hormonales de la planta (Rasool et al., 2020). El mecanismo de injertación se refiere a

una reproducción asexual y se considera que tiene varias ventajas agronómicas en los cultivos de frutales, entre los cuales se destaca el durazno (Boffelli & Sirtori, 1995; Rasool et al., 2020). Entre ellas se refiere a que logra eludir la senescencia o envejecimiento, lo que permite prolongar la vida productiva de la planta, así como modificar la arquitectura del vástago; mejorando de esta forma la eficiencia del cultivo y la productividad. De igual forma, confiere resistencia a plagas de insectos, enfermedades bacterianas y fúngicas (Moreno & Webster 2004; Belmonte-Urena, Garrido-Cardenas & Camacho-Ferre, 2020).

De hecho, en la técnica de injertación están involucrados muchos procesos fisiológicos y bioquímicos que experimentan cambios, que afectan características agronómicas. El mecanismo que desencadena estos efectos probablemente implique diferencias a nivel hormonal, expresión génica, el recambio proteínico, la producción de los metabolitos secundarios, el silenciamiento del ARN, las relaciones hídricas y la absorción y el transporte de iones en los árboles injertados (Melnyk, 2017; Nawaz et al., 2016; Harada, 2010).

Sin embargo, diversos factores pueden afectar la unión del injerto tales como la incompatibilidad por virus, fitoplasmas, diferencias metabólicas, la polaridad de los tejidos, la estructura física de la unión, las condiciones ambientales, los reguladores de crecimiento y la contaminación fúngica (Hartmann et al., 2011). En este sentido, el proceso de injertación será un éxito siempre y cuando se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- El patrón y el injerto deben estar relacionados o compatibles biológicamente.
- El cambium del injerto debe quedar en contacto íntimo con el cambium del patrón.
- La operación de injerto se debe desarrollara épocas de poca humedad.
- Las yemas de la púa deberán estar en latencia en el momento en que se hace el injerto.
- Posterior al procedimiento de injertación, cubrir las superficies cortadas del injerto con cera para evitar deshidratación.
- Seguimiento continuo de los injertos después de su ejecución.

Es así, como la unión entre el patrón y la púa es crucial para el éxito del injerto. Los mecanismos moleculares, bioquímicos y fisiológicos que ocurren durante la unión del injerto incluyen la cicatrización del tejido después de una herida y son necesarios para establecer una conexión fuerte entre ambos tejidos (Hartmann et al., 2011).

Proceso inicial a nivel anatómico e histológico

La injertación consiste en unir dos plantas diferentes en un punto de corte, creando una unión fuerte que permite el crecimiento y producción de hojas, ramas y órganos reproductivos. La cicatrización de la herida en el tejido de la planta sigue el proceso normal, formando tejido cicatricial entre el tallo injertado y el tallo receptor. Este tejido parenquimatoso blando que se genera ágilmente por encima y por debajo de las superficies dañadas y del cual proviene el cambium, que formará un nuevo xilema (Rasool et al., 2020; Esau, 1986).

Por ello, se han identificado cinco etapas histológicas durante el desarrollo de la unión del injerto en combinaciones de vástagos de portainjertos (Hartmann et al., 2011):

- (1) Formación y orientación de capas necróticas.
- (2) Proliferación de células de callo, formación de vasos de xilema.
- (3) Formación de puente de callo en la interfaz del injerto.
- (4) Formación de cambium vascular.
- (5) Reconstrucción de tejido vascular entre el patrón y el vástago.

El proceso de cicatrización del injerto sigue el mismo patrón que el presentado en la reparación de una herida del tejido vegetal. La respuesta de la planta a las heridas es formar una masa de tejido parenquimatoso blando en fila sobre y debajo de la superficie dañada. Este tejido forma una capa protectora y contiene células de cambium, las cuales se encargan de producir nuevo xilema, permitiendo así la curación de la herida y el crecimiento de la planta (Rasool et al., 2020; Esau, 1986).

En el caso de injertos en patrones más antiguos como en la modificación de copa, se genera súber en torno a los tejidos necróticos. Las células de súber tienen forma de un prisma y están prolongadas a lo largo del eje longitudinal del patrón. El proceso inicia la intervención de hormonas, vitaminas, carbohidratos y ácidos nucleicos. Estos componentes actúan como coenzimas, grupos prostéticos y son esenciales para el crecimiento y la cicatrización de la herida. Los injertos se realizan entre tallos y también entre tallos y raíces, pero la independencia del tejido trasplantado está limitada por la polaridad. Si el injerto se hace invertido, solo se formará un callo sin posibilidad de crecimiento adicional (Hartmann et al., 2011). Uno de los tipos más comunes de injertos en caducifolios como el durazno es el de púa (Figura 2.1).

Figura 2.1
Injerto de púa



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Incompatibilidad

Una incompatibilidad en un injerto ocurre cuando la combinación de las dos plantas no funciona adecuadamente. Esto puede manifestarse de diferentes maneras, como un abultamiento en el lugar del injerto, un crecimiento desigual, una disminución en la vigorosidad de la planta o incluso la muerte de la planta. Cualquiera de estos signos indica que las dos plantas no son compatibles y que el injerto no ha tenido éxito. La incompatibilidad entre el portainjerto y la púa puede tener muchas causas, incluyendo la falta de similitud genética, diferencias fisiológicas y bioquímicas, lignificación en la unión del injerto, mala arquitectura del injerto, falta de reconocimiento celular entre los tejidos unidos y diferencias metabólicas entre la púa y el patrón (Fariborz et al., 2022).

Translocada o no localizada

Los casos de incompatibilidad traslocada que la presentan algunas combinaciones de cítricos, vid, manzano y cerezo (Moreno et al., 1993), tienen en común las siguientes características y síntomas (Hartmann et al., 2011):

- El empleo de un intermediario compatible con la variedad y el patrón no evita la incompatibilidad.
- Bloqueo del almidón, es decir, depósito de almidón arriba de la unión y ausencia total casi total debajo de la unión.
- Degeneración del floema.
- Comportamiento diferente en la combinación recíproca.
- Continuidad vascular normal en la unión.
- Efectos tempranos sobre el crecimiento y síntomas externos de enfermedad.

Localizada

En este tipo de incompatibilidad del injerto se presenta por la rotura en el punto de unión debido a la falta de continuidad cambial y vascular, lo que debilita la unión y puede provocar pérdidas económicas a largo plazo (Hartmann et al., 2011). Es más frecuentemente observada en albaricoques y ciruelas (Reig et al., 2018).

Los casos de incompatibilidad localizada tienen en común las siguientes características y síntomas:

- Se obvia con el uso de un intermediario compatible con la variedad y el patrón.
- Rupturas típicas en la continuidad cambial y vascular, aunque también pueden presentarse uniones con estructura normal.
- Comportamiento similar en la combinación recíproca.
- Agotamiento gradual del sistema radicular con desarrollo lento de síntomas externos, proporcionales al grado de discontinuidad vascular en la unión.

Consideraciones fisiológicas para que se realice la acción de las hormonas

Las hormonas vegetales o fitohormonas son compuestos químicos producidos internamente por las plantas y que regulan su crecimiento y desarrollo. Estas hormonas tienen un efecto importante en los procesos celulares y en la morfología de las plantas, y su presencia o ausencia puede influir en el desarrollo de sus órganos. Estos compuestos pueden ser sintetizados químicamente u obtenidos de otros organismos y son, en general, mucho más potentes que los análogos naturales. Gracias a los desarrollos biotecnológicos de las últimas décadas se han generado de manera sintética reguladores de crecimiento que simulan el papel de las fitohormonas de manera natural (Alcántara et al., 2019).

Ahora bien, las hormonas de crecimiento son sustancias químicas producidas por las plantas que controlan y regulan su crecimiento y desarrollo. Estas hormonas, como auxinas, giberelinas, citoquininas, ácido abscísico y ácido jasmónico, juegan un papel importante en procesos de germinación de semillas, elongación de tallos y hojas, formación de raíces, la floración y la madurez de frutos, así como de semillas. La manipulación de estas hormonas a través de la aplicación externa o la manipulación genética puede tener un impacto significativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Igualmente, las hormonas vegetales, desempeñan funciones en la regulación de varios procesos fisiológicos cruciales que tienen lugar en la unión del patrón y la púa de un injerto (Reig et al., 2018).

La diferenciación del callo en cambium y de este en tejido vascular durante el injerto es un buen ejemplo de la regulación hormonal. Las hormonas del crecimiento, como las auxinas, citoquininas, poliaminas y giberelinas, son claves en este proceso, al igual que los inhibidores como el polifenol. La regulación hormonal es crucial para garantizar la correcta unión y crecimiento del injerto (Reig et al., 2018).

Además de los reguladores hormonales, el éxito de un injerto depende de una adecuada disponibilidad de nutrientes como carbohidratos, aminoácidos y vitaminas. La acción de los ácidos nucleicos es igualmente fundamental para iniciar el proceso de injerto. La incompatibilidad genética determinada es un factor limitante en el éxito del injerto y puede resultar en una relación antagónica entre el patrón y la púa. Por lo tanto, es importante considerar todos estos factores para garantizar el éxito del injerto (Reig et al., 2018; Zarrouk et al., 2006).

Transporte de las hormonas

Las zonas de una planta en proceso de crecimiento, diferenciación y morfogénesis sintetizan sus hormonas en los tejidos que soportan el crecimiento y la diferenciación. El transporte acrópeto se realiza por vía xilemática y se da en vegetales sometidos a intensa transpiración natural; la hipertónica provocada por un exceso en la pérdida de agua en los órganos determina la aceleración del flujo acrópeto xilemático que arrastra concentraciones apreciables de las auxinas radiculares (Segura, 2013; Córdoba, 1976).

Este mecanismo de transporte no es afectado por ciertos tratamientos como son la aplicación inicial de inhibidores de la acción por auxinas o inhibidores respiratorios. Sin embargo, el transporte basípeto se ve afectado por todos estos tratamientos. El sometimiento de una planta a un ambiente anaerobio detiene el transporte basípeto de una auxina, así como el tratamiento con inhibidores respiratorios. Esto implicaría que el transporte es, en un alto porcentaje polarizado, mientras que un pequeño porcentaje, acrópeto implicaría no polarización, y además que la polaridad del transporte muestra dependencia metabólica (Segura, 2013; Córdoba, 1976).

Otro hecho del transporte auxínico es la observación de que una cierta cantidad de auxina no es transportada en el interior de la planta, sino que permanece fija en los órganos en los que su síntesis ha sido llevada a cabo. El transporte no es un mecanismo principal para la acción de las hormonas. En efecto, la presencia de hormonas vegetales en los sistemas conductores no siempre implica una acción fisiológica directa, ya que algunas hormonas pueden ejercer su efecto en el lugar donde fueron sintetizadas. Sin embargo, el transporte de hormonas también puede jugar un papel relevante en su acción fisiológica. El transporte polar de las auxinas es un ejemplo de cómo el transporte de hormonas vegetales puede ser esencial para ciertas funciones fisiológicas (Segura, 2013; Córdoba, 1976).

En el caso de las auxinas, el transporte polar se refiere a su movimiento unidireccional desde las hojas y los brotes hacia las raíces, lo que crea un gradiente de concentración de auxinas a lo largo

del eje de la planta. Este gradiente de concentración de auxinas es necesario para la diferenciación del xilema, que es el tejido que transporta agua y nutrientes desde las raíces hasta las hojas. Además, el transporte polar de auxinas también es necesario para la iniciación de las raíces laterales, lo que permite que la planta absorba más nutrientes del suelo. Por lo tanto, aunque el transporte no es un componente básico para el concepto de hormona vegetal, el transporte polar de algunas hormonas vegetales, como las auxinas, puede ser crucial para su acción fisiológica en la planta (Segura, 2013).

Las auxinas se encuentran ligadas a proteínas (Semeradova, Montesinos & Benkova, 2020) en el tejido productor y es liberada por medio de la acción de enzimas proteolíticas, observación confirmada cuando una auxina exógena es suministrada a un tejido vegetal, se da una rápida unión del compuesto con el ácido glutámico en una reacción dependiente de la coenzima A (Donner, Sherr & Scarpella, 2009). En contraste con la auxina, las giberelinas muestran una conducta no polar, están sometidas a un transporte principalmente acrópeto, migra lateralmente de los vasos floemáticos a los xilemáticos (Claeys, Bodt & Inzé, 2014).

En las citoquininas no se presentan polaridad del transporte, al igual que en el caso de las giberelinas, siendo su transporte más xilemático que floemático. Este hecho estaría relacionado con la localización de los centros de síntesis de las citoquininas a nivel radicular, teniendo que ser exportadas las hormonas por vía acrópeta a los centros en crecimiento y diferenciación como es donde se está realizando el proceso de injertación. Por último, las poliaminas no presentan polaridad del transporte una vez que estos compuestos son sintetizados en diferentes órganos y son transportados, vía xilema y/o floema, a otras partes de las plantas (Reigosa, Pedrol & Sánchez, 2004).

Las hormonas son transportadas según la Figura 2.3, vía simplasto; traspasando las paredes y membranas celulares para ponerse en circulación por el floema, xilema, donde son trasladadas a los mismos sitios donde se produjo la herida junto con los azúcares sintetizados (esqueletos carbonados) en las hojas. La hormona activa la mutasa corismica y la deshidratasa prefenica, enzimas que intervienen en la síntesis del ácido shiquímico, precursor de la síntesis de los aminoáci-

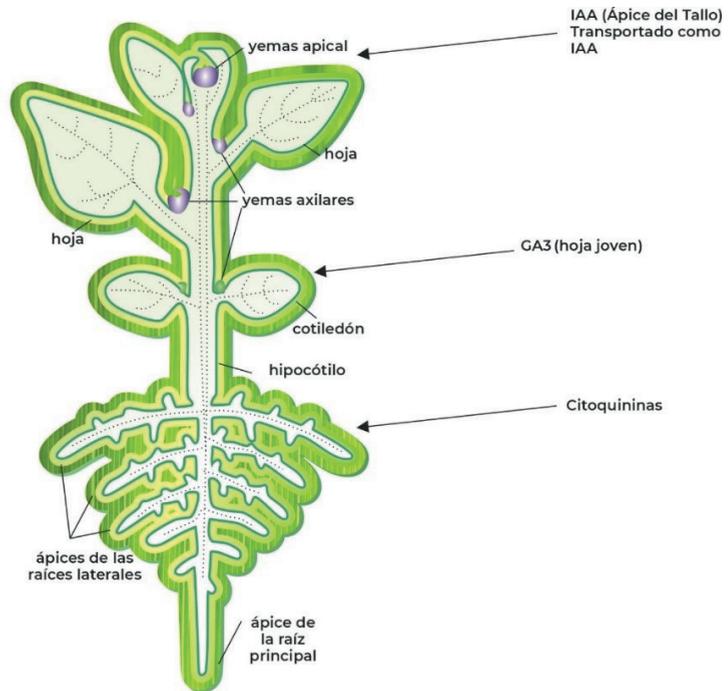
dos aromáticos fenilalanina, tirosina y triptófano que son a su vez, precursores de la síntesis de ácido indol acético (AIA) y de inhibidores presentes durante el proceso de injertación (Melnyk, 2017).

Los aminoácidos aromáticos son básicos para la síntesis de proteínas necesarias en las plantas para el crecimiento y con ello poder que se activen los mecanismos de regeneración, para luego seguir con la síntesis de ácidos nucleicos dentro de las nuevas células formadas a partir del callo, para evitar el amarillamiento progresivo hasta que se produce la necrosis o muerte de esa parte del tallo del patrón, donde se hizo la herida para introducir la variedad escogida por sus bondades agronómicas. La translocación de hormonas en las plantas sigue los mismos canales que los azúcares sintetizados en las hojas. Ambos procesos se benefician de condiciones favorables para la fotosíntesis, como una alta luminosidad, una temperatura moderada y buenas condiciones de crecimiento para la planta. Estos factores también afectan positivamente a la translocación de hormonas y fotosintetizados durante los procesos de injertación (Nanda & Melnyk, 2017).

Es importante destacar que, las hormonas vegetales son compuestos orgánicos que operan en bajas concentraciones (mg/L) y pueden activar, retrasar o inhibir ciertos procesos fisiológicos. Interactúan entre sí a través de diferentes mecanismos moleculares y la raíz es el principal órgano de síntesis. Sin embargo, pueden sintetizarse en cualquier tejido, especialmente en sitios de intensa división celular (Figura 2.2). Las hormonas activan el crecimiento de los meristemos laterales, incitan el crecimiento de los frutos, retrasan la senescencia de las hojas y estimulan la movilización de nutrientes. Las hormonas no se transportan al sitio de acción, pero actúan donde se sintetizan. Las hormonas vegetales juegan un papel crucial en la coordinación del crecimiento y desarrollo de la planta. Algunas hormonas son las encargadas de desencadenar el crecimiento durante la germinación, mientras que otras tienen efectos como aumentar la tolerancia al frío (Zhang et al., 2022).

Figura 2.2

Principales sitios de síntesis de las hormonas vegetales



Fuente: Adaptado de Hartmann et al., 2011.

Características de las hormonas y sustancias que participan en la injertación

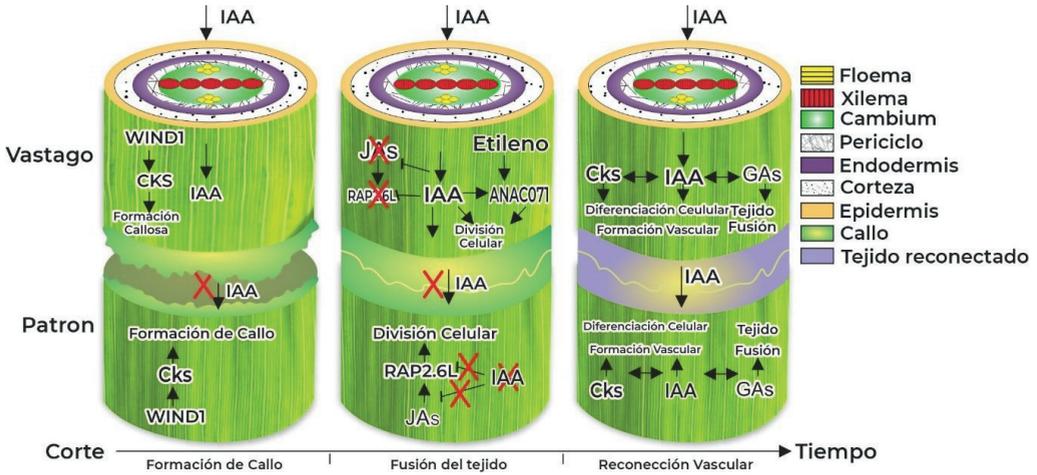
Las hormonas vegetales controlan y regulan diversos procesos del desarrollo de las plantas en respuestas a estímulos bióticos y abióticos. En el proceso de injertación ocho fitohormonas (ácido abscísico, auxinas, brasinoesteroides, citoquininas, etileno, giberelinas, ácido jasmónico y estrigolactonas) juegan un papel importante en la cicatrización de heridas y la formación vascular (Melnyk, 2017).

Es interesante destacar un estudio desarrollado en la planta modelo *Arabidopsis Thaliana*, sobre la conexión entre el floema y la xilema en las plantas durante el proceso de injertación (Melnyk et al., 2015). Este implica la unión de dos plantas mediante la realización de un corte en la base de los hipocótilos y la unión de sus tejidos vasculares. Luego del corte, las citoquininas inducen la formación de callos, mientras que la auxina se acumula por encima de la unión del injerto y se agota en la unión inferior debido a la alteración de su flujo. La acumulación de auxinas y etileno en la parte superior del injerto desencadena la expresión del gen ANAC071, mientras que inhibe la biosíntesis de ácido jasmónico y la expresión del gen RAP2.6L. En la parte inferior del injerto, la disminución de los niveles de auxina libera la supresión de biosíntesis de ácido jasmónico y expresión del gen RAP2.6L. Los genes ANAC071 y RAP2.6L inducen la división celular del tejido vascular tanto arriba como abajo de la unión del injerto, respectivamente (Melnyk, 2017).

