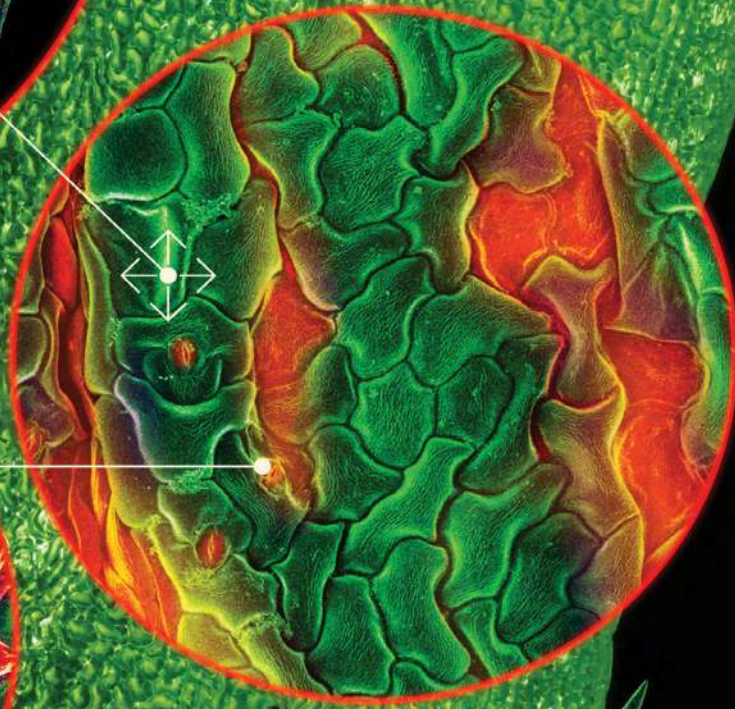
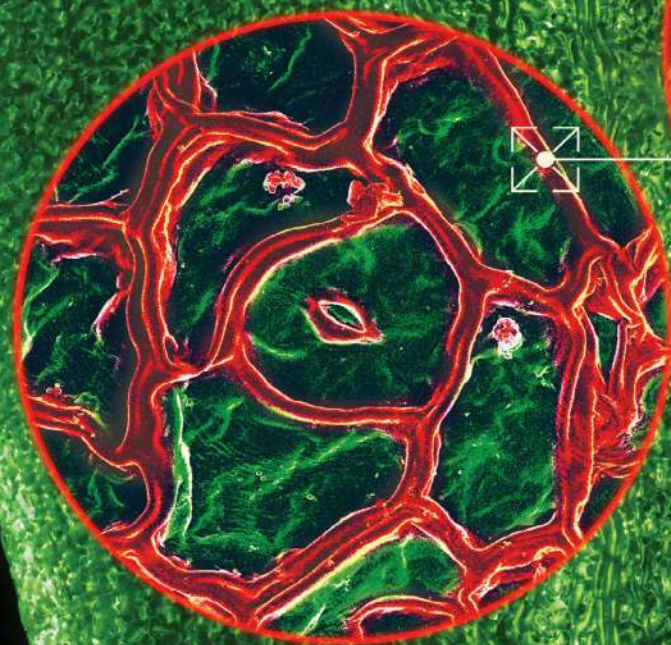