Las auxinas en interacción con las giberelinas y las citoquininas promueven la diferenciación celular, lo que conduce a la formación vascular y la reconexión entre ambas uniones y, por lo tanto, a la restauración de la simetría de las auxinas. Las giberelinas en interacción con las auxinas promueven la fusión de tejidos a través de la expansión celular. Más bien, el proceso de injerto en hipocótilos de *Arabidopsis thaliana* implica una compleja interacción entre varias hormonas y factores de transcripción que regulan la formación de callos, la división celular y la diferenciación de tejidos, lo que permite la fusión de los tejidos vasculares y la restauración de la simetría de las auxinas como está indicado en la Figura 2.3.

Figura 2.3

Diagrama esquemático del proceso de injerto en hipocótilos de *Arabidopsis thaliana* en tres etapas: formación de callos, fusión del tejido y reconexión vascular.



CK: citoquininas; AIA: (ácido indol acético, auxina); JA: ácidos jasmónicos; GA: giberelinas.

Fuente: Adaptado de Nanda & Melnyk, 2017.

Las auxinas

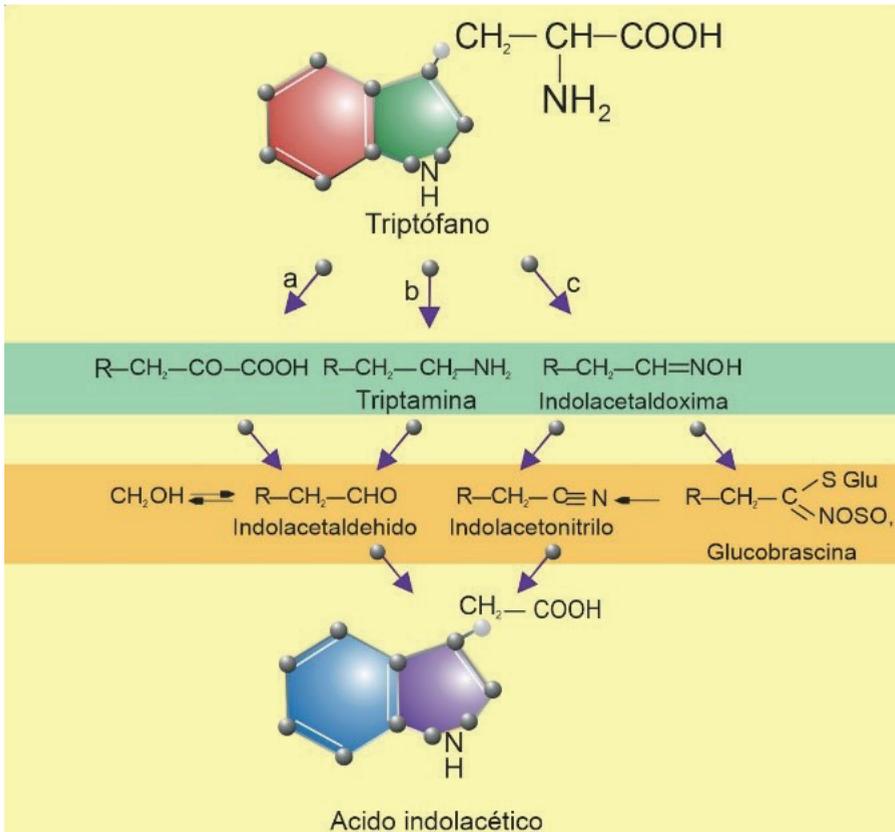
Las auxinas siendo las hormonas vegetales más extensamente investigadas, juegan un papel crucial en casi todos los aspectos del desarrollo de la planta como la inhibición del crecimiento de las yemas laterales en la punta del brote, la iniciación y diferenciación de órganos y la respuesta de las raíces de la planta a la gravedad, (gravitropismo) (Semeradova, Montesinos & Benkova, 2020; Enders & Strader, 2015). Adicionalmente, el papel de las auxinas es fundamental en el desarrollo del sistema vascular de la planta. Si se administra de forma exógena a tejidos no diferenciados, facilita la creación de los conductos vasculares (Sachs, 1981).

El ácido indol acético inicia la síntesis de fracciones del RNA mensajero durante la injertación; el principal efecto de la auxina es estimular o

suprimir el crecimiento celular dependiendo de su concentración (Semeradova, Montesinos & Benkova, 2020; Garcidueñas & Rodriguez, 1987). La auxina, junto con otras hormonas, influye en la diferenciación celular al convertir las células del cambium en meristemas. Además, activan las enzimas de la respiración en el ciclo de Krebs y junto con otras hormonas estimulan el transporte de nutrientes a través del floema (Figura 2.4).

Figura 2.4

Biosíntesis del ácido indolacético a partir del triptófano.



(a) ruta del ácido indolpirúvico; (b) ruta del ácido indolpirúvico; (c) ruta de la indolacetaldoxina.

Fuente: Adaptado de Hartmann et al., 2011.

El proceso de injertación estimula la activación de genes implicados tanto en la síntesis como en la señalización de auxinas. En este sentido, se ha observado cómo en injertos *in vitro* de *Arabidopsis thaliana* generalmente requiere la adición de una aplicación externa de auxina (Melnik et al., 2015). Debido a su papel fundamental en la formación vascular y la cicatrización de heridas, no sorprende que las auxinas desempeñen un papel importante en la formación de injertos. La expresión de genes involucrados en la biosíntesis y señalización de auxina se induce durante el proceso de injertación (Matsuoka et al., 2016; Melnik et al., 2015).

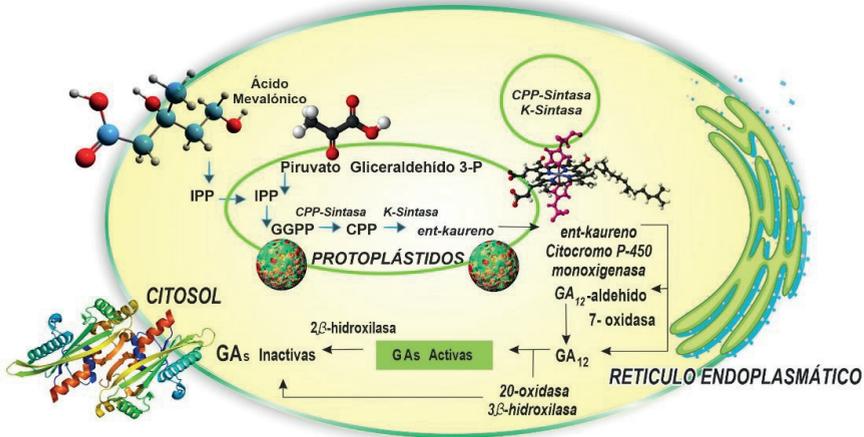
Las giberelinas

Las giberelinas (GAs) son un tipo de fitohormona diterpénica que desempeña un papel fundamental en el desarrollo de las plantas. Su función principal es regular el crecimiento de las plantas, ya que promueven la expansión, diferenciación, proliferación celular y formación del xiloma (Claeys, Bodt & Inzé, 2014).

Ahora bien, en relación con la biosíntesis de las GAs, se presenta a partir del ácido melavalónico (Figura 2.5). El transporte de la hormona es por el floema, actúan sobre el RNA ayudando a la expresión de genes. A diferencia de la acción de las auxinas la acción estimulante del crecimiento se manifiesta en un espectro extenso de concentraciones. Estas hormonas activan el flujo floemático de los nutrientes en la planta por intermedio de la inducción de la síntesis enzimática. La síntesis de ent-kaureno y su conversión a formas activas de giberelinas, implica la acción de enzimas solubles que se localizan en diferentes compartimentos celulares de las plantas como los plastos, el retículo plasmático y el citosol. Estas enzimas actúan en una secuencia de reacciones que permiten la síntesis de hormonas vegetales importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Salar-Cerezo et al. 2018; Lange, 1997).

Figura 2.5

Esquema general de la biosíntesis de las giberelinas (GAs) y su compartimentalización subcelular en plantas superiores.



Fuente: Adaptado de Lange, 1997.

La síntesis de ent-kaureno y su conversión a formas activas de giberelinas, implica la acción de enzimas solubles que se localizan en diferentes compartimentos celulares de las plantas como los plastos, el retículo plasmático y el citosol. Estas enzimas actúan en una secuencia de reacciones que permiten la síntesis de hormonas vegetales importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Salar-Cerezo et al., 2018.; Lange, 1997).

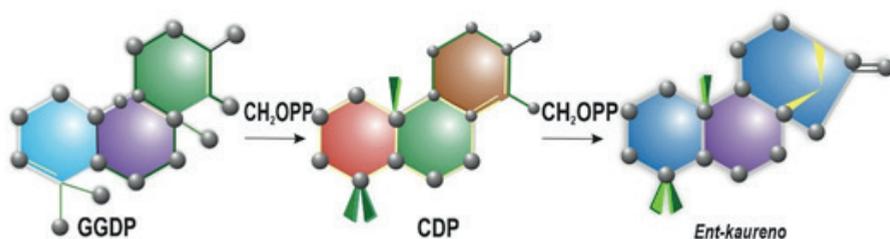
La biosíntesis de las GAs (giberelinas) se puede dividir en tres etapas. La primera etapa comienza con la conversión de geranylgeranyl difosfato a ent-kaureno. Este proceso es catalizado por la enzima ent-copalil difosfato sintasa (CPS) y ent-copalil difosfato sintasa/kaureno sintasa (KS), que forman una serie de compuestos intermedios hasta llegar a ent-kaureno (Figura 2.6).

En la segunda etapa, ent-kaureno se convierte en GA₁₂-aldehído a través de una serie de reacciones catalizadas por varias enzimas,

como ent-kaureno oxidasa (KO), ent-kaureno hidroxilasa (KAO), y GA12-aldehído deshidrogenasa (GA12-ALDH).

En la tercera y última etapa, GA12-aldehído se convierte en diferentes tipos de giberelinas, dependiendo de la ruta metabólica. La conversión de GA12-aldehído a GA12 se realiza mediante GA12-aldehído oxidasa (GA12ox), que es la enzima clave en la biosíntesis de las GAs bioactivas. Luego, GA12 puede ser convertido a diferentes tipos de giberelinas por medio de reacciones catalizadas por diferentes enzimas (Schaller, Bishopp & Kieber, 2015).

Figura 2.6.
Etapa 1 de la ruta de síntesis de GAs.



El geranylgeranyl difosfato (GGDP) presenta ciclación a ent-kaureno mediado por el copalil difosfato (CDP)

Fuente: Adaptado de Salazar-Cerezo et al., 2018

Los estudios con plantas mutantes deficientes en GAs han sido muy útiles para entender las diferentes etapas de la biosíntesis de estas. Además, las investigaciones paralelas han permitido identificar las enzimas involucradas en cada una de las etapas de la biosíntesis de las GAs, lo que ha ayudado a entender mejor la regulación de la síntesis de las giberelinas y su papel en diferentes procesos fisiológicos de las plantas.

La participación de las GAs en el proceso de injertación y concretamente en el mecanismo de cicatrización de heridas es cada vez más evidente. Las GAs derivadas de los cotiledones, por ejemplo, estimulan la división celular y la diferenciación en el cambium de los hipocótilos de pepino y tomate. En los hipocótilos de *Arabidopsis* que se injertaron, la inhibición de la biosíntesis o señalización de GA impidió la expansión de las células de la corteza responsables de sellar la unión del injerto. Sin embargo, no afectó la proliferación celular en el tejido vascular (Matsuoka et al., 2016; Asahina et al., 2011). Según el conocimiento actual, es claro que las GAs son cruciales para promover la expansión celular necesaria para sellar la herida en el proceso de injertación. Por el contrario, las auxinas juegan un papel vital en la proliferación y reconexión del tejido vascular a través de la unión del injerto (Melnik et al., 2015; Matsuoka et al., 2016).

Las citoquininas (CK)

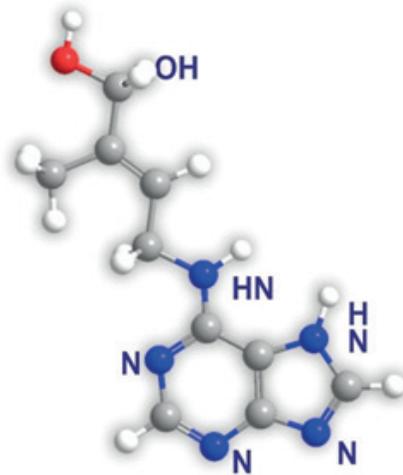
Las citoquininas son hormonas vegetales derivadas de la adenina y están implicadas en diversos procesos del desarrollo de las plantas, como la división celular, la formación de raíces laterales y el mantenimiento del meristemo. Sus efectos suelen manifestarse mediante la interacción con la vía de señalización de las auxinas (Schaller, Bishopp & Kieber, 2015).

Se sintetizan en la raíz, tienen adenina en su molécula y provienen parcialmente de productos de hidrólisis de fracciones de ácidos nucleicos. Son las hormonas de la división celular que la activan directamente. Los fenómenos estimulados por las citocininas son característicos de las plantas y tejidos jóvenes, por lo que es un “factor de juvenilidad” cuya deficiencia induce síntomas de senescencia (Marinho-Almeida & Lança-Rodríguez, 2016).

Es importante destacar una de las primeras citocininas aisladas de amplio uso conocida como zeatina (6-(4-hidroxi-3-metil-but-trans-2-enilamino), la cual fue obtenida de semillas inmaduras de maíz (Segura, 2013). (Figura 2.7).

Figura 2.7

Zeatina (6-(4-hidroxi-3-metilbut-trans-2-enilamino)



Fuente: Adaptado de Salazar-Cerezo et al., 2018.

Los resultados de varios investigadores entre los que se destacan Mähönen et al. (2000) y Yokoyama et al. (2006) indican que estos reguladores del crecimiento interactúan de manera antagonista con las auxinas y ejercen una regulación negativa sobre la xilogénesis. Adicionalmente, (Ikeuchi et al., 2017) resaltan la relevancia de la vía de señalización de las citoquininas en la formación del callo en respuesta a una lesión. Sin embargo, las citoquininas parecen no ser tan relevantes en el proceso de injertación, ya que se ha logrado la unión de plantas de *Arabidopsis* y álamo con éxito, aun cuando presentan mutaciones en la biosíntesis y señalización de citoquininas (Nieminen et al., 2008; Melnyk et al., 2015). De esta manera, y como sugieren Nanda y Melnyk (2017) las citoquininas favorecen la reconexión vascular durante el proceso de injerto.

Etileno

El etileno es una hormona gaseosa que regula una amplia variedad de procesos tales como la iniciación de raíces, la maduración de frutas, la senescencia y la respuesta a eventos de estrés biótico y abiótico (Wang, Li & Ecker, 2002). El modo de acción del etileno se produce, en parte, a través de una familia de factores de transcripción APETALA2/ETHYLENE RESPONSIVE FACTOR (AP2/ERF). Estos se encuentran en todas las especies de plantas y se activan en respuesta a múltiples situaciones de estrés o procesos de desarrollo (Gu et al., 2017). Los análisis transcriptómicos de hipocótilos injertados de *Arabidopsis* revelan que los genes de biosíntesis de etileno se activan en la unión del injerto. Nanda y Melnyk (2017) resaltan que la importancia de la señalización del etileno en la reunión de tejidos heridos puede diferir de su papel en la unión de injertos y que estas diferencias pueden depender del tipo de tejido, la edad o las diferencias mecánicas del proceso e injertación.

Brasinoesteroides

Los brasinoesteroides (BRs) son hormonas esteroides implicadas en el crecimiento celular y la morfogénesis vegetal. Además, promueven la formación del xilema. (Belkhadir & Jaillais, 2015). Según Nanda y Melnk (2017), no se ha investigado de manera precisa, el papel de los BRs durante el proceso de injertación. No obstante, estudios realizados para analizar el transporte de BRs en plantas de guisante demostraron que el mutante de biosíntesis de BR denominado Lkb (por el locus de longitud de internodo Lk) se injerta con éxito. Por lo tanto, es poco probable que los BRs sean cruciales para el proceso de injerto. Los BRs interactúan con distintas fitohormonas en una amplia variedad de procesos biológicos (tal como se revisó en Saini, Sharma & Pati, 2015). Dado el posible papel de los BRs en la formación del xilema y su interacción con otras fitohormonas importantes para el injerto como las auxinas, sería interesante profundizar en la investigación del papel, en caso de haberlo, de los BRs durante el proceso de injerto (Nanda & Melnk, 2017).

Ácido jasmónico

El ácido jasmónico (AJ) y sus compuestos relacionados son hormonas vegetales que se originan a partir de lípidos. Estas hormonas son reconocidas principalmente por su papel en la respuesta a estreses

bióticos y abióticos, particularmente en situaciones que involucran lesiones o daños. Sin embargo, también participan en varios aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas, como la formación de raíces y tricomas. Varios estudios han revisado las funciones de AJ y sus derivados, (Santino et al., 2013; Wasternack & Hause, 2013).

Según Jang et al. (2017), las raíces de *Arabidopsis* tratadas con AJ mostraron una mayor formación de xilema adicional, sin embargo, no indujeron la formación de xilema adicional en mutantes con señalización de AJ alterada. Más bien, los resultados del estudio sugieren que AJ puede suprimir la respuesta de CK, lo que permite un mayor desarrollo del xilema, no obstante, es necesario realizar más investigación para comprender completamente la función de AJ en la formación vascular y su interacción con las CK.

Estrigolactonas (SL)

Las estrigolactonas (SL) son un tipo de moléculas de señalización derivadas de los carotenoides que juegan un papel crucial en la regulación del desarrollo y la arquitectura de las plantas. Estas moléculas han sido ampliamente estudiadas en su impacto en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Waters et al., 2017). Además de sus efectos en la arquitectura de la planta, los SL también tienen un impacto en la división celular del cambium. Los mecanismos exactos por los cuales las SL influyen en la división celular del cambium aún se están estudiando, pero se cree que las SL desempeñan un papel en la regulación del equilibrio entre la proliferación celular y la diferenciación en el cambium. Comprender el papel de los SL en la división celular del cambium podría tener implicaciones significativas para las prácticas forestales y de fitomejoramiento (Waldie, McCulloch & Leyser, 2014).

Según un estudio realizado en *Arabidopsis* por Crawford et al. En 2010, la producción de cambium es facilitada por las estrigolactonas (SL) y podría ocurrir potencialmente al suprimir el transporte de auxinas, en lugar de a través de otros mecanismos. Aunque aún no se ha examinado la función de las estrigolactonas (SL) en la respuesta a heridas en el proceso de injertación, su participación en la regulación del transporte de auxinas y la promoción de la actividad del cambium implica que podrían desempeñar un papel en el injerto (Nanda & Melnk, 2017).

Inhibidores fenólicos

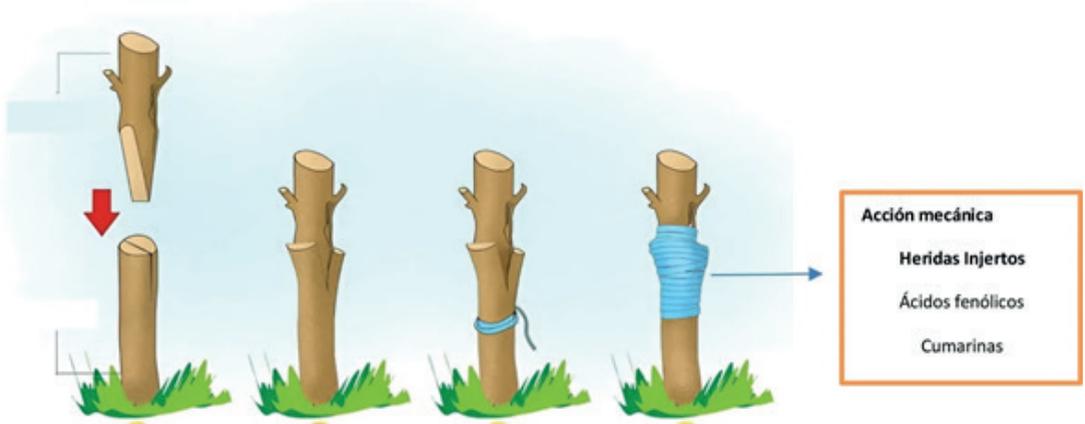
Es importante destacar que las plantas generan diversos compuestos químicos (metabolitos secundarios) como respuesta a mecanismos de protección vital como son las heridas de variados orígenes (injertos), ataque de patógenos, exceso de radiación UV, temperaturas bajas o disminución de nutrientes. Estos eventos estimulan la expresión de genes que codifican diversas enzimas de la ruta biosintética de diversos compuestos fenilpropanoides (Ácidos fenólicos, Cumarinas, Psoralenos, Lignina, Suberina y Ácidos Fenólicos) (Tadeo & Gómez-Cadenas, 2013) (Figura 2.8).

Los compuestos fenólicos proceden del ácido shiquímico a través de los aminoácidos aromáticos tirosina y fenilalanina. El locus de acción de los inhibidores fenólicos son las enzimas que transforman al triptófano en ácido indol acético (IAA), a las cuales bloquean. Los fenólicos activan la destrucción de las moléculas de auxina existentes al estimular la actividad de la IAA-oxidasa (Kefeli & Kutacek, 1977). Los compuestos fenólicos también inhiben las citoquininas (Zárate-Martínez et al., 2021).

Los ácidos fenólicos se agrupan en las paredes celulares que se producen al presentarse una herida, como es el caso de los injertos con el objetivo de aumentar su rigidez y resistencia. Con esta estrategia se logra evitar el ataque de patógenos que generen una infección.

Figura 2.8

Los metabolitos secundarios se activan en los injertos como consecuencia de la acción mecánica



Fuente: Adaptado de Hartmann et al., 2011.

Vitaminas que participan en el proceso de injertación *La tiamina (Vitamina B₁)*

Su forma activa es el pirofosfato de tiamina y como coenzima participa en las reacciones de oxido reducción, con transferencia de grupos, las cuales son:

- Descarboxilaciones oxidativas de cetoácidos.
- Transcetolaciones.
- Metabolismo de aminoácidos con cadena ramificada.

Las enzimas dependientes de la tiamina usualmente requieren de un metal, divalentes como el Mg^{+2} o el Mn^{+2} .

Riboflavina (Vitamina B₂)

Actúa sobre las células del parénquima de empalizada (tejido fundamental) del cual puede diferenciarse un meristemo. Hace parte de los grupos prostéticos flavinadenina emperatura (FAD) y Flavinmonocleótido (FMN).

Participa en reacciones de oxido reducción durante el proceso de injertación:

- Deshidrogenaciones y oxidaciones.
- En la cadena de transporte de electrones.
- Reacciones de oxidación que involucran radicales libres o en las que participan iones metálicos.

Ácido nicotínico (Niacina)

En su forma amida hace parte de las coenzimas nicotinamida adenina dinucleótido (NAD^+) y fosfato de nicotinamida adenina dinucleótido (NADP^+). Estas coenzimas actúan como portadores de hidrógeno y de electrones a través de reducciones y oxidaciones alternadas del anillo pirridico, es decir en reacciones de oxido reacción.

Inositol

El inositol libre participa en el transporte de auxinas; siendo una vitamina hidrosoluble participa en reacciones enzimáticas incluyendo biosíntesis de galactosidos, de fosfoinositoides, rompimiento oxidativo y epimerización.

Mecanismo de acción para regenerar el tejido del patrón y la variedad

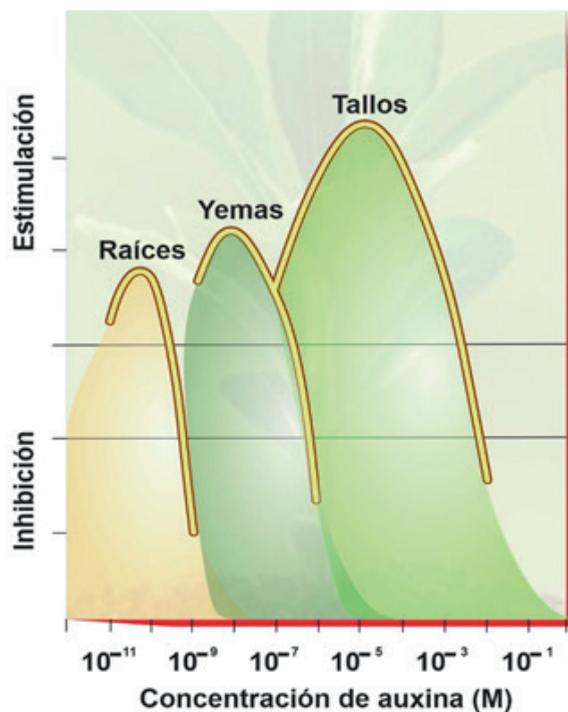
El crecimiento cambial se debe a las auxinas y la formación de callosos. Es así como primeros estudios sobre el crecimiento vegetal postularon la existencia de una hormona de las heridas Bonner y English (1938). La baja concentración de hormonas estimula el crecimiento, existiendo una estrecha relación entre la cantidad o concentración del ácido empleado y la cantidad o tipo de respuesta de la planta afectada (Enders & Strader, 2015, Segura, 2013).

Adicionalmente, dependiendo del órgano de la planta la sensibilidad a la auxina será diferencial. Es así como las raíces presentan mayor sensibilidad que las yemas y ésta mayor sensibilidad que los tallos.

En este sentido, Acosta-Echeverría, Sánchez-Bravo y Marino Bañón (2013) señalan que con una disolución de 10^{-8} M de auxina estimulará un crecimiento máximo en las yemas y un menor efecto en los tallos, por el contrario, el desarrollo en raíces sería altamente inhibido (Figura 2.10). Además, es importante destacar que las auxinas también pueden mejorar el proceso de prendimiento de injertos. En estudios realizados en vid, manzano y ciruelo se ha observado que al tratar el patrón con ácido naftalenacético (ANA) concentrado a 10 ppm en vid y con 0,05 % de IAA en manzano y ciruelo, se produjeron diferencias significativas en la altura y diámetro del tallo de los injertos con y sin tratamiento.

Figura 2.9

Diferentes respuestas de crecimiento según la concentración de auxina en raíces yemas y tallos



Fuente: Adaptado de Acosta-Echeverría, Sánchez-Bravo & Marino Bañón, 2013.

Por otra parte, para estimular endógenamente en la planta la división celular, se requiere la presencia de giberelinas y de las citocininas que provocan una prolongación y una división celular localizada. La sonatina, presente en las superficies cortadas o de las células trituradas durante la injertación, prolonga la división celular (formula química, 6 – furfurilamina purina) (Schaller, Bisho & Kieber, 2015).

En términos fisiológicos, el crecimiento de los callos durante la injertación está regulado por las concentraciones de auxinas, giberelinas y citocininas. Las auxinas estimulan la síntesis de RNA y proteínas en muchas plantas, lo que puede ser un requisito previo para el crecimiento que se produce bajo su influencia. Sin embargo, los efectos de las auxinas en la síntesis de RNA parecen ser cuantitativos en lugar de cualitativos. La interacción entre estas hormonas y otros factores ambientales puede determinar la magnitud y la dirección del crecimiento de los callos durante la injertación. Un RNA – mensajero que sea específico del crecimiento provocado por las auxinas, puede encontrarse presente en las células, porque al aplicarse las auxinas, el código del RNA – mensajero se traduce en proteínas (Nieminen et al., 2008; Melnyk et al., 2015).

Es posible que dos RNA mensajeros se traduzcan en proteínas cuando son leídos por los ribosomas. Es decir, en una célula pueden estar presentes dos RNA, uno que está activo anteriormente de la aplicación de las auxinas y otro que está asociado con la respuesta de crecimiento real durante la injertación. Estos dos RNA pueden controlar diferentes procesos celulares y su presencia y actividad pueden ser reguladas por diferentes hormonas y estímulos ambientales. La interacción entre los RNA mensajeros y las proteínas que codifican es decisivo para el correcto funcionamiento de la célula y para la regulación del crecimiento durante la injertación (Melnyk et al., 2015).

La participación de las vitaminas como la tiamina, riboflavina, ácido nicotínico e inositol incrementan el porcentaje de prendimiento del injerto y la concentración de sacarosa en un medio con un contenido cercano al 7,5 % en cítricos (Nieminen et al., 2008).

Las enzimas son necesarias para causar los efectos de suavización de las paredes y expansión celular cuando se produce el efecto de las auxinas. La actividad de estas enzimas puede ser regulada por las hormonas, especialmente por las auxinas. La flexibilización de las paredes celulares se produce gracias a la acción de las enzimas, como las celulasas y las pectinolisas, que degradan los componentes de la pared celular, haciéndola más flexible y permitiendo la expansión de la célula. Esta expansión se produce a través del aumento de la turgencia celular causada por la entrada de agua en la célula debido a la presión osmótica en la savia vacuolar. Es importante destacar que, el control de la actividad de estas enzimas y el equilibrio adecuado entre las fuerzas turgentes y las paredes celulares es esencial para el funcionamiento de la planta y para la regulación del crecimiento durante la injertación.

La plasticidad fenotípica se refiere a la capacidad de las células vegetales de cambiar su forma y estructura en respuesta a estímulos ambientales o hormonales. Es así como un cambio irreversible de las paredes celulares es un resultado de la acción de enzimas que hidrolizan los enlaces cruzados entre las microfibrillas de celulosa, lo que permite una mayor flexibilidad y expansión de las células. Esta plasticidad fenotípica es importante en diferentes procesos biológicos, como el crecimiento y la diferenciación celular, la germinación y el transporte de sustancias en las plantas (Aribal, Bonggay & Fernando, 2017; Bajpai et al., 2015; Viveros et al., 2013).

La auxina juega un papel importante en la relajación de las paredes celulares, lo que permite el aumento del tamaño celular. Además, la absorción de agua y la expansión de las paredes celulares son un resultado de la disminución de la presión de turgencia y la entrada de agua a la célula. Estos procesos son cruciales para el crecimiento y la formación de callos durante la injertación. Igualmente, las auxinas y otras hormonas pueden influir en el balance de las hormonas, producir efectos sobre las enzimas del metabolismo, así como controlar la expresión de los genes responsables de la síntesis de proteínas y la estructura de la pared celular. La plasticidad fenotípica es un resultado de la acción combinada de hormonas y otros factores ambientales en la producción y organización de materiales en las paredes celulares (Schaller, Bishopp & Kieber, 2015).

Durante el desarrollo del mecanismo de síntesis de proteínas a nivel molecular, tenemos que el DNA (que contiene la información genética) sirve de base para la síntesis de RNA – mensajero que se desplaza al interior del citosol a los ribosomas, donde comunica su información y con ello controla la síntesis proteínica. Las moléculas de RNA – de transferencia, reúnen los aminoácidos y los llevan a los ribosomas, donde se reúnen para formar proteínas de acuerdo con las indicaciones del RNA – mensajero. Se ha reconocido que la primera respuesta de la planta a la acción de las auxinas no es el crecimiento, sino un proceso genético en el núcleo que afecta posteriormente a dicho proceso y con ello la regeneración de los tejidos fundamentales, de sostén y de conducción en la injertación (Enders & Strader, 2015).

Las altas concentraciones de ácido naftalen acético (ANA) inducen la formación de callos en la injertación y la función del GA3 (ácido giberélico), en las relaciones hormonales, es la de promover el desarrollo del tallo, a partir de meristemos previamente formados. Las giberelinas también provocan la expansión, mediante la inducción de enzimas que debilitan las paredes celulares. Asimismo, provocan la formación de enzimas proteolíticas que liberan triptófano, que es precursor del IAA (Claeys, Bodt & Inzé, 2014; Wang, Li & Ecker, 2002).

Con frecuencia las hormonas como las auxinas y giberelinas pueden controlar y estimular el crecimiento de callos durante la injertación, ya sea a través de la síntesis de RNA y proteínas específicas, la activación de enzimas, la hidrólisis de almidón y la elevación de la presión osmótica en la savia celular. Además, las giberelinas pueden aumentar la concentración de auxinas en la planta y transportarlas a su punto de acción (Semeradova, Montesinos & Benkova, 2020).

Además de las acciones previas mencionadas, las giberelinas también estimulan la producción de proteínas y ácidos nucleicos en la célula, lo que a su vez puede favorecer la expansión celular. En este sentido, la hipótesis es que las giberelinas pueden influir en la concentración y acción de auxinas en la célula, promoviendo así el crecimiento celular durante la injertación (Claeys, Bodt & Inzé, 2014).

Ahora bien, las citosinas provocan dos tipos de efectos; el de división celular y el de regular la diferenciación en los tejidos cortados durante la injertación. Las concentraciones extremadamente bajas (5×10^{-11}) de la citosina denominada zeatina; sin zeatina o alguna otra citosina, se produce solo un crecimiento ligero de los tejidos en diferenciación. Se requiere citosina tanto en la iniciación como en la continuación de la división celular en la planta patrón.

El tejido de regeneración crece bien al participar los siguientes compuestos orgánicos: la sacarosa, tiamina, mioinositol, auxinas, así como las citoquininas (Nanda & Melnyk, 2017). La citosina o citoquinina ejercen una acción sinérgica en la inducción de la división celular, y en el crecimiento no diferenciado o de producción de callos necesarios para que se desarrolle el injerto.

Las citoquininas y auxinas interactúan para regular el crecimiento y la diferenciación de los tejidos en las plantas. Un cambio en la proporción de citoquininas y auxinas puede afectar la expresión del crecimiento, y una relación baja entre las citoquininas y las auxinas promueve el desarrollo de las raíces, mientras que una relación alta promueve el desarrollo de yemas y brotes, y una relación intermedia conduce al desarrollo de tejidos de callo no diferenciados (Claeys, Bodt & Inzé, 2014).

En cuanto a otros niveles relativos de hormonas promotoras, entre las giberelinas y las auxinas ellas actúan de forma sinérgica acelerando el crecimiento de las plantas. La presencia de las giberelinas, como se dijo antes hace incrementar el nivel de auxina en las plantas, mediante un mecanismo de ahorro de auxina, ya que la giberelina hace disminuir la actividad de ciertos sistemas que destruyen las auxinas en ciertas plantas e incrementando los niveles de auxina en otras. Además, los niveles de auxina y giberelina influyen en el desarrollo del sistema vascular secundario (Davière & Achard 2013; Segura, 2013).

Como podemos ver, las hormonas promotoras, auxinas, giberelinas y citocininas y la participación de inhibidores que frenan el proceso de regeneración de tejidos, son importantes en conjugación metabólica con sacarosa, vitamina y los ácidos nucleicos para que se realice la

conjunción entre el cambium del patrón y el cambium de la variedad para que se desarrolle una sola planta. La estimulación de la actividad cambial y el desarrollo del xilema están influenciados por las hormonas. Es así, como la aplicación conjunta de auxinas y giberelinas a tallos con heridas, promueve el desarrollo de xilema y floema que se asemeja más al tejido normal, que el que surge al aplicar solo auxinas. Igualmente, se debe señalar la promoción del desarrollo y la diferenciación del xilema, mediante la aplicación de GA3. La aplicación de GA3 en concentraciones de 750 a 500 ppm, promueve significativamente la diferenciación del xilema en zonas recién desarrolladas en brotes de olivo (Nanda & Melnyk, 2017; Segura, 2013).

Las citoquininas resultan también importantes en la producción de xilema. El ácido indol acético (AIA) sustituye solo parcialmente las sustancias producidas por el ápice en crecimiento; pero si se utiliza tanto GA3 como citoquinina, además de auxinas, se provoca una formación normal de madera siendo las auxinas, el principal factor limitante que induce la formación del xilema, mientras que las giberelinas y la citoquinina incrementan el patrón de distribución de las auxinas dentro del tallo (Schaller, Bishopp & Kieber, 2015; Segura, 2013).

Conclusiones

- La injertación es un proceso fisiológico regido ontogénicamente por la acción hormonal de cada especie.
- La acción sinérgica entre las auxinas, giberelinas y citoquininas es necesaria para que se produzca un cambium y una xilema fisiológicamente normal.
- Los compuestos complementarios como los metabolitos secundarios, vitaminas, carbohidratos e inhibidores son necesarios junto con los ácidos nucleicos, para que se inicie el proceso de regeneración de tejidos.
- Las mismas hormonas y genes que regulan la formación vascular en los órganos en desarrollo también regulan la regeneración del tejido vascular en la unión del injerto

Referencias

- Acosta-Echeverría, M., Sánchez-Bravo, J. & Marino-Bañón, A. (2013). Auxinas. En: Fundamentos de fisiología vegetal. J. Azcón-Bieto y M. Talón. McGraw-Hill – Interamericana de España.
- Alcántara, J.C., Acero Godoy, J., Alcántara Cortés J.D., Sánchez Mora, R. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *NOVA*, 17 (32), 109-129.
- Aribal, L., Bonggay, J., & Fernando, E. (2017). Leaf size indices and structure of the peat swamp forest. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 3(1), 63-74.
- Asahina, M., Azuma, K., Pitaksaringkarn W & Satou, S. (2011). Spatially selective hormonal control of RAP2.6L and ANAC071 transcription factors involved in tissue reunion in Arabidopsis. *Proceedings of the National Academy of Science*, 108,16128–16132.
- Bajpai, PK., Warghat, A., Yadav, A., Kant, A., Srivastava, R., & Stobdan, T. (2015). High phenotypic variation in *Morus alba* L. along an altitudinal gradient in the Indian trans- Himalaya. *Journal of Mountain Science*,12(2), 446–455.
- Belkhadir, Y. & Jaillais, Y. (2015). The molecular circuitry of brassinosteroid signaling. *New Phytologist*, 206,522–540.
- Belmonte-Urena, L., Garrido-Cárdenas, J. & Camacho-Ferre, F. (2020). Analysis of world research on grafting in horticultural plants. *HortScience*, 55,112–20.
- Boffelli, E. & Sirtori G. (1995). Guía fotográfica de los injertos. Editorial de Vecchi, S.A. Barcelona. 158 pp.
- Bonner, J. & English, J. (1938). A Chemical and Physiological Study of Traumatins, A Plant Wound Hormone. *Plant Physiology*, 13(2), 331–348,

- Claeys, H., Bodt, S. & Inzé, D. (2014) Gibberellins and DELLAs: central nodes in growth regulatory networks. *Trends Plant Science*, 19, 231–239.
- Córdoba, G. (1976). *Fisiología vegetal*. Ediciones Blume, Madrid. España. 439 pp.
- Crawford, S., Shinohara, N., Sieberer, T., Williamson, L., George, G., Hepworth, J. & Leyser, O. (2010). Strigolactones enhance competition between shoot branches by dampening auxin transport. *Development*, 137(17), 2905–2913.
- Davière, J. & Achard, P. (2013). Gibberellin signaling in plants. *Development* 140:1147–1151.
- Donner, T., Sherr I. & Scarpella, E. (2009) Regulation of preprocambial cell state acquisition by auxin signaling in *Arabidopsis* leaves. *Development*, 136,3235–3246.
- Enders, T. & Strader, L. (2015) Auxin activity: past, present, and future. *American Journal of Botany*, 102,180–196.
- Esau, K. (1986). *Anatomía vegetal II*. Universidad de California, 727 pp.
- Fariborz, H., Liu, T., Folta, K. & Sarkhosh, A. (2022). Physiological, biochemical, and molecular aspects of grafting in fruit trees. *Horticulture Research*, 9.
- Fuentes, I., Stegemann, S., Golczyk, H., Karcher, D. & Bock, R. (2014). Horizontal genome transfer as an asexual path to the formation of new species. *Nature*, 511, 232–235.
- Garcidueñas, M. & Rodríguez, H. (1987). Control hormonal del desarrollo de las plantas. *Fisiología – tecnología – experimentación*. Noriega editores. 239 pp.
- Gu, C., Guo, Z., Hao, P., Wang, G., Jin, Z. & Zhang, S. (2017). Multiple regulatory roles of AP2/ERF transcription factor in angiosperm. *Botanical Studies*, 58(1), 6.
- Harada T. (2010). Grafting and RNA transport via phloem tissue in horticultural plants. *Scientia Horticulturae*, 125,545–50.

- Hartmann, H., Kester, D. E., Davies, F. T. & Geneve, R. L. (2011). *Hartmann & Kester's Plant Propagation: Principles and Practices*. (8th ed.). Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall International.
- Ikeuchi, M., Iwase, A., Rymen, B., Lambalez, A., Kojima, M., Takebayashi, Y Sugimoto, K. (2017). Wounding Triggers Callus Formation via Dynamic Hormonal and Transcriptional Changes. *Plant Physiology*, 175(3), 1158–1174.
- Jang, G., Chang, S. Um, T., Lee, S., Kim, J. & Choi, Y. (2017) Antagonistic interaction between jasmonic acid and cytokinin in xylem development. *Science Report*, 7,10212.
- Kefeli, V. & Kutacek, M. (1977). *Plant Growth Regulation*, 181-187. Springer-Verlag, Berlin.
- Lange, T. (1997). Cloning gibberellin dioxygenase genes from pumpkin endosperm by heterologous expression of enzyme activities in *Escherichia coli*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(12), 6553-6558.
- Mähönen, A., Bonke, M., Kauppinen, L., Riikonen, M., Benfey, P. & Helariutta, Y. (2000). A novel two-component hybrid molecule regulates vascular morphogenesis of the Arabidopsis root. *Genes & Development*, 14,2938–2943.
- Marinho-Almeida, G. & Lança-Rodrigues, JG. (2016). Desenvolvimento de plantas através da interferência de auxinas, citocininas, etileno e giberelinas. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science*, 9(3), 111-117.
- Matsuoka, K., Sugawara, E., Aoki, R., Takuma, K., Terao-Morita, M., Satoh, S. & Asahina, M. (2016). Differential cellular control by cotyledon-derived phytohormones involved in graft reunion of Arabidopsis hypocotyls. *Plant Cell Physiology*, 57 (12), 2620–2631.
- Melnyk, C. (2017). Plant grafting: insights into tissue regeneration. *Regeneration*. 4(1), 3–14.
- Melnyk, C., Schuster, C., Leyser, O. & Meyerowitz, E. (2015). A developmental framework for graft formation and vascular

- reconnection in *Arabidopsis thaliana*. *Current Biology*, 25,1306–1318
- Moreno, M. & Webster, A. (2004). Vigour mechanisms in dwarfing rootstocks for temperate fruit trees. In: I International Symposium on Rootstocks for Deciduous Fruit Tree Species Eds. Zaragoza, Spain
- Moreno, M., Moing, A., Lansac, M. Gaudillere, J. & Salesses, G. (1993). Peach/Myrobalan plum graft incompatibility in the nursery. *Journal of Horticultural Science*, 68, (5),705–14.
- Mudge, K., Janick J., Scofield, S. & Goldschmidt, E. (2009). A history of grafting. *Horticultural Reviews*,35, 437–93.
- Nanda, A. & Melnyk, C. (2017). The role of plant hormones during grafting. *Journal of Plant Research*,131(1),49-58.
- Nawaz, M., Imtiaz, M., Kong, Q., Cheng, F., Ahmed, W., Huang, Y. & Bie, Z. (2016). Grafting: a technique to modify ion accumulation in horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 7,1457.
- Nieminen, K., Immanen, J., Laxell, M. et al. (2008) Cytokinin signaling regulates cambial development in poplar. *Proceedings of the National Academy of Science* 105, 20032–20037
- Rasool, A., Mansoor, S., Bhat, K, Hassan, G., Baba, T., Alyemeni, M., Alsahli, A., El-Serehy, H., Paray, B. & Ahmad, P. (2020). Mechanisms Underlying Graft Union Formation and Rootstock Scion Interaction in Horticultural Plants. *Frontiers in Plant Science*, 11, 590847.
- Reig, G., Zarrouk, O., Font I Forcada, C., Moreno, M. (2018). Anatomical graft compatibility study between apricot cultivars and different plum-based rootstocks. *Scientia Horticulturae*, 237, 67–73.
- Reigosa, J. M.; N. Pedrol, & A. Sánchez. (2004). *La ecofisiología vegetal. Una ciencia de síntesis*. Thomson. 1193 pp.
- Sachs, T. (1981) The control of the patterned differentiation of vascular tissues. *Advances in Botanical Research*, 9,151–262.

- Saini, S., Sharma, I., & Pati, P. (2015). Versatile roles of brassinosteroid in plants in the context of its homeostasis, signaling and crosstalks. *Frontiers in Plant Science*, 6(151),1-17.
- Salazar-Cerezo, S., Martínez-Montiel, N., García-Sánchez, J., Pérez-y-Terrón, R., & Martínez-Contreras, R. D. (2018). Gibberellin biosynthesis and metabolism: A convergent route for plants, fungi and bacteria. *Microbiological Research*, 208, 85-98.
- Santino, A., Taurino, M., Domenico, S., Bonsegna, S., Poltronieri, P. Pastor, V. & Flors, V. (2013). Jasmonate signaling in plant development and defense response to multiple abiotic stresses. *Plant Cell Report*, 32,1085–1098.
- Schaller, G. Bishopp, A. & Kieber, J. (2015). The yin-yang of hormones: cytokinin and auxin interactions in plant development. *Plant Cell*, 27, 44–63.
- Segura, J. (2013). Introducción al desarrollo. Concepto de hormona vegetal. Capítulo 18. (349-377pp). En: *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Ascon-Bieto J y Talón M. McGRAW-HILL – Interamericana de España, S. Segunda Edición.
- Semeradova, H., Montesinos, J. & Benkova, E. (2020). All Roads Lead to Auxin: Post-translational Regulation of Auxin Transport by Multiple Hormonal Pathways. *Plant Communications*, 22;1(3), 100048.
- Stegemann, S. & Bock, R. (2009). Exchange of Genetic Material Between Cells in Plant Tissue Grafts. *Science*, 324(5927), 649–651.
- Tadeo, F. & Gómez-Cadenas, A. (2013). Fisiología de las plantas y el estrés. Capítulo 29 (577-598). En: *Fundamentos de fisiología vegetal*. J. Azcón-Bieto y M. Talón. McGraw-Hill – Interamericana de España.
- Viveros-Viveros, H., Camarillo-Luna, A.R., Sáenz-Romero, C., & Aparicio-Rentería, A. (2013). Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación Altitudinal. *Bosque* (Chile), 34(2), 173-179.

- Waldie, T., McCulloch, H. & Leyser, O. (2014). Strigolactones and the control of plant development: lessons from shoot branching. *Plant Journal*, 79, 607–622.
- Wang, K., Li, H. & Ecker, J. (2002). Ethylene biosynthesis and signaling networks. *Plant Cell*, 14, S131–S151.
- Wasternack, C. & Hause, B. (2013). Jasmonates: biosynthesis, perception, signal transduction and action in plant stress response, growth, and development. *Annals of Botany*, 111, 1021–1058.
- Waters, M. Gutjahr, C., Bennett, T. & Nelson, D. (2017). Strigolactone signaling and evolution. *Annual Review of Plant Biology*, 68, 291–322.
- Yokoyama, A., Yamashino, T., Amano, Y., Tajima, Y., Imamura, A., Sakakibara, H. & Mizuno, T. (2006). Type-B ARR transcription factors, ARR10 and ARR12, are implicated in cytokinin-mediated regulation of protoxylem differentiation in roots of *Arabidopsis thaliana*. *Planta Cell Physiology*, 48, 84–96.
- Zárate-Martínez, J., González-Morales, H., Ramírez-Godina, L., Robledo-Olivo, P. & Juárez-Maldonado, N. (2021). *Efecto de los ácidos fenólicos en el sistema antioxidante de plantas de tomate (Solanum lycopersicum Mill.)*. *Agronomía Mesoamericana*, 32 (3), 854-868.
- Zarrouk, O., Gogorcena, Y., Moreno M. Pinochet, J. (2006). Graft compatibility between peach cultivars and Prunus rootstocks. *HortScience*, 41(6), 1389–1394.
- Zhang, Y., Yu, J., Xu, X., Wang, R., Liu, Y., Huang, S., Wei, H. & Wei, Z. (2022). Molecular Mechanisms of Diverse Auxin Responses during Plant Growth and Development. *International Journal of Molecular Science*, 23, 12495.



CAPÍTULO III

Modelos matemáticos para predecir
procesos fisiológicos

CAPÍTULO III

MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDECIR PROCESOS FISIOLÓGICOS

Los modelos matemáticos

La modelación es el proceso de construir una representación exacta de un sistema; y la simulación es el proceso de utilizar el modelo para imitar el comportamiento del sistema en el mundo real, por lo cual juntos permiten a los investigadores, ingenieros y expertos vislumbrar y predecir el comportamiento de los sistemas complejos. Es así como la clasificación de los modelos en descriptivos o explicativos se basa en su objetivo y en la información que proporcionan (Yin, Struik & Goudriaan, 2021; Hernández, 2013).

Los modelos descriptivos también conocidos como estadísticos o empíricos, se enfocan en describir la relación entre variables, sin profundizar en los mecanismos subyacentes que causan el comportamiento del sistema. Se pueden clasificar según su capacidad para describir, el tipo de sistema que representan (mecanísticos), los que no tienen en cuenta la variable del tiempo (estáticos), así como los que incorporan el tiempo en su representación (dinámico).

Por su parte, los modelos explicativos proporcionan una descripción cuantitativa de los procesos y mecanismos que causan la conducta del sistema, lo que les permite ser más útiles en la predicción y control del comportamiento. Por ello, los modelos matemáticos son una representación sintética de la realidad que permite comprender, explicar, estimar o predecir el comportamiento de los sistemas reales y los métodos experimentales de regresión lineal y múltiple son herramientas comunes utilizadas en la construcción de modelos empíricos (Heiner, 2007; Thornley, 1976). Cabe resaltar que los gráficos constituyen

igualmente una herramienta en el análisis exploratorio de datos cuando se va a construir un modelo, la generación de hipótesis, la comprobación de supuestos sobre la forma de las distribuciones y la presentación de los resultados del análisis estadístico definitivo (Hernández, 2013).

En este orden de ideas, los métodos experimentales de regresión lineal y múltiple asociados con variables como el área foliar y el peso seco, entre otras, representan la ontogenia de órganos de la planta y permite la construcción de modelos matemáticos para estimar en las plantas de cultivo la capacidad fotosintética. Un modelo bien fundamentado de simulación de un cultivo puede ser una herramienta valiosa para conocer el comportamiento del cultivo ante variaciones ambientales y prácticas culturales. La capacidad de representar diferentes factores ambientales como la radiación solar, la temperatura, la lluvia o el riego y las prácticas culturales, como la fertilización y la densidad de siembra permiten a los investigadores explorar cómo estos factores afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo. La estructura y complejidad del modelo determinará el tipo de salidas que se pueden obtener y su uso y dependiendo del objetivo, se pueden obtener información sobre la fenología, la acumulación de masa seca por diferentes órganos de la planta, entre otros aspectos importantes del cultivo (Miranda, Carranza & Fischer, 2008).

Por su parte, la principal diferencia entre los modelos determinísticos y los modelos estocásticos radica en cómo representan la incertidumbre o el azar en la predicción. Los modelos determinísticos pronostican cantidades sin asociarle ninguna distribución probabilística, por lo que los resultados de sus predicciones son únicos e invariables. A su vez, los modelos estocásticos consideran la incertidumbre y el azar en sus estimaciones asociando una distribución de probabilidad a los resultados. Esto permite representar la incertidumbre en la predicción y tener una idea más precisa del margen de error en la estimación. Es así como los modelos de regresión son útiles para predecir, por ejemplo, el comportamiento de los frutales caducifolios en condiciones tropicales y para cuantificar su crecimiento. Más bien, por medio de modelos matemáticos se ha encontrado que el pericarpio de durazno con relación al crecimiento persigue un patrón de doble sigmoide con dos fases de crecimiento vertiginoso y una fase intermedia de

crecimiento supuestamente interrumpido. Es decir, la forma de la curva presenta una fase inicial sigmoidea, seguida por una fase de senescencia y posteriormente por una segunda curva de crecimiento logarítmico (Casierra-Posada, Barreto & Fonseca, 2004).

Con respecto al proceso estocástico de la cadena de Markov; este es un enfoque más general para aprovechar una muestra probabilística de la ramificación, con el fin de poder modelar el proceso de ramificación de una rama. Aunque otro modelo denominado semi-markov es sólo un modelo descriptivo, todavía puede interpretar algunos de los fenómenos biológicos que describe. En efecto, es el primer paso en la producción de un modelo estocástico de la arquitectura de la copa de árboles de durazno y según Ning et al. (2004) dicho modelo mejorará las predicciones sobre los efectos de diferentes medidas de poda.

Con respecto al término “multivariante” en modelos de regresión, el mismo puede ser confusa debido a la variabilidad en su uso en la literatura. Algunos autores utilizan el término para describir un modelo que involucra más de dos variables, mientras que otros solo lo utilizan cuando se asume que todas las variables tienen una distribución normal multivariante. Esto puede generar ambigüedad y es importante aclarar el enfoque utilizado en cada caso. Más bien, para que un modelo sea verdaderamente considerado multivariante, todas las variables deben ser aleatorias y estar interrelacionadas de manera tal que sus diferentes efectos puedan ser analizados de forma separada y significativa. Esta interrelación es crucial para poder analizar y comprender los efectos de cada variable individualmente, así como para obtener una comprensión más completa del comportamiento y las relaciones entre las diferentes variables (Hair, Anderson & Tatham, 2001).

Es de consideración que los métodos de regresión lineal y múltiple y los datos de variables experimentales asociadas con órganos de las plantas, tales como área foliar y material seco, entre otros, proporcionan el material básico para la construcción de modelos matemáticos para estimar la capacidad fotosintética de las plantas. Estudios sobre métodos para estimar el área foliar en muchos casos son costosos, consumen mucho tiempo y en algunos casos se debe causar un severo daño a la planta. Casierra, Peña y Peña (2008) afirman que el

largo y ancho de las hojas son valores confiables y pueden ser utilizados en ecuaciones de regresión y reflejan exactamente el área del limbo foliar. Efectivamente, el Índice de Área Foliar (IAF) es el parámetro más comúnmente usado para el análisis del dosel de los cultivos y relaciona el área foliar de las plantas con el componente de terreno que ocupa (Arias, Calvo & Dohrenbusch, 2007). Por lo tanto, es importante establecer y comprender modelos matemáticos basados en medidas sencillas que puedan ser tomadas en campo con las cuales se puedan estimar el área foliar de la hoja sin dañar la planta (Wang & Zhang, 2012; Cardona, Araméndiz & Barrera, 2009; Galindo & Clavijo, 2007; Ruiz et al., 2007).

Procesos fisiológicos que pueden ser modelados: el crecimiento y desarrollo vegetal

Estudios infieren que existen relaciones entre el crecimiento de los árboles, la fenología y los factores ambientales locales donde se siembran los cultivos. Más bien, revelan correlaciones significativas muy bajas y es por ello que se deben tener en cuenta al establecer las relaciones, es decir, la causa-efecto entre los análisis de crecimiento vegetativo y los factores ambientales individuales, porque los cambios en el medio ambiente podrían estar correlacionados con otros factores diferentes a los fenómenos analizados el cual poseen una influencia directa en el crecimiento vegetativo.

La disponibilidad de nutrientes, la variación de la luz, la salinidad del suelo, la presencia de enfermedades y plagas, así como la presencia de factores estresantes como la sequía o la helada, pueden igualmente influir en la fenología de las plantas (Yanez, Terrazas & Mata, 2006). Por ejemplo, en el caso del durazno estos factores pueden influir en el crecimiento rítmico (la alternancia de actividad y reposo) afectando la sincronización de la floración y la madurez del fruto, lo que puede tener implicaciones en la eficiencia, la producción y en la calidad del fruto (Sanabria, 2011). Es así como la comprensión de cómo estos factores afectan la fenología del durazno es fundamental para poder desarrollar estrategias de manejo adecuadas que permitan mejorar la producción y calidad de la fruta.

Al utilizar una mayor cantidad de recursos, las plantas competidoras tienen una ventaja sobre las plantas vecinas y pueden crecer más rápidamente, lo que les permite ocupar un mayor espacio y tener acceso a más recursos. Además, al incrementar su materia seca, estas plantas pueden almacenar más energía y nutrientes, lo que les permite mantener su tasa de crecimiento en el tiempo (Azam-Ali & Squire, 2002).

La intensidad de la competencia en el cultivo depende de la distancia con las plantas vecinas; del grado de disponibilidad del factor por el cual compiten, del nivel de necesidad de ese factor como del vigor, arquitectura y precocidad de las plantas. En el caso del durazno, el

desarrollo adecuado de las plantas es una combinación de procesos de crecimiento y diferenciación que conllevan la provisión de materia seca total, de la hoja y de los frutos. Lo anterior hace referencia a la medida de distribución de la materia seca entre las estructuras vegetativas y reproductivas en las plantas, regulada fisiológicamente por la competencia intraespecífica existente entre los órganos reproductivos y vegetativos de la misma planta, relacionados además con su información genética. Los arreglos de siembra rectangular, triangular o cuadrado, tienen efecto significativo en el incremento del rendimiento agronómico y la producción de materia seca, por lo tanto, el mayor rendimiento agronómico por planta está asociado a una mayor producción de materia seca durante el desarrollo de la planta (Azam-Ali & Squire, 2002; Smith et al., 2002).

En este sentido, la plasticidad fenotípica adaptativa se refiere a la capacidad de un organismo para producir diferentes fenotipos en función del ambiente en el que se encuentra, permitiendo una mejor adaptación y sobrevivencia en dicho ambiente. La evaluación de la plasticidad fenotípica adaptativa a escala individual permite identificar los fenotipos más adecuados y aptos para cada ambiente específico, lo que puede ser útil en la selección de material vegetal para la producción agrícola.

Por su parte, el cambio en la morfología, fisiología o patrones de asignación de biomasa de una planta se puede interpretar en términos de su ecofisiología y la disponibilidad de recursos. La tendencia biológica es maximizar la explotación de los recursos limitantes, ya sea luz, agua, nutrientes, entre otros. Un aumento en el área de la hoja y en la asignación de biomasa aérea se traduce en una mayor captura de luz y una mayor eficiencia fotosintética. Un alargamiento de entrenudos y una reducción en el número de ramas son respuestas a situaciones de sombra (Gianoli, 2004; Robakowski, Montpied & Dreyer, 2003).

En plantas de palma africana, por ejemplo, se han encontrado altas fluctuaciones en la relación fuente demanda entre la hoja y el racimo debido a los factores del clima y estacionalidad, principalmente durante los períodos de sequía. Mientras que algunos eventos de este proceso se pueden ajustar rápidamente, en especial los cambios que tienen que ver con la intensidad de la fuente, algunas otras

respuestas que tienen que ver con la fenología, la tasa de crecimiento de los órganos y el tamaño final de los órganos presentan períodos más largos de ajuste a los cambios en la relación fuente demanda y por tanto no pueden ser capaces de compensar las diferencias en corto tiempo (Legros et al., 2009).

A su vez, la planta de durazno cuenta con una diversidad de estrategias para conducir los procesos de llenado de frutos que son muy importantes al considerar el análisis y el modelaje de la plasticidad fenotípica, en particular en condiciones de estrés y ambientes heterogéneos. Las estrategias de inversión biológica de las plantas con respecto a dichos procesos de relación fuente demanda, son un aspecto muy importante que debe ser considerado en el análisis y el modelaje de la plasticidad morfológica. Este tipo de modelo puede ser vinculado y usado para explorar diferentes estrategias, como la plasticidad en la arquitectura de una planta y cómo influye sobre la biomecánica de toda la planta. La mayor parte de estos modelos de planta consideran la plasticidad arquitectónica como una salida importante (Fourcaud et al., 2008). La habilidad de un genotipo a cambios en los fenotipos y su habilidad al cambio conlleva a utilizar el término plasticidad fenotípica que ha sido desarrollado en el ámbito ecológico en las plantas (Bradshaw, 2006).

Aunque el modelo se establezca por las relaciones de las demandas fotosintéticas tales como los frutos, el Índice de Crecimiento de la Planta no dependerá directamente de concentraciones de sustrato internas, si no de factores externos edáficos como la nutrición. Cuando se tiene en cuenta la biomasa producida por una planta está siempre será muy modificada, especialmente cuando se está presentando una adaptación a un estrés por un nutriente o por cambios estacionales de temperatura. Por lo tanto, más investigación es requerida a una escala individual y debería tenerse como vínculo entre las respuestas de tipo morfológico y fisiológico a las condiciones ambientales, antes de proceder a realizar simulaciones de la plasticidad a varios niveles de la población.

Algunos resultados han mostrado que la plasticidad, expresada en una respuesta fotomorfogenética confiere competitiva superior a árboles; cuando está característica es estimada a través de la

eficiencia en la captura de luz, lo mismo que las interacciones con otros procesos agronómicos y fisiológicos, incluidos la densidad de siembra, tasa de crecimiento y alta competencia. Ahora si se analiza la interacción y su importancia entre los factores puede que le reste importancia o le ayude aumentar las ventajas competitivas al cultivar si la combinación de efectos por diferentes factores está considerada en los modelos en forma significativa (Fourcaud et al., 2008).

Modelos utilizados en el análisis de crecimiento de plantas

Fisiológicamente se enfatiza la técnica del análisis de crecimiento en los procesos fisiológicos y el uso de parámetros fisiogénicos con significado biológico, por ejemplo, asumiendo la existencia de un equilibrio funcional entre la fotosíntesis y la nutrición mineral. Sin embargo, existen algunos inconvenientes al utilizar ese método ya que los resultados obtenidos de esta manera muchas veces no proveen directamente de información sobre la aparición de eventos durante el desarrollo y el crecimiento con el tiempo (Thornley, 1976).

Se sabe que la matemática sola no describe todos los tipos de crecimiento con completa exactitud; este fenómeno complejo que involucra muchas variables no puede ser expresado o descrito por una simple ecuación, excepto para las ecuaciones logística y de Gompertz, cada una de las ecuaciones (la exponencial con sus variantes potencial y polinomial, la monomolecular y la parabólica) son solo una parte de la curva de crecimiento.

Hunt (1982) propone métodos alternativos como el uso de curvas polinómicas y/o asintóticas para el análisis de crecimiento de las plantas vistas a través de diversas variables (altura, peso seco hoja, peso seco total), de igual manera, la literatura menciona el comportamiento sigmoideal o doble sigmoideal de diversas variables entre la que se encuentra el peso fresco, peso seco del fruto y la hoja del duraznero.

Se puede entonces ensayar para buscar el mejor ajuste con curvas polinómicas hasta de orden 6, la curva exponencial y varias curvas asintóticas (logística, monomolecular, Gompertz) especificadas a continuación:

Función polinómica.

Son funciones lineales en los parámetros.

$$w = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 + \dots + b_p X^p$$

Donde b son los coeficientes; (p) es el grado del polinomio.

Función exponencial.

Toma la siguiente expresión.

$$w = be^{kt}$$

La función exponencial es fácilmente linealizable en los parámetros:

$$w = \log b + kt$$

Función logística.

La función logística tiene una forma sigmoide que consta de una fase de aceleración y una asíntota a partir de la cual la curva desacelera. La curva logística viene dada por:

$$w = \frac{a}{1 + be^{-kt}}$$

Donde (a) es la asíntota o hacia donde tiene el valor de (w) cuando t (tiempo) tiende a (∞). El valor de (a) se estima a partir de las observaciones de manera empírica. La función anterior no es lineal en los parámetros por lo que se hace necesario linealizar esta expresión con el fin de realizar una estimación por mínimos cuadrados de la expresión lineal. La linealización de la función logística da como resultado (Zea, 2010):

$$\log \frac{a - w}{w} = \log b - kt$$

Función monomolecular.

Esta función describe una curva que está representando constantemente una desaceleración en la Tasa de Crecimiento, esta curva es utilizada ocasionalmente en la fase terminal del crecimiento de la curva. La expresión que representa la función monomolecular es:

$$w = a(1 - be^{-kt})$$

Donde (a) es la asíntota o hacia donde tiene el valor de w cuando t (tiempo) tiende a (∞). El valor de (a) se estima a partir de las observaciones de manera empírica (Zea, 2010). La linealización de la anterior expresión es:

$$\log \frac{a - w}{w} = \log b - kt$$

Función Gompertz.

Esta función es ampliamente utilizada en el crecimiento de plantas y su ecuación es:

$$w = e^{-be^{-kt}}$$

Al igual que con la función logística (a) es la asíntota.

Su respectiva linealización es:

$$\log = (\log a/w) = \log b - kt$$

Estudios sobre modelos matemáticos para estimar el crecimiento vegetativo y reproductivo de las plantas

Los modelos matemáticos son esenciales en la investigación agrícola, ya que ayudan a sintetizar y aumentar el conocimiento existente sobre un sistema. Estos modelos permiten predecir el crecimiento y desarrollo de las plantas a lo largo del tiempo y bajo diferentes condiciones ambientales, además, tienen una aplicación práctica en la evaluación de estrategias de manejo del cultivo. Más bien, los modelos de regresión que pueden variar en complejidad y en los factores que consideran, han sido utilizados por los investigadores en el estudio del crecimiento vegetativo (Tabla 3.1).

Es así como Rojas-Lara et al. (2008) evaluaron seis ecuaciones matemáticas (lineal logístico, simple, exponencial, múltiple, monomolecular y el Michaelis-Menten) para analizar el crecimiento del fruto del chile manzano (*Capsicum pubescens* R y P) cultivados bajo invernadero en Chapingo, México. El objetivo fue identificar el que mejor explicara el crecimiento del fruto utilizando diferentes variables (la longitud, el tiempo, el ancho promedio, el volumen del fruto y del agua) como predictoras del peso fresco, que se consideró como la variable dependiente. Los autores encontraron que los mejores modelos fueron los de regresión lineal simple y múltiple una vez que describieron adecuadamente el crecimiento en ambos años de muestreo (2004 y 2005) exhibiendo altos coeficientes de determinación, estimadores significativos y la presencia de no-colinealidad.

Curiel-Rodríguez et al. (2007) igualmente utilizaron modelos matemáticas para determinar el área de la hoja y la biomasa aérea en el manzano Agua Nueva II/M-7. Los modelos se generaron utilizando técnicas de regresión lineal múltiple y las diferentes variables empleadas fueron el ancho y largo de lámina de la hoja, diámetro y largo del pecíolo, índices de la lámina de la hoja y del pecíolo, área de la hoja, las longitudes y los diámetros de las ramas, así como el área y peso seco de la lámina de la hoja, peso seco del pecíolo y los pesos secos del sistema radical, tronco, tallos y ramas. El estudio encontró que el modelo matemático más preciso para predecir el peso seco de la lámina de la hoja en plantas jóvenes de manzano fue aquel que se basó en el área foliar estimada con R^2 elevado (0,9). Mientras que

para la estimación del peso seco de la hoja fue el que estuvo relacionado con el área foliar estimada y el índice de la lámina de la hoja.

Por su parte, Parra-Coronado, Fischer y Camacho-Tamayo (2016) propusieron modelos matemáticos para estimar el crecimiento del fruto de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret) en función de la altitud y del tiempo térmico en dos parcelas localizadas en el departamento de Cundinamarca, Colombia. Para ello utilizaron variables como el peso, longitud y diámetro, los grados de días calientes y horas solares. Los resultados del análisis de regresión mostraron que los modelos de crecimiento para el peso en función de la longitud y el diámetro, así como para el peso del fruto en función del tiempo térmico y la altitud predijeron de forma satisfactoria el crecimiento del fruto de la feijoa con altos coeficientes de determinación

A su vez, Quevedo, Cancino-Escalante y Barragán (2017) formularon modelos matemáticos con la finalidad de encontrar las mejores ecuaciones de regresión múltiple para predecir el área del limbo y el peso seco de los órganos del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo en tres localidades de la provincia de Pamplona en Norte de Santander, Colombia, usando diferentes estadios secundarios (72, 75 y 87) y un estadio principal (9) de acuerdo con la escala BBCH. Según los autores los datos se comportaron de forma normal y no fue necesario efectuar transformaciones, con la excepción del peso seco del fruto. Además, los coeficientes fueron altamente significativos, y cumplieron con las pruebas de validez lo que indica que las variables regresoras propuestas son útiles para estimar el área foliar y el peso seco del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.], variedad jarillo.

De igual modo, Quevedo y Zuleta (2020) realizaron un estudio en cinco localidades en la provincia de Pamplona, Colombia, con la finalidad de evaluar el rendimiento agronómico y el crecimiento del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] cv. Amarillo criollo por medio de ecuaciones de regresión. Los autores identificaron que las curvas de crecimiento del Índice de Área Foliar, la Tasa de Asimilación Neta y la Tasa de Crecimiento Relativo, se ajustaron a modelos polinómicos de segundo a sexto grado.

Casierra-Posada, Barreto y Fonseca (2004) propusieron modelos de regresión para medir el crecimiento de los frutos y ramas del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.], cv. Conservero) en una parcela localizada en Tanguavita, departamento de Boyacá, Colombia, con el objetivo de establecer las curvas de crecimiento de estos órganos. Las variables empleadas en el estudio fueron el peso fresco, peso seco y la proporción entre el diámetro polar y el diámetro de sutura de los frutos, así como el crecimiento de las ramas. Según los autores en todas las mediciones se encontraron una alta significancia estadística al nivel del 1% y coeficientes de determinación elevados.

Finalmente, existen además trabajos que han encontrado alta correlación entre el tamaño del fruto (estimado con los diámetros) y el peso de este (Dasilva-Linge et al., 2015). Asimismo, se han propuesto modelos relacionados con el comportamiento de los diámetros longitudinales y ecuatoriales del durazno tales como Silva et al. (2019) y Pinzón-Sandoval, Pineda-Ríos y Serrano-Cely et al. (2021), quienes utilizaron diversos modelos no lineales (Logístico, Gompertz y Weibull) para estudiar el comportamiento diametral en frutos del durazno.

Tabla 3.1

Estudios sobre modelos matemáticos para estimar el crecimiento vegetativo de plantas.

Modelos	Variables	Autores
Lineal logístico, exponencial, monomolecular, Michaelis-Menten	Longitud, tiempo, ancho promedio, volumen del fruto y del agua, peso fresco	Rojas-Lara et al. (2008)
Lineal múltiple	Ancho y largo de lámina de la hoja, diámetro y largo del pecíolo, índices de la lámina de la hoja y del pecíolo, área de la hoja, longitud y diámetro de las rama, área y peso seco de la lámina de la hoja, peso seco del pecíolo y los pesos secos del sistema radical, tronco, tallos y ramas.	Curiel-Rodríguez et al. (2007)

Modelos	Variabes	Autores
Polinomial, exponencial, sigmoidal	Peso, longitud y diámetro, grados de días calientes, horas solares.	Parra-Coronado, Fischer & Camacho-Tamayo (2016)
Lineal múltiple	Área, ancho, largo peso seco del limbo, eso seco del fruto diámetro longitudinal del fruto, altitud, número de yemas, volumen y longitud de la rama mixta, diámetro basal y medio de la rama, diámetro medio de la rama.	Quevedo, Cancino-Escalante & Barragán (2017)
Polinómicos	Índice de redondez, diámetro ecuatorial y longitudinal del fruto, peso seco del fruto longitud y diámetro de la rama, perímetro medio de la rama, número de hojas activas, ancho de la hoja, largo de la hoja, largo por ancho de la hoja y área de la hoja.	Quevedo & Zuleta (2020)
Lineal múltiple	Peso fresco, peso seco y la proporción entre el diámetro polar, diámetro de sutura de los frutos.	Casierra-Posada, Barreto & Fonseca (2004)
Múltiple QTL	Peso y tamaño del fruto, textura, color, longitud del pedúnculo, tipo y color de la color de las flores y porte del árbol.	DaSilva Linge et al. (2015)
Gompertz, Logístico, Doble Gompertz, Doble logístico	Masa de materia fresca	Silva et al. (2019)
Logístico, Gompertz, Weibull	Peso fresco, semilla, cáscara, pulpa y corteza	Pinzón-Sandoval, Pineda-Ríos & Serrano-Cely (2021)

Fuente: Elaboración propia.

Referencias

- Arias, D., Calvo, J. & Dohrenbusch, A. (2007). Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 247(1- 3), 185–193.
- Azam-Ali, S.N. & Squire, G.R. (2002). *Principles of Tropical Agronomy*. CABI Publishing, New York, USA. 245 p.
- Bradshaw, A. (2006). Unravelling phenotypic plasticity – why should we bother? *New Phytologist*, 170, 644–648.
- Cardona, A.C., Araméndiz, H.T & Barrera, C.C. (2009). Estimación del área foliar de papaya (*Carica papaya* L.) basada en muestreo no destructivo. Actualidad y *Divulgación Científica*, 12(1), 131-139.
- Casierra-Posada, F., Barreto, V. & Fonseca, O. (2004). Crecimiento de frutos y ramas de duraznero (*Prunus sp.* L. Batsch, cv. 'Conservero') en los altiplanos colombianos. *Agronomía Colombiana*, 22 (1), 40-45.
- Casierra, P.F., Peña, G. & Peña, J.E. (2008). Estimación indirecta del área foliar en *Fragaria vesca* L., *Physalis peruviana* L., *Acca sellowiana* (Berg.) Burret, *Rubus glaucus* L., *Passiflora mollisima* (Kunth). L.H. Bailey y *Ficus carica* L. Actualidad y *Divulgación Científica*, 11(1), 95-102.
- Curiel-Rodríguez, A., Espinoza-Espinoza, J. R., Cruz-Hernández, J. P. & Almaguer-Vargas, G. (2007). Modelos de regresión para estimar área de la hoja y biomasa de órganos en árboles jóvenes de manzano. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13, (2), 171-177.

- DaSilva- Linge, C., Bassi, D., Bianco, L., Pacheco, I., Pirona, R. & Rossini, L. (2015). Genetic dissection of fruit weight and size in an F2 peach (*Prunus persica* (L.) Batsch) progeny. *Molecular Breeding*, 35 (71), 1-19.
- Fourcaud, T, Zhang, X., Stokes, A., Lambers, H, & Korner, C. (2008). Plant Growth Modelling and Applications: The Increasing Importance of Plant Architecture in Growth Models. *Annals of Botany*, 101, 1053–1063.
- Galindo, J.R. & Clavijo J. (2007). Modelos alométricos para estimar el área de los folíolos de arveja (*Pisum sativum* L.). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 37-43.
- Gianoli, E. (2004). *Plasticidad fenotípica adaptativa en plantas*. En: Fisiología ecológica en plantas. Mecanismos y respuestas a estrés en los ecosistemas. Editor Hernán Marino Cabrera. Ediciones Universitarias de Valparaíso, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Hair, J., Anderson, R. & Tatham, R. (2001). *Análisis multivariante de datos*. Pearson Prentice Hall 1ª ed., 7ª imp. 832 p.
- Heiner, L. (2007). *Using crop models to develop production management tools for flower grower*. En: Memorias. II Congreso Colombiano de Horticultura. Colombia hortícola: retos y oportunidades. Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas. Bogotá D.C.
- Hernández, R. (2013). *Temas de análisis, estadístico multivariante. 2*. Ed. San José, C. R. Edit. UCR. 268 p.
- Hunt, R. (1982). *Plant Growth Curves. The functional Approach to Plant Growth Analysis*. Edward Arnold Publisher Ltd. London. 248 pp.
- Legros, S., Mialet-Serra, I., Caliman, J., Siregar, F., Clement-Vida, I A. & Dingkuhn, M. (2009). Phenology and growth adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to photoperiod and climate variability. *Annals of Botany*, 104, 1171–1182.

Growth, Respiration, and Temperature In: Handbook of Plant and Crop Physiology. Second Edition, Edited by Mohammad Pessarakis, 990 p.

- Rojas-Lara, P., Pérez-Grajales, M., Colinas-León, M., Sahagún-Castellanos, J. & Avitia-García, E. (2008). Modelos matemáticos para estimar el crecimiento del fruto de chile manzano (*Capsicum pubescens* R y P). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(3), 289-294.
- Ruiz, F., Murillo, B., García, J., Trayo, E., Palacios, A., Beltrán, A., Fenech, L., Zamora, S., Marrero, P., Nieto, A. & Cruz de la Paz, O. (2007). Mediciones lineales en la hoja para la estimación no destructiva del área foliar en albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1), 29-34.
- Silva, ÉM., Silva, VF., Fernandes, FA, Muniz, J.A. & Fernandes, TJ.. (2019). O crescimento de frutos de pêssegos caracterizados por modelos de regressão não lineares. *Sigmae* 8(2), 290–294.
- Thornley, JH. (1976). *Mathematical models in plant physiology*. Ed. Academic Press. England. 318 p. Citado por: Curiel, A., J.R. Espinoza, J.P. Cruz and G. Almaguer. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(2), 171-177, 2007.
- Wang, Z. & Zhang, L. (2012). Leaf shape alters the coefficients of leaf area estimation models for *Saussurea stoliczkae* in central Tibet. *Photosynthetica*, 50(3), 337-342.
- Yanez, E., Terrazas, T. & Mata, L. (2006). Integrated Analysis of Tropical Trees Growth: A Multivariate Approach. *Annals of Botany*, 98, 637–645.
- Yin, X., Struik, P. & Goudriaan, J. (2021). On the needs for combining physiological principles and mathematics to improve crop models. *Field Crops Research*, 271, 1-16.

Zea (2010). *Informe de Consultoría estadística sobre el Proyecto Desarrollo de un modelo en aspectos fisiológicos del duraznero (P. persica (L.) Batsch) para predecir el comportamiento del cultivo en la provincia de Pamplona, Norte de Santander*. 12 p.

CAPÍTULO IV

Modelos matemáticos para estimar el crecimiento vegetativo en durazno [*Prunus persica*(L.) Batsch.] variedad jarillo en tres fincas con diferentes altitudes en la provincia de Pamplona



CAPÍTULO IV

MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR EL CRECIMIENTO VEGETATIVO EN DURAZNO [*PRUNUS PERSICA* (L.) BATSCH.] VARIEDAD JARILLO EN TRES FINCAS CON DIFERENTES ALTITUDES EN LA PROVINCIA DE PAMPLONA

Introducción

La metodología clásica para medir el crecimiento vegetativo de las plantas es un método preciso, sin embargo, presenta limitaciones ya que, al tomar muestras de la planta, es posible que se dañe la estructura de ésta y se altere su capacidad para crecer y producir frutos o semillas. Asimismo, es considerado un proceso costoso en términos de tiempo y recursos una vez que requiere no solamente del corte, pero también del secado y pesado del material vegetal (Mónaco et al., 2015). Los métodos denominados no destructivos, por su parte, son herramientas valiosas para evaluar el estado de las plantas sin causar daño físico. Además de ser no invasivos, son eficientes y permiten un monitoreo constante y a gran escala de los cultivos. Esto es especialmente importante para las prácticas agrícolas sostenibles, ya que ayuda a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre cómo manejar sus cultivos de manera responsable y a preservar el medio ambiente (Limonés-Pérez & Contreras-Medina, 2019).

Es así como las ecuaciones matemáticas permiten la corrección de errores y la compensación por factores que pueden afectar la precisión de las mediciones, como la variabilidad ambiental y la interacción entre la luz y los cultivos. Al utilizar modelos matemáticos, los agricultores pueden obtener una representación precisa de la calidad y composición química de las plantas, lo que les permite optimizar su producción y mejorar la eficiencia de los recursos. En efecto, los modelos matemáticos son herramientas útiles para entender y predecir el comportamiento de los sistemas reales. Son una representación

simplificada de la realidad, basada en ecuaciones y cálculos matemáticos y son ampliamente empleadas en las mediciones del crecimiento de las plantas cultivadas (Cardona, Araméndiz & Barrera, 2009a).

En este sentido, se han desarrollado diversos modelos matemáticos que utilizan medidas lineales de la hoja como la longitud, el ancho, la longitud del pecíolo y el diámetro del pecíolo para predecir, por ejemplo, su área fotosintética. Estas medidas son fáciles de obtener y pueden ser utilizadas para comparar el crecimiento y desarrollo de diferentes especies o para monitorear la salud de una planta en particular (Cabezas-Gutiérrez et al., 2009; Cardona, Araméndiz & Barrera, 2009b).

En este aspecto la importancia económica del durazno para la región de Norte de Santander, Colombia, hace que sea necesario contribuir al desarrollo de su cultivo como un sistema eficiente de producción. Conociendo los factores que afectan el crecimiento, así como el desarrollo de la planta, se puede mejorar su manejo agronómico en cuestiones relacionadas con sus necesidades nutricionales, hídricas y de fertilización lo cual haría más competitivo el cultivo. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue construir modelos de regresión que permitan estimar el crecimiento vegetativo del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo en tres localidades con tres diferentes altitudes de la provincia de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Características biológicas y agronómicas del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo

El durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo

El durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo se adapta a ambientes agroecológicos tropicales desde 1.500 hasta 2.700 metros sobre el nivel del mar. Es una variedad obtenida a partir de la selección de plantas de semilla con características deseables y su posterior propagación por injertación (Pérez, 2007). El fruto es de pequeño tamaño, forma oblonga, redonda y ovalada de poca pubescencia con un peso total de aproximadamente 49,4 g. Su piel y pulpa son de color amarillo, la semilla es pequeña y redonda adherida a la pulpa. Sus hojas son planas, verde oscuras de 2-3 cm de ancho y de 7,5-15 cm de longitud; las flores son de color rosada a rojo con 5 pétalos y 5 sépalos, su tallo es de corteza lisa, color gris y el tronco es grueso de diámetro mediano (Figura 4.1) (Cancino-Escalante, Cancino & Quevedo, 2020).

Figura 4.1

Flor, Árbol y fruto del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Exigencias ecofisiológicas del cultivo de durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo

El cultivo de durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo, requiere de suelos profundos bien drenados, con un contenido adecuado de materia orgánica y no compacto para un óptimo desarrollo radicular. Asimismo, su pendiente debe ser máximo de 25%, su pH debe oscilar entre el 5,5 y 6,0 con niveles de nutrientes bien balanceados, lo más apropiado es el uso de fertilizantes simples tales como el fósforo, el nitrógeno y el potasio. Las plantas se desarrollan adecuadamente con una humedad relativa del 60 %, entre 700 y 1400 mm de precipitación anual y 1400 horas de sol anual promedio. La temperatura debe oscilar entre los 14°C y los 20 °C, y la altitud generalmente entre los 1400 y los 2.600 metros sobre el nivel del mar (Cancino-Escalante, Cancino & Quevedo, 2020).

El periodo más importante en cuanto a la demanda hídrica es en la etapa de premaduración del fruto; se obtiene una buena cosecha sólo si es posible mantener reservas hídricas superiores al 50% de la capacidad de campo. Por su parte, para la maduración y una mejor calidad del fruto es necesario al menos un 30% y un máximo de 70% de luz solar directa, así como una superficie foliar de 1,5 a 1,8 cm, lo cual equivale a un área entre 20 y 30m² para los árboles maduros y de 2 y 10 m² para los árboles jóvenes (Pérez, 2007).

Prácticas agronómicas en la producción del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo

Entre las principales prácticas agronómicas en la producción del durazno se destaca la producción forzada, una vez que en regiones de zonas tropicales y templadas no existe suficientes horas de baja temperatura, para que la planta detenga el periodo de reposo. En este sentido, la defoliación es importante en el manejo del cultivo por cuanto permite adelantar o atrasar la cosecha (Castro & Puentes, 2012). Para ello, se recomienda el uso del clorato de sodio ($\pm 0,5$ L. 200L) lo cual simula el periodo estacional de otoño, así como el sulfato de zinc mezclado con el oxiclورو de cobre, 5,5g L⁻¹, do (Fischer,

Casierra-Posada & Villamizar, 2010; Cancino-Escalante, Cancino & Quevedo, 2020).

Es de resaltar que la defoliación se efectúa manualmente una semana inmediatamente después de la aplicación, por ejemplo, del clorato de sodio y a los 15 días, se emplea la cianamida cuya finalidad es promover la brotación. Es recomendable un intervalo de 6 meses entre la defoliación y la cosecha y una vez la planta haya fructificado, se debe realizar un raleo con la finalidad de lograr frutos de mayor calidad (Aular, Casares & Sorrenti, 2010).

En este sentido, el raleo consiste en eliminar frutos indeseables evitando la pérdida de nutrientes y permitiendo de esta forma el buen desarrollo del árbol. El raleo, como la poda de formación realizada después de establecida la planta; la sanitaria cuyo propósito es retirar ramas enfermas o desprendidas y la verde con el objetivo de eliminar las ramas vigorosas y los chupones juegan un papel fundamental en el adecuado desarrollo de los árboles de durazno.

Por su parte, dos aspectos igualmente importantes en el manejo del cultivo son el control de malezas y la fertilización. En cuanto al control de malezas éste se puede realizar por medio de macheta, guadañadora y la utilización de herbicidas, mientras que la fertilización debe ser efectuada de forma equilibrada de acuerdo con la necesidad del suelo y los abonos recomendados son el potasio, el fósforo y el nitrógeno (Ávila et al., 2013).

Metodología

Área de estudio

El departamento Norte de Santander está compuesto por seis subáreas entre las cuales se destaca la provincia de Pamplona situada en la región suroccidente, integrada por seis municipios el cual comprende el 10,9 % del territorio del departamento (Figura 4.2). La población total de estos municipios es de aproximadamente 83.733 personas distribuidos entre las cabeceras municipales (73,4%) y zonas rurales (26,6%), siendo Pamplona (la capital de la provincia) con el mayor número de habitantes (66,12%) (DANE, 2017).

Figura 4.2
provincia de Pamplona, región suroccidente del Departamento Norte de Santander.



Fuente: https://www.familysearch.org/es/wiki/Suroccidente,_Norte_de_Santander,_Colombia_-_Genealog%C3%ADa, 2023.

La agricultura es una importante actividad económica de la provincia, con un total de 4898 unidades de producción agropecuaria caracterizada por pequeños minifundios y parcelas, en el cual Chitagá posee la mayor cantidad con el 44% y un área agrícola del 51,9%, respectivamente. Los cultivos agrícolas más importantes son la lechuga, el repollo, el apio, las arvejas y las zanahorias, así como la fresa, la mora, la curuba y el durazno (DANE, 2017).

Es de resaltar que esta región es la mayor productora de durazno en el departamento del Norte de Santander con el 95,7% de la producción, siendo los municipios de Cácuta (2440 ton), Chitagá (2392 ton) y Silos (1848 ton) los mayores productores, seguidos de Pamplonita (1695 ton) y Pamplona (533 ton) (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR, 2021). En este sentido, el estudio se centró en tres fincas productoras de durazno ubicadas en las veredas Chíchira, Batagá y Carrillo en los municipios de Pamplona, Pamplonita y Chitagá, ubicadas en los pisos térmicos frío (2000 – 3000 msnm) y templado (1000- 2000 msnm), como se observa en la Tabla 4.1.

El municipio de Pamplona se ubica a una altura de 2170 msnm. Limita con los municipios de Chitagá y Cácuta al sur, al oriente con Labateca, al occidente con Cucutilla y al norte con Pamplonita. Con relación al municipio de Pamplonita, el mismo posee una superficie de 176 km², altitud de 1886 msnm y se encuentra situado al sur con Labateca, suroccidente con Pamplona, nororiental con Toledo y al occidente con Cucutilla. Por su parte, Chitagá con una altitud de 2530 msnm y temperaturas que oscilan entre 12°C y 18°C limita al norte con Cácuta, Labateca y Pamplona, al sur con el departamento de Santander, al oriente con Toledo y el departamento de Boyacá y al occidente con Silos.

Tabla 4.1
Localización de las fincas

Municipio	Vereda	Finca	Altitud (msnm)	Coordenadas
Pamplona	Chíchira	Chíchira	2170	700 22'43,6" N 72037'41,1" W
Pamplonita	Batagá	Buenavista	1700	700 26'18,1" N 72038'9" W

Municipio	Vereda	Finca	Altitud (msnm)	Coordenadas
Chitagá	Carillo	El Recuerdo	1870	700 11'15" N 72039'7,3" W

Fuente: Elaboración propia.

Material vegetal

El material vegetal, como las hojas, ramas, flores y frutos del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo, fueron seleccionados en localidades con pendientes de hasta 25% con un manejo agronómico forzado en una zona altitudinal comprendida entre 1670 y 2170 metros sobre el nivel del mar. Se seleccionaron los cultivos en función de características similares como la edad de los árboles, el origen sexual, el estadio de desarrollo, el manejo forzado, el tipo de poda y raleo durante el ciclo productivo, en la fase fenológica número 7 (formación del fruto) de acuerdo con la escala BBCH. Asimismo, las parcelas estaban conformadas por árboles con una edad promedio de diez años, así como en plena producción agronómica, de acuerdo con las descripciones de Avilán et al. (2009) y Campos (2013).

Muestreo

De cada parcela se seleccionaron al azar 13 árboles; 3 ramas por árbol del tercio medio que se identificaron con cinta azul, así como 3 hojas y 3 frutos por árbol de apariencia similar en tamaño y color los cuales se marcaron con cinta amarilla. La estimación del crecimiento vegetativo se adelantó cada dos semanas. De las variables morfofisiológicas de la hoja, tallo y fruto, desde la cuarta semana luego de la floración de los árboles no injertados hasta la cosecha. Las variables se midieron a partir de los 47 DDD (días después del desarrollo del fruto) y para las mediciones se empleó un micrómetro.

Por su parte, para determinar el Índice de Área Foliar después de la defoliación, se seleccionó uno de los 13 árboles de cada parcela. Se tomó una muestra de tres hojas al azar las cuales fueron marcadas con cinta roja y se tomaron fotos cada 15 días para su posterior análisis mediante el uso del programa ImageJ. Asimismo, se midieron el ancho y el largo de las mismas hojas con un calibrador digital.

Índice de Área Foliar y materia seca del árbol

El Índice de Área Foliar (IAF) es una medida adimensional que indica la cantidad total de superficie foliar presente en un área determinada de suelo. Se expresa como un valor entero positivo y representa la capacidad de la estructura foliar para interceptar la radiación solar y realizar la fotosíntesis (Montaldi, 1995). Por su parte, el IAF óptimo de un cultivo es aquel que tolera la máxima tasa de incremento de la materia seca y se alcanza cuando el cultivo alcanza la plena radiación solar disponible, lo que significa que la planta está utilizando eficientemente la luz para la fotosíntesis (Gardner et al., 1985; Hunt, 1978).

Este índice relaciona el área foliar del cultivo con el área de terreno sobre el cual se encuentra, representa la correspondencia entre el área foliar o superficie fotosintetizadora y el área de suelo (AS) ocupada por el cultivo. El IAF puede variar ampliamente según la forma de la hoja y la distribución tanto vertical como horizontal de las hojas en el dosel o canopy y se calcula utilizando la fórmula de Watson descrita posteriormente por Hunt (1990):

$$IAF = \frac{\sum(\text{Área foliar } (m^2))}{\text{Área foliar del suelo } (m^2)}$$

Por su parte, la materia seca del árbol se estimó utilizando la ecuación propuesta por Quevedo (2011).

$$y = 506,155 + 3317,60PS - 7,29IAF$$

donde y se refiere a la materia seca del área foliar por árbol en gramos (g); PS al peso seco (g) de 30 hojas y AF el área foliar (cm^2) de 30 hojas.

Variables

La variable independiente en todos los modelos propuestos se refiere al periodo de tiempo transcurrido después de la defoliación (DDF) y las variables regresoras son las asociadas a la hoja, el fruto y el árbol cómo se observa en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2
Variables utilizadas en el estudio

Variables	Nomenclatura	Unidades
Largo del limbo	LL	Centímetros (cm)
Ancho del limbo	AL	Centímetros (cm)
Producto largo por el ancho del limbo	PLL	Centímetros (cm)
Área foliar del limbo	AFL	Centímetros cuadrados (cm ²)
Peso seco del limbo	PSL	Gramos (g)
Diámetro ecuatorial del fruto	DEF	Centímetros (cm)
Diámetro longitudinal del fruto	DLF	Centímetros (cm)
Peso seco del fruto	PSF	Gramos (g)
Índice de Área Foliar del árbol	IAF	-
Materia seca del árbol	MSA	Kilogramos (kg)

Fuente: Elaboración propia.

Modelos de regresión utilizados en el análisis de crecimiento

Una vez recolectado el material y efectuado los cálculos correspondientes se procedió a analizar el crecimiento vegetativo de la hoja, del fruto y del árbol de durazno variedad jarillo, empleando regresiones múltiples. Entre los diferentes modelos utilizados en el presente estudio se destacan el cúbico, el cuadrático, el inverso, el potencial y el sigmoidal.

Regresión cúbica

$$y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3$$

donde y es la variable dependiente, X es la variable independiente, y β_0 , β_1 , β_2 y β_3 son los coeficientes que se ajustan durante el proceso de regresión.

Regresión cuadrática

$$y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$$

donde y es la variable dependiente, X es la variable independiente y β_0 , β_1 , β_2 son los coeficientes que se determinan a partir de los datos de obtenidos.

Regresión sigmoial

$$y = \beta_0 + \left(\frac{1}{1 + e^{(-\beta_1 (X - \beta_2))}} \right)$$

donde y es la variable dependiente, X es la variable independiente, "e" es la constante matemática de Euler y β_0 , β_1 , β_2 coeficientes que se determinan a partir de los datos. β_0 es una constante aditiva, β_1 controla la pendiente de la curva sigmoial, y β_2 controla la posición en el eje x donde la curva sigmoial cambia de dirección.

Regresión potencial

$$y = \beta_0 X^{(\beta_1)}$$

donde y es la variable dependiente, X es la variable independiente, β_1 es el exponente y β_0 es la constante de ajuste que se determina durante el proceso de regresión.

Regresión inversa

$$y = \beta_0 + \frac{1}{X} \beta_1$$

donde y es la variable dependiente, X es la variable independiente y β_0 , β_1 coeficientes que se determinan a partir de los datos. β_0 es una constante aditiva y β_1 controla la pendiente de la relación inversa entre la variable independiente y la dependiente.

Validación de los modelos de regresión

La validación de los modelos es una parte fundamental en la modelización de datos y la toma de decisiones basada en ellos. Es importante verificar si los modelos cumplen con ciertos supuestos y si se ajustan adecuadamente a los datos. Los supuestos que se tomaron en cuenta para la modelización de los datos fueron: linealidad, independencia, normalidad y no colinealidad. A continuación, se amplían estos supuestos:

Prueba de linealidad

La linealidad se basa en el supuesto de que existe una relación entre las variables dependiente e independiente. En este sentido, si el coeficiente de determinación (R^2) de la regresión es mayor a 0,7 se acepta la condición de linealidad.

Prueba de independencia

Para verificar la independencia de los errores, es decir, la existencia de auto correlación en los residuos (errores) se aplicó la prueba de Durbin-Watson. Si el valor del estadístico se encuentra entre el intervalo de 1,5 y 2,5 se asume la no existencia de autocorrelación, por lo tanto, el supuesto de independencia se cumple.

Prueba de normalidad

El supuesto de normalidad se refiere a la idea de que una variable aleatoria sigue una distribución normal y para su detección se empleó la prueba Kolmogórov-Smirnov debido al número de datos (50). Si el valor p obtenido en la prueba es mayor que el nivel de significancia establecido ($p = 0,05$) se acepta la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

Prueba de no colinealidad

La colinealidad se refiere a una situación en la que dos o más variables explicativas en un modelo estadístico están altamente correlacionadas entre sí. Esto puede causar problemas en la interpretación de los coeficientes y en la estimación de los errores estándar, ya que puede hacer que los resultados sean imprecisos o incluso erróneos. No existen contrastes específicos que sean aplicables a su detección, sin embargo, se ha utilizado reglas prácticas como el cálculo del

factor inflacionario de la varianza (VIF). Por lo tanto, se recomienda que un VIF debe ser menor de 10.

Prueba de homocedasticidad

La prueba de homocedasticidad se realiza para verificar si los errores o residuos del modelo tiene varianza constante. Es un supuesto importante ya que su presencia garantiza que los resultados de las pruebas estadísticas sean válidos. En este sentido, el presente estudio utilizó el diagrama de dispersión de los valores ajustados contra los residuos estandarizados, por lo tanto, si la varianza de los residuos es constante, se espera observar un patrón aleatorio, sin ninguna tendencia clara.

Procesamiento estadístico

Para la estimación de las ecuaciones de los modelos propuestos y su posterior análisis se utilizó el paquete estadístico SPSS22. Dados los parámetros establecidos se seleccionaron los más adecuados modelos de regresión para cada variable analizada teniendo en cuenta el coeficiente de determinación, los niveles de significancia de los coeficientes y los supuestos de validación.

Resultados

Modelos de regresión para el análisis de crecimiento asociados a la hoja, fruto y el árbol

Se muestran las ecuaciones obtenidas para cada una de las variables propuestas en el presente estudio.

Estimación del largo del limbo

En la Tabla 4.3 se presentan los cuatro modelos que mejor se ajustaron a los datos con sus respectivas ecuaciones, para comprender el comportamiento del proceso de crecimiento de la variable largo del limbo para las tres fincas evaluadas. Los valores p asociados a los parámetros beta de todos los modelos fueron altamente significativos ($p < 0.05$) y los coeficientes de determinación (R^2) explican entre el 52% y 65%, la variabilidad observada del largo del limbo.

Por su parte, entre las cuatro ecuaciones evaluadas la ecuación sigmoideal (LL = 2,660 - 37,311DDF) fue la que presentó el mayor R^2 de 0,6. Sin embargo, al validarla mediante diferentes pruebas de diagnóstico, se encontró que cumple el supuesto de no-colinealidad ($VIF = 1 < 10$), pero no los supuestos de linealidad ($R^2 < 0,7$), independencia ($DW = 0,66 < 1,5$), normalidad ($p = 0,005 < 0,05$) y homocedasticidad (Figura 4.3) lo que hace que no sea eficiente. Cabe destacar que dicho modelo es fisiológicamente acertado una vez que se evidenció un incremento marcado del crecimiento de la hoja hasta los 120 días aproximadamente, seguido de una longitud constante o con muy poco incremento.

Tabla 4.3

Modelos de regresión para estimar el largo del limbo en las tres fincas.

Modelo	Ecuación	R^2	Valores p $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
Cúbica	$LL = -5,767 + 0,394DDF - 0,003*DDF^2 + (7,616*10^{-6}) DDF^3$	0,56	** , ** , ** , **
Cuadrática	$LL = 0,274 + 0,67DDF - 0,001DDF^2$	0,52	* , ** , **
Inversa	$LL = 12,815 - 270,862DDF$	0,65	** , **

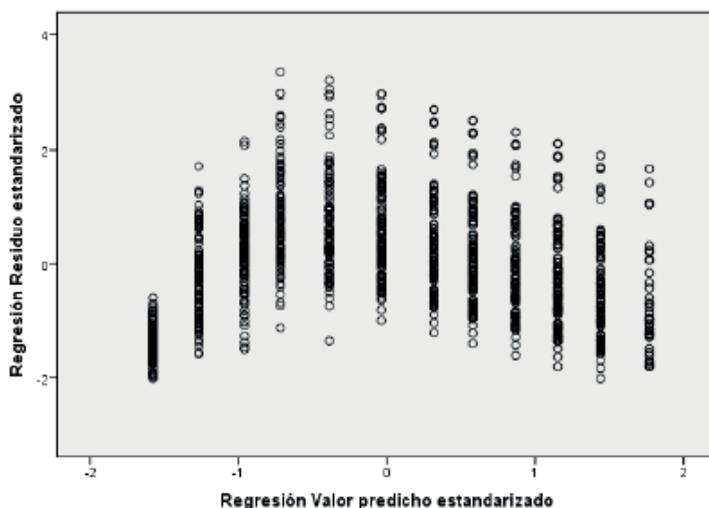
Modelo	Ecuación	R ²	Valores p $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
Sigmoidal	LL =2,660-37,311DDF	0,65	**,**

LL: largo del limbo (cm), DDF: días después de defoliación. NS: No significativo; **: Significativos con un p=0,001.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3

Diagrama de dispersión del modelo sigmoidal del largo del limbo.



Fuente: Elaboración propia.

Estimación del ancho del limbo

Para la estimación del ancho del limbo se emplearon las ecuaciones potencial, inversa, cúbica, así como sigmoidal (Tabla 4.4) y todas presentaron coeficientes significativos con probabilidades menores al 5%. Al igual que el análisis anterior la sigmoidal, cuya ecuación está dada por $AL=1,569-49,167DDF$, fue la que mejor explicó el comportamiento del crecimiento del ancho del limbo con respecto al periodo después de la defoliación, con un R₂ del 0,69. No obstante, al validar el modelo, los supuestos no se cumplieron en su totalidad en este caso ya que se incumplió, con excepción de la no-colinealidad con un

VIF igual a uno, los de independencia, ($DW = 0,66 < 1,5$), linealidad ($R^2 < 0,7$), homocedasticidad (Figura 4.4) y normalidad ($p = 0,003 < 0,05$). Se puede igualmente argüir que fisiológicamente, el modelo sigmoideal de crecimiento del limbo después de la defoliación es el más acertado, ya que se observa un marcado crecimiento entre los 120 y 130 días, seguido de un aumento constante o muy bajo.

Tabla 4.4

Modelos de regresión para estimar el ancho del limbo en las tres fincas.

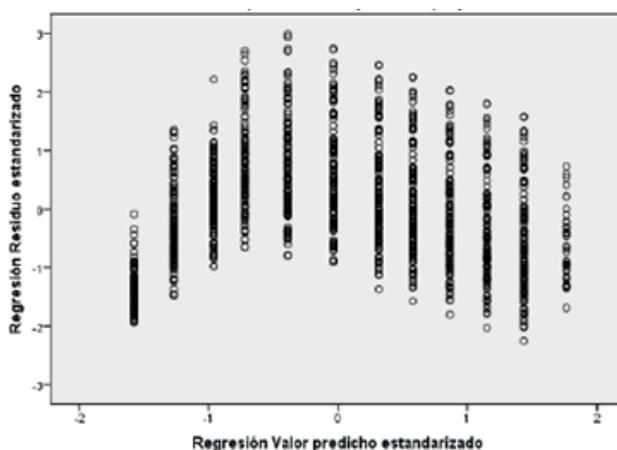
Modelo	Ecuación	R ²	Valores p $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
Cúbico	$AL = -2,5 + 0,136DDF - 0,001*DDF^2 + (2,63110 - 6)DDF^3$	0,60	** ** * * * *
Potencial	$AL = 0,155 + 0,624DDF$	0,56	** ** *
Inverso	$AL = 4,019 - 97,479DDF$	0,58	** ** *
Sigmoideal	$AL = 1,569 - 49,167DDF$	0,69	** ** *

AL: ancho del limbo (cm), DDF: días después de defoliación. NS: No significativo; ** Significativos con un $p=0,001$.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.4

Diagrama de dispersión del modelo sigmoideal del ancho del limbo.



Fuente: Elaboración propia.

Estimación del producto de largo por ancho del limbo

Se eligió el modelo sigmoideal para explicar el crecimiento del producto de largo por ancho del limbo (Tabla 4.5) ya que presentó un R cuadrado mayor (0,71) en comparación con el modelo potencial (0,57), además, el mismo explica una gran parte de la variabilidad en el producto de largo por ancho del limbo. La alta significancia de los coeficientes de los parámetros con niveles de $p=0,001$ indican que el modelo y las cuantificaciones son confiables para predecir el comportamiento del producto de largo por ancho del limbo en función del tiempo. La ecuación elegida fue la $PLA = 4,228-86,321DDF$ donde PLA es el producto de largo por ancho del limbo, la variable dependiente, y DDF es los días luego de defoliación, la variable independiente. Por su parte, los datos no cumplen con algunos supuestos importantes, incluyendo distribución normal ($p = 0,00 < 0,05$), independencia ($DW = 1,01 < 1,5$) y homocedasticidad (Figura 4.5). No obstante, se cumple el supuesto de linealidad ($R^2 > 0,7$) y no colinealidad ($VIF = 1 < 10$) lo cual significa que las variables independientes no están altamente correlacionadas entre sí.

El presente estudio es similar al realizado por Casierra et al. (2008) en el que también se enfocaron en evaluar métodos no destructivos para predecir la ecuación más confiable para calcular el área foliar en seis especies frutícolas (fresa, uchuva, feijoa, mora, curuba y brevo) cultivadas en Boyacá, Colombia. Los autores concluyeron que el uso del producto de la longitud por el ancho de la hoja fue efectivo para pronosticar el área foliar en las seis especies frutícolas evaluadas lo cual puede ser útil para mejorar la eficiencia en el monitoreo del crecimiento y desarrollo de las plantas y, por lo tanto, mejorar la producción agrícola.

Tabla 4.5

Modelos de regresión para estimar el producto del largo por ancho del limbo en las tres fincas.

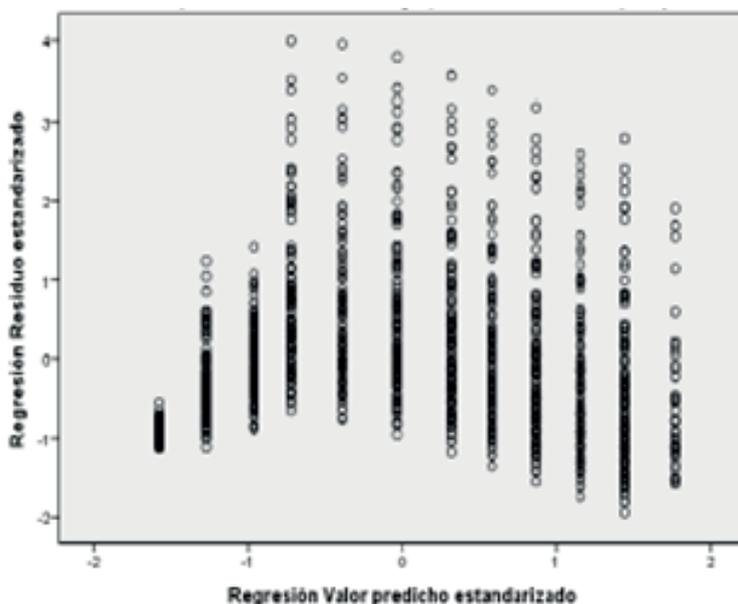
Modelo	Ecuación	R ²	Valores p $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
Potencial	$PLA = 0,166+1,093DDF$	0,57	** ** ,
Sigmoideal	$PLA = 4,228-86,321DDF$	0,71	** ** ,

PLA: producto de largo por ancho del limbo (cm), DDF: días después de defoliación. NS: No significativo; ** Significativos con un $p=0,001$.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.5

Diagrama de dispersión del modelo sigmoidal del producto del largo por ancho del limbo.



Fuente: Elaboración propia.

Estimación del área foliar del limbo

Según los resultados presentados en la Tabla 4.6, se determinó que el modelo que mejor se ajustó a las condiciones evaluadas fue el sigmoidal con un R^2 de 0,70. La ecuación para estas condiciones fue la $ALI = 3,740 - 70,868DDF$, donde ALI es el área del limbo foliar y DDF se refiere al número de días después de la defoliación. Por su parte, los resultados igualmente indican que los coeficientes presentaron alto nivel de significancia con un p-valor de 0,001. Esto sugiere que son estadísticamente significativos, sin embargo, no siguen una distribución normal ($p = 0,00 < 0,05$) y no cumplen con los supuestos de independencia ($DW = 1,01 < 1,5$) y homocedasticidad (Figura 4.6) lo cual puede afectar la validez del modelo, pero si cumple el supuesto de linealidad ($R_2 > 0,7$) y no colinealidad ($VIF = 1 < 10$).

Se destacan trabajos similares como el de Curiel et al. (2007), quienes concuerden con la idea de que el ancho y el largo de la lámina son variables importantes para estimar el área foliar de la hoja. Asimismo, como el de Valbuena et al (2016) en *Urocloa brizanta* en el que utilizaron el área del limbo como variable regresoras, obtenido un R² (0,67) muy similar al encontrado en este trabajo.

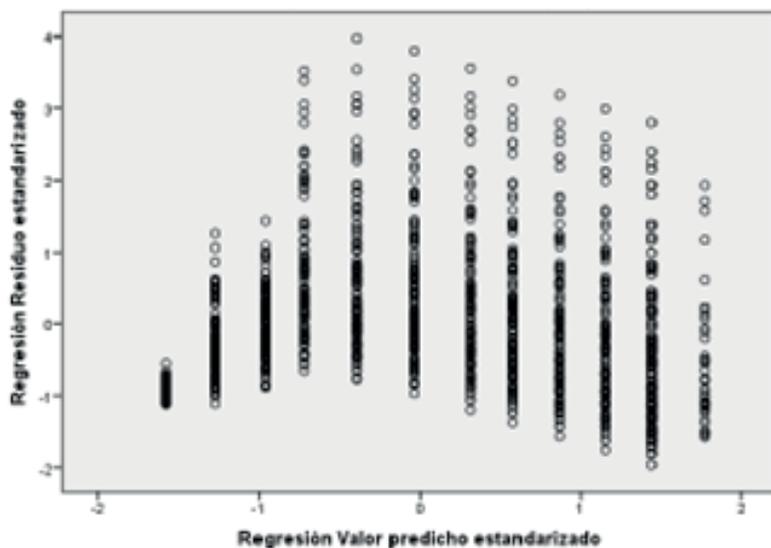
Tabla 4.6
Modelos de regresión para estimar el área del limbo en las tres fincas.

Modelo	Ecuación	R ²	Valores p $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
Potencial	ALI=0,286+0,908DDF	0,57	** ** ,
Sigmoidal	ALI=3,740-70,868DDF	0,72	** ** ,

ALI: área del limbo (cm²), DDF: días después de defoliación. NS: No significativo; ** Significativos con un p=0,001.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.6
Diagrama de dispersión del modelo sigmoidal del área del limbo.



Fuente: Elaboración propia.

Estimación del peso seco del limbo

La Tabla 4.7 indica que los cuatro modelos con el mayor coeficiente de determinación R cuadrado para explicar el peso seco del limbo son: inverso (0,50), cúbico (0,51), potencia (0,59) y sigmoidal (0,67). Sin embargo, entre estos el modelo sigmoidal fue el que mejor explicó la relación entre los días después de la defoliación y el peso seco del limbo, ya que presenta una alta significancia en nivel de $p=0,001$ y un buen ajuste en la ecuación $PSL=-1,035-55,463DDF$.

Con respecto a los resultados de la validación éstos indican que el modelo sigmoidal no cumple con los supuestos de distribución normal ($p = 0,00 < 0,05$), linealidad ($R^2 < 0,7$), independencia ($DW = 0,85 < 1,5$) y homocedasticidad (Figura 4.7), solo se cumple el supuesto de no colinealidad ($VIF = 1 < 10$). Sin embargo, desde un punto de vista agronómico, el modelo es acertado ya que considera que el peso seco del limbo depende de igual manera de los parámetros lineales como el largo y ancho, además de estar influenciado por el aumento en el área foliar.

Tabla 4.7

Modelos de regresión para estimar peso seco del limbo en las tres fincas.

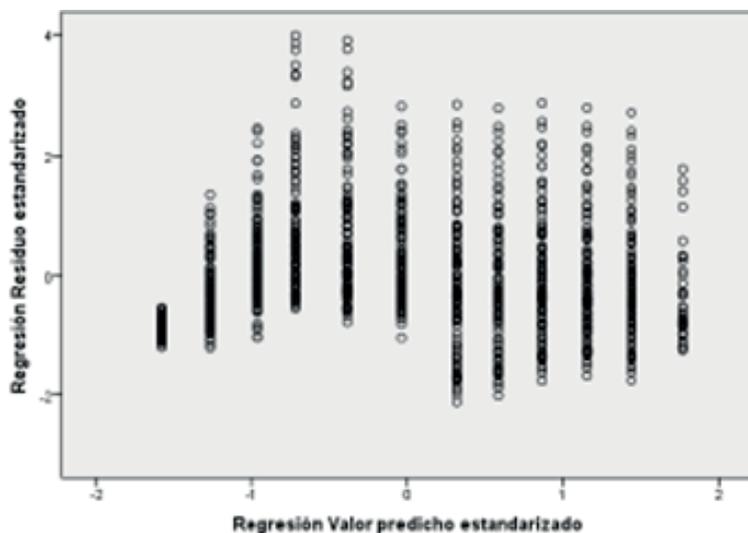
Modelo	Ecuación	R ²	Valores p $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
Cúbico	$PSL = -0,192 + 0,010DDF - (8,189 \times 10^{-5})DDF^2 + (2,260 \times 10^{-7})DDF^3$	0,51	** ** * * , , ,
Inverso	$PSL = 0,296 - 7,909DDF$	0,50	** ** ,
Potencial	$PSL = 0,007 + 0,731DDF$	0,59	** ** ,
Sigmoidal	$PSL = -1,035 - 55,463DDF$	0,67	** ** ,

PSL: peso seco del limbo, DDF: días después de defoliación. NS: No significativo;
** Significativos con un $p=0,001$.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.7

Diagrama de dispersión del modelo sigmoidal del peso seco del limbo.



Fuente: Elaboración propia.

Estimación del diámetro ecuatorial del fruto

La Tabla 4.8 muestra que los modelos más efectivos para explicar el comportamiento de la variable diámetro ecuatorial del fruto son el cúbico ($R^2 = 0,89,$), cuadrático (0,86) y el sigmoidal (0,85). Estos modelos tienen los valores más altos de R cuadrado, lo que indica que son los que mejor explican la relación entre la variable diámetro ecuatorial del fruto y el periodo de tiempo después de defoliación. Se seleccionó el modelo de regresión cúbico ($DE = -1,613 + 0,112 DDF - 0,001 DDF^2 + (3,028 \cdot 10^{-6}) DDF^3$) como el mejor para explicar el diámetro ecuatorial del fruto debido a que presentó el mejor ajuste y una alta significancia según los coeficientes del modelo con un nivel de $p = 0,001$. Sin embargo, al validar los supuestos del modelo de regresión cúbico se puede afirmar que los datos cumplen con el supuesto de linealidad ($R^2 > 0,70$) y de no colinealidad ($VIF = 1 < 10$), pero no cumplen con los de normalidad ($p = 0,025 < 0,05$) independencia ($DW = 0,84 < 1$) ni homocedasticidad (Figura 4.8).

Es de resaltar, que el modelo de regresión cúbico elegido es un reflejo apropiado de la fisiología del fruto, el cual se divide en dos fases: la primera, corresponde al proceso de diferenciación celular, mientras que la segunda fase corresponde al endurecimiento del hueso del fruto.

Tabla 4.8

Modelos de regresión para estimar el diámetro ecuatorial del fruto en las tres fincas.

Modelo	Ecuación	R ²	Valores p β ₀ , β ₁ , β ₂ , β ₃
Cúbico	DE = -1,613 + 0,112DDF - 0,001DDF ² + (3,028 * 10 ⁻⁶)DDF ³	0,89	***, **, **, **
Cuadrático	DE = 0,788 + 0,022DDF + (1,79 * 10 ⁻⁵)DDF ²	0,86	***, **, **
Sigmoidal	DE = 1,841 - 59,364DDF	0,85	**, **

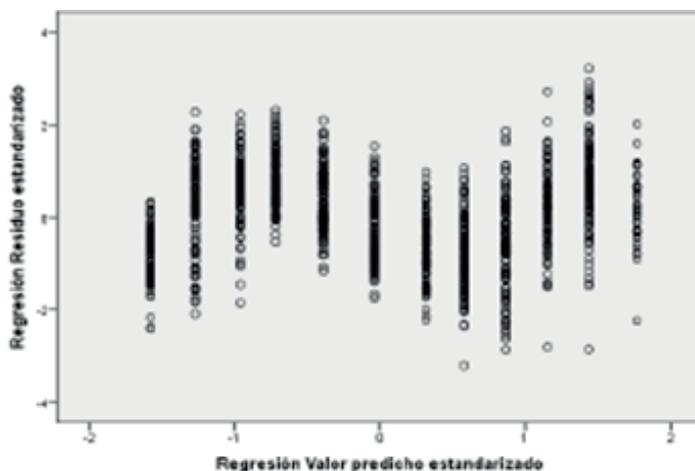
DE: diámetro ecuatorial del fruto (cm), DDF: días después de defoliación.

NS: No significativo; ** Significativos con un p=0,001.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.8

Diagrama de dispersión del modelo cubico del diámetro ecuatorial del fruto.



Fuente: Elaboración propia.

Estimación del diámetro longitudinal

Para la estimación del diámetro longitudinal los dos modelos con los mejores resultados fueron el cúbico y el cuadrático (Tabla 4.9). Sin embargo, se seleccionó el modelo de regresión cúbico para explicar el diámetro longitudinal del fruto debido a que presentó un mejor ajuste y mayor significancia en términos de coeficientes del modelo, con un nivel de $p = 0,001$. Además, el modelo cúbico es coherente con la fisiología del fruto ya que su crecimiento no es lineal, sino que presenta una curva doble, marcado por dos periodos de rápido aumento y una fase de crecimiento suspendido. Por su parte, los datos no cumplen con algunos supuestos importantes, incluyendo distribución normal ($p = 0,03 < 0,05$), independencia ($DW = 0,71 < 1,5$) y homocedasticidad (Figura 4.9). No obstante, se cumple el supuesto de linealidad ($R^2 > 0,7$) y no colinealidad ($VIF = 1 < 10$), lo cual significa que las variables independientes no están altamente correlacionadas entre sí.

Tabla 4.9

Modelos de regresión para estimar diámetro longitudinal del fruto en las tres fincas.

Modelo	Ecuación	R ²	Valores p $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
Cúbico	$DL = -0,949 + 0,113DDF - 0,001 * DDF^2 + (2,602 * 10^{-6})DDF^3$	0,81	** ** , ** ** , ,
Cuadrático	$DL = 1,115 + 0,035DDF - (7,282 * 10^{-5})DDF^2$	0,78	** ** , ** ** ,

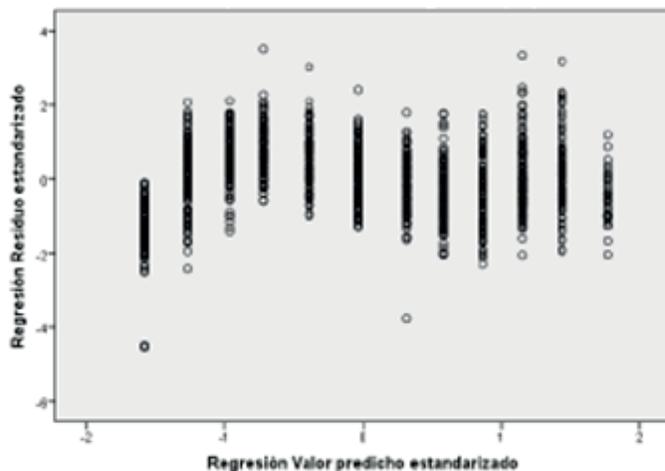
DL: diámetro longitudinal del fruto (cm), DDF: días después de defoliación.

NS: No significativo; ** Significativos con un $p=0,001$.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.9

Diagrama de dispersión del modelo cubico del diámetro longitudinal del fruto.



Fuente: Elaboración propia.

Estimación del peso seco del fruto

Los resultados indican que el peso seco del fruto se ajustó tanto a un modelo cúbico, cuadrático como a un modelo sigmoideal, con un R cuadrado mayor a 0,85 lo que significa que dichos modelos explican como mínimo el 85% de la variabilidad en el peso seco del fruto. Los coeficientes de los modelos presentados en la tabla 4.10 son altamente significativos, ya que se encuentran en el nivel $p=0,001$. Esto significa que hay una probabilidad baja de que los resultados obtenidos sean debidos al azar, por lo tanto, son estadísticamente significativos y se pueden utilizar para predecir el peso seco del fruto en función del tiempo después de la defoliación. De estos modelos el que mejor se ajustó a los datos fue el cúbico que viene dado por la ecuación $PSF=-0,946+0,069DDF-0,001*DDF^2+(1,782*10^{-6}) DDF^3$. Al validarlos el mismo presentó no colinealidad ($VIF = 1 < 10$), sin embargo, no cumplió con los demás supuestos como la independencia ($DW = 0,85 < 1,5$), normalidad ($p= 0,034 < 0,05$) y la homocedasticidad (Figura 4.10) los cuales son necesarios para garantizar que los resultados del modelo sean precisos y confiables.

Tabla 4.10

Modelos de regresión para estimar el peso seco del fruto en las tres fincas.

Modelo	Ecuación	R ²	Valores p β ₀ , β ₁ , β ₂ , β ₃
Cúbico	PSF=-0,946+0,069DDF-0,001DDF ² +(1,782*10 ⁻⁶) DDF ³	0,85	***,***,***,***
Cuadrático	PSF=0,467+0,016DDF+(3,039*10 ⁻⁶) DDF ²	0,85	***,***,***
Sigmoidal	PSF=1,432-59,102DDF	0,85	***,***

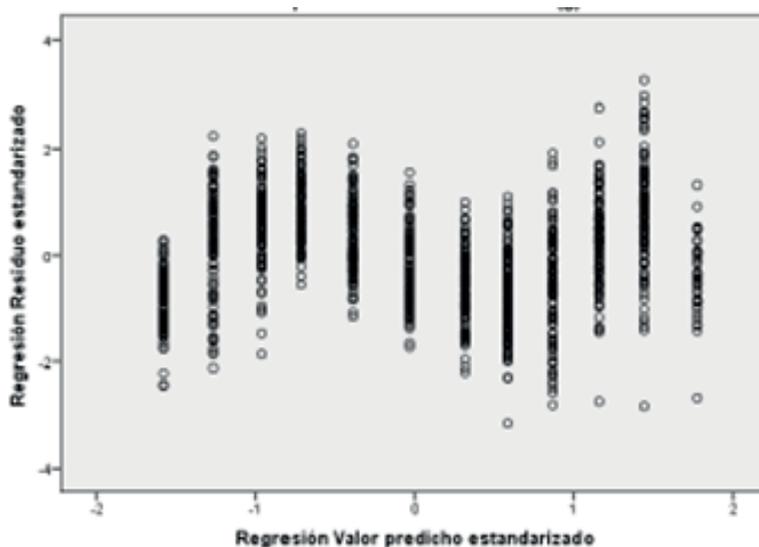
PSF: peso seco del fruto (g), DDF: días después de defoliación.

NS: No significativo; ** Significativos con un p=0,001.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.10

Diagrama de dispersión del modelo cubico del peso seco del fruto.



Fuente: Elaboración propia.

Estimación del Índice de Área Foliar

Para determinar el Índice de Área Foliar utilizando ecuaciones matemáticas se consideraron varios modelos, incluyendo el inverso, el cúbico, el potencial y el sigmoideal (Tabla 4.11). Entre ellos, el sigmoideal presentó el mayor ajuste con un R cuadrado de 0,69. Los resultados de los coeficientes estimados de todos los modelos son altamente significativos en un nivel de $p=0,001$, y la ecuación que mejor describe el modelo es $IAF = 2,243 - 49,261DDF$, donde la variable independiente es el "días después de la defoliación" (DDF). Se emplearon los supuestos necesarios para el modelo lineal y se determinó que los datos no presentan una distribución normal ($p = 0,00 < 0,05$) no son independientes ($DW = 0,34 < 1,5$) ni lineales ($R^2 < 0,70$) y no se ajustan a la homocedasticidad (Figura 4.11), sin embargo, se cumplen con el supuesto de no colinealidad ($VIF = 1 < 10$).

Tabla 4.11

Modelos de regresión para estimar el Índice de Área Foliar del árbol en las tres fincas.

Modelo	Ecuación	R ²	Valores p $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
Potencial	$IAF = 0,260 + 0,658DDF$	0,62	** **, ,
Inverso	$IAF = 8,053 - 203,749DDF$	0,61	** **, ,
Cúbico	$IAF = -3,897 + 0,234DDF - 0,002DDF^2 + (5 \cdot 10^{-6}) DDF^3$	0,62	** **, ** **, **, **, , , ,
Sigmoideal	$IAF = 2,243 - 49,261DDF$	0,69	** **, ,

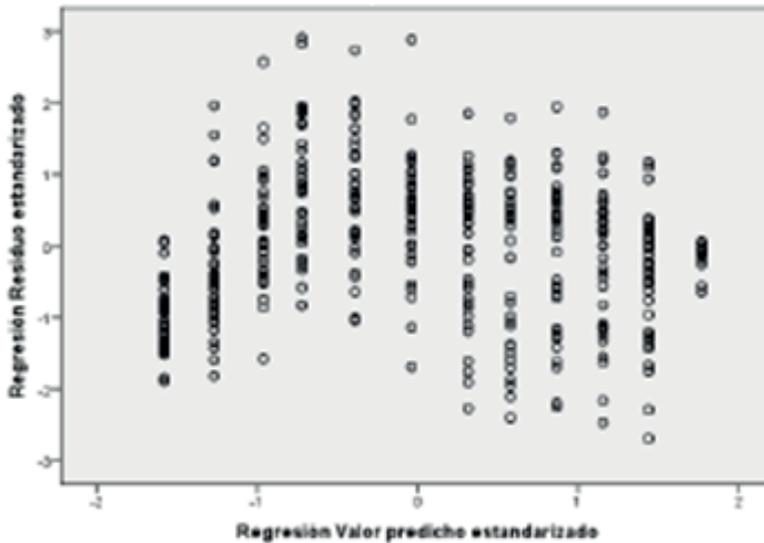
IAF: Índice de Área Foliar del árbol, DDF: días después de defoliación.

NS: No significativo; ** Significativos con un $p=0,001$.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.11

Diagrama de dispersión del modelo sigmoidal del Índice de Área Foliar del árbol.



Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar, que en las plantas la fotosíntesis es la principal fuente de alimento y energía y se produce principalmente en las hojas. Los productos de la fotosíntesis como los carbohidratos son transportados a otras partes de la planta como los frutos y las raíces, donde se utilizan para el crecimiento y el mantenimiento de la misma. Cuando la hoja se aproxima a su tamaño máximo, se produce una alta tasa de fotosíntesis y una producción masiva de carbohidratos. Esto se debe a que una mayor superficie foliar significa más cloroplastos y más capacidad para realizar la fotosíntesis. Por su parte, la síntesis de clorofila precede al establecimiento de la fijación fotosintética del carbono por un período que varía desde horas hasta días. (Gardner et al.,1985).

La apariencia y anatomía de las hojas de las plantas reflejan su capacidad para el intercambio gaseoso y la absorción de la radiación solar. La forma y el tamaño de las hojas pueden variar según la especie, así

como el entorno y están adaptados para maximizar la eficiencia de la fotosíntesis. El tamaño del área foliar de las plantas es importante no solo para la generación de carbohidratos, sino también para la regulación de la transpiración. En este sentido, la absorción de luz incidente sobre un cultivo está relacionado con el tamaño de su superficie foliar. En efecto, Hunt (1978) y Gardner et al. (1985) afirman que la eficiencia fotosintética de un cultivo depende principalmente de su IAF y que este a su vez depende de la densidad de población.

La mayoría de los cultivos en su plenitud absorben el 80 % de la radiación incidente con un IAF entre 4 y 5. A su vez, los cultivos de durazno pueden interceptar hasta el 85 % de la luz incidente, aunque con distintos valores de IAF. En el caso de la presente investigación los cultivos en su plenitud presentaron un IAF promedio de 4,2; caso contrario en las plantas jóvenes con valores de 2,94, lo cual se debe probablemente a que estas plantas no lograron su máximo potencial de acumulación de materia seca del cultivo.

Estimación de la materia seca del árbol

Para estimar la variable materia seca del árbol se evaluaron varios modelos, incluyendo, cúbico, inverso y sigmoideal (Tabla 4.12). Entre ellos, el modelo cúbico presentó el mejor ajuste con un R cuadrado de 0,62. La ecuación que describe el modelo es $MSA = -12,561 + 0,726D - DF - 0,006DDF^2 + (1,688 \times 10^{-5}) DDF^3$ en donde se observa que los coeficientes estimados son altamente significativos en un nivel de $p = 0,001$, sin embargo, los datos no se distribuyen de manera normal ($p = 0,00 < 0,05$), no presenta homocedasticidad (Figura 4.12) ni independencia ($DW = 0,38 < 1,5$) pero cumple con el supuesto de no colinealidad ($VIF = 1 < 10$).

Es posible que la falta de normalidad en los datos se deba a la naturaleza de las variables y a los errores que pueden ocurrir al tomar datos en el campo. La normalidad es un supuesto común en muchos modelos estadísticos y cuando los datos no siguen una distribución normal, puede afectar la validez del modelo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la falta de normalidad no necesariamente invalida un modelo o su capacidad para hacer predicciones precisas.

Tabla 4.12

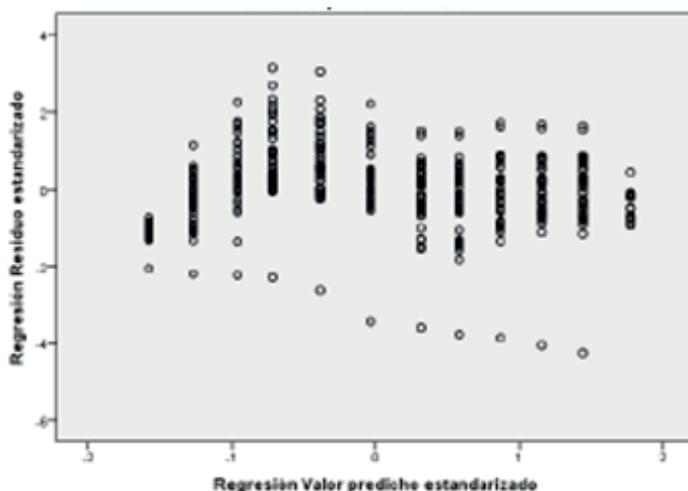
Modelos de regresión para estimar la materia seca del árbol en las tres fincas.

Modelo	Ecuación	R ²	Valores p β ₀ , β ₁ , β ₂ , β ₃
Cúbico	MSA=-12,561+0,726DDF-0,006D- DF ² +(1,688*10 ⁻⁵)DDF ³	0,62	** ** * * * * *
Inverso	MSA=22,619-576,117*DDF	0,61	** ** *
Sigmoidal	MSA=3,271-49,726*DDF	0,61	** ** *

MSA: Materia seca del árbol (kg), DDF: días después de defoliación,
 NS: No significativo; ** Significativos con un p=0,001.
 Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.12

Diagrama de dispersión del modelo cúbico de la materia seca del árbol.



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los modelos no destructivos poseen ventajas ya que permiten la medición *in vivo* de plantas, los costos asociados a equipos y recursos humanos para la medición del crecimiento vegetativo se reduce sustancialmente, los cálculos pueden realizarse rápidamente y con gran precisión y son herramientas sencillas y precisas para estudios fisiológicos relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas.

En el presente estudio los modelos matemáticos que mejor describieron el crecimiento del durazno [*Prunus persica* (L.) Batsch.] variedad jarillo, sin realizar muestreos destructivos fueron el de regresión no-lineal sigmoideal y cúbico, descartando los demás modelos cuadrático, inverso y potencial, pues fueron los que presentaron los mejores coeficientes de determinación, estimadores altamente significativos ($p = 0,001$) y cumplieron con uno o dos supuestos de validación (no-colinealidad y linealidad).

Igualmente, se observó que el crecimiento del fruto del durazno sigue un patrón de tendencia doble sigmoidea lo que experimenta dos períodos de aceleración, seguidos por un período de crecimiento más lento. Por su parte, la hoja exhibió un crecimiento aproximadamente hasta los 120 DDF y posteriormente, suspendió su crecimiento con el fin de no generar una competencia con el desarrollo del fruto.

Es de resaltar que los estadios fenológicos son un indicador clave del crecimiento y el desarrollo de las plantas, y pueden ser utilizados para informar la planificación de prácticas agronómicas en el cultivo de durazno. El conocimiento preciso de los estadios fenológicos puede ayudar a los productores a determinar el momento óptimo para la poda, el riego, la nutrición y el manejo de las malezas, lo que a su vez puede mejorar la calidad y la cantidad de la cosecha.

Recomendaciones

Se recomienda que las prácticas agronómicas sean ajustadas en función de las características específicas de cada sitio de evaluación. Cada sitio tiene sus propios requerimientos en cuanto a factores como la luz, el agua, la nutrición y las condiciones climáticas y es importante tener en cuenta estos requerimientos para garantizar el éxito de la cosecha. Además, el hecho de que los sitios de evaluación puedan tener alturas diferentes significa que las épocas de crecimiento y madurez pueden ser distintas, lo que a su vez puede requerir ajustes.

Se recomienda la continuación de estudios similares ya que es crucial para mejorar la comprensión del cultivo y para identificar las mejores prácticas. Al evaluar más localidades, se pueden determinar las características específicas de cada lugar y ajustar las prácticas agronómicas para optimizar la producción y mejorar la calidad de los frutos.

Se recomienda realizar estudios en localidades de mayor influencia del cultivo ya que es una práctica importante para obtener resultados relevantes y útiles en la producción agrícola. Esto permitirá evaluar las condiciones, así como los desafíos específicos que afectan el crecimiento y la producción. Asimismo, se deben identificar las mejores prácticas y técnicas para aumentar la producción y la calidad del cultivo en cada localidad para reducir los riesgos y mejorar el rendimiento.

Referencias

- Aular, J., Casares M. & Sorrenti G. (2010). La peschicultura in Venezuela, Cenerentola sudamericana. *Frutticoltura*, (7/8),52-55.
- Ávila, C. & Robles, A., Pinzón, S., Miranda, D. & Fischer, G. (2013). Tecnologías locales para los sistemas de producción de frutales caducifolios en zonas productoras de Colombia y sus limitantes tecnológicas. En: Fischer y Carranza (Eds), *Los frutales caducifolios en Colombia: Situación actual, sistemas de cultivo y plan de desarrollo* (115-150). Bogotá, D.C.: Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas- SCCH.
- Avilán, I., Soto, E.; Pérez, M, Marín, C., Rodríguez, M. & Ruiz, J. (2009). Comportamiento fenológico de la raza antillana de aguacate en la región centro-norte costera de Venezuela. *Agronomía Tropical*, 59(1), 5-14.
- Cabezas-Gutiérrez, M., Peña, F., Duarte, H., Colorado, F. & Silva, R. (2009). Un modelo para la estimación de área foliar en tres especies forestales de forma no destructiva. *Revista U.D.C.A.*, 12(1),121-131.
- Campos, T. (2013). Capítulo 4: Especies y variedades de hoja caduca en Colombia. In: Miranda, D.; Fischer, G.; Carranza, C. *Los frutales caducifolios en Colombia - situación actual, sistemas de cultivo y plan de desarrollo*, Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas, Bogotá. p.47-64.
- Cancino-Escalante G., Cancino, S. & Quevedo, E. (2020). *El cultivo del durazno (P. persica (L.) Batsch) en la subregión suroccidental del departamento de Norte de Santander*. (Primera Ed). Pamplona - Norte de Santander: Universidad de Pamplona.

- Cardona, C., Araméndiz, H. & Barrera, C. (2009a). Modelo para Estimación de Área Foliar en Berenjena (*Solanum melongena* L). basado en Muestreo no Destructivo. *Temas Agrarios*, 14(2), 1-17.
- Cardona, C., Araméndiz, H. & Barrera, C. (2009b). Estimación del área foliar de papaya (*Carica papaya* L) basada en muestreo no destructivo. *Revista U.D.CA.* 12(1):131-139
- Casierra, F., Peña, Z., Ricardo, G., & Peña J. (2008). Estimación indirecta del área foliar en *Fragaria vesca* L., *Physalis peruviana* L., *Acca sellowiana* (Berg.) Burret, *Rubus glaucus* L., *Passiflora mollissima* (Kunth) L. H. Bailey y *Ficus carica* L. *Revista U.D.C.A.*, 11(1), 95–102.
- Castro, A. & Puentes, G. (2012). *Ciruelo y duraznero (Prunus salicina Lindl.) - (Prunus persica (L.) Batsch.)*. En: Fischer, G. (ed). *Manual para el Cultivo de Frutales en el Trópico*. Ed. Produmedios, Bogotá, p.370-392.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2017). Encuesta nacional agropecuaria (ENA-2016). Boletín Técnico. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>.
- Fischer, G., Casierra-Posada, F. & Villamizar, C. (2010). Producción forzada de duraznero (*Prunus persica* (L.) Batsch) en el altiplano tropical de Boyacá (Colombia). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 4(1),19-32.
- Gardner, F., Pearce, R. B. & Mitchell. R. L. (1985). *Physiology of crop Plants*. Iowa State University Press; AMES; 327 pp.
- Hunt, R. (1978). *Plant growth analysis*. Edward Arnold London. 67 pp.
- Hunt, R. (1990). *Basic growth analysis. Plant growth analysis for beginners*. Unwyn - Hyman. London, 112 pp.
- Limones Pérez, L., & Contreras Medina, L. M. (2019). Métodos destructivos y no destructivos para la estimación de atributos internos y externos de calidad y madurez de un fruto -una

revisión. *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, 2(3), 110–126.

- MADR Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales-EVA 2007 - 2019*. Bogotá, Colombia. URL: [https://www.agronet.gov.co/Lists/Boletin/Attachments/3930/Base%20Agr%C3%ADcola%20EVA%202007-2019%20\(P\)_12_02_2020%20\(1\).xlsb](https://www.agronet.gov.co/Lists/Boletin/Attachments/3930/Base%20Agr%C3%ADcola%20EVA%202007-2019%20(P)_12_02_2020%20(1).xlsb). (acceso 20 de junio de 2021).
- Mónaco, N., Rosa, M. J., Santa, V. Aufrán, V. & Heguiabehere, A. (2015). Utilización de estimadores para determinación de biomasa a campo. *European Scientific Journal*, 11(33), 296-310.
- Montaldi, E.R. (1995). *Principios de Fisiología Vegetal*. Ediciones Sur, Buenos Aires
- Pérez, S. (2007). *Duraznero: Ecofisiología, mejoramiento genético y manual para su cultivo. Unidad de investigación tecnológica sistema-producto durazno*. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de ciencias químicas. Querétaro, México. 102 p.
- Quevedo, E. (2011). Desarrollo de un modelo en aspectos fisiológicos del duraznero (*Prunus persica* (L.) Batsch) para predecir el comportamiento del cultivo en la provincia de Pamplona, Norte de Santander. Sexto informe proyecto IV 1352. Contrato no.200714757-502-858/2007 derivado del convenio No. 057/07 IICA-MADR. 655 p.
- Valbuena, N., Parraga, C., Linares, L., Ramos J. & Junco, J. (2016). Modelos de estimación de área foliar a partir de observaciones morfológicas en *Brachiaria brizantha* cv. Toledo. *Revista Unellez Ciencia y Tecnología*, 34, 40-44.

Enrique Quevedo García, PhD

Experto en Ingeniería Agronómica en el Departamento de Agronomía de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Pamplona. Posee una amplia experiencia y conocimientos adquiridos durante su carrera, la cual incluyen un pregrado en Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá, una Maestría en Ciencias Agrarias en el área de Fisiología de Cultivos de la misma universidad y un Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo con un énfasis en sistemas de producción agrícola de la Universidad Nacional de Costa Rica, el Instituto Tecnológico de Costa Rica y la Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica. Esta formación académica lo convierte en experto en áreas como la producción agrícola, el manejo de suelos, la fisiología de los cultivos y los sistemas de producción agrícola, entre otros. Además, su rol como profesor titular le ha permitido guiar y enseñar a los estudiantes de pregrado y posgrado en estos temas.

Alba Milena Pacheco Villamizar

Ingeniera agrónoma graduada en la Universidad de Pamplona. Actualmente trabaja con el Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena). Durante su carrera universitaria, se enfocó en la evaluación de la relación entre el crecimiento del área foliar y del fruto del duraznero [*Prunus persica* (L.) Batsch.] de la variedad jarillo durante un ciclo de producción en la provincia de Pamplona, tema que fue abordado en su trabajo de grado. Con su formación en Ingeniería Agrónoma, posee una base de conocimientos en áreas como la producción agrícola, el manejo de suelos y cultivos, así como en técnicas y metodologías para la evaluación y análisis de estos.

Giovanni Orlando Cancino Escalante, Ph.D

Docente titular en el Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad de Pamplona. Posee una amplia experiencia y conocimientos adquiridos durante su carrera, la cual incluye un pregrado en Biología de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá, Colombia y un Doctorado en Ciencias con énfasis en Biotecnología Vegetal de la Universidad de Nottingham en Nottingham, Inglaterra.

Su formación académica lo convierte en un experto en áreas como la biología, la biotecnología vegetal y la genética, entre otros. Además, su rol como profesor titular le ha permitido enseñar y guiar a los estudiantes de pregrado y posgrado en estas áreas y contribuir al avance de la investigación en su campo de especialización.

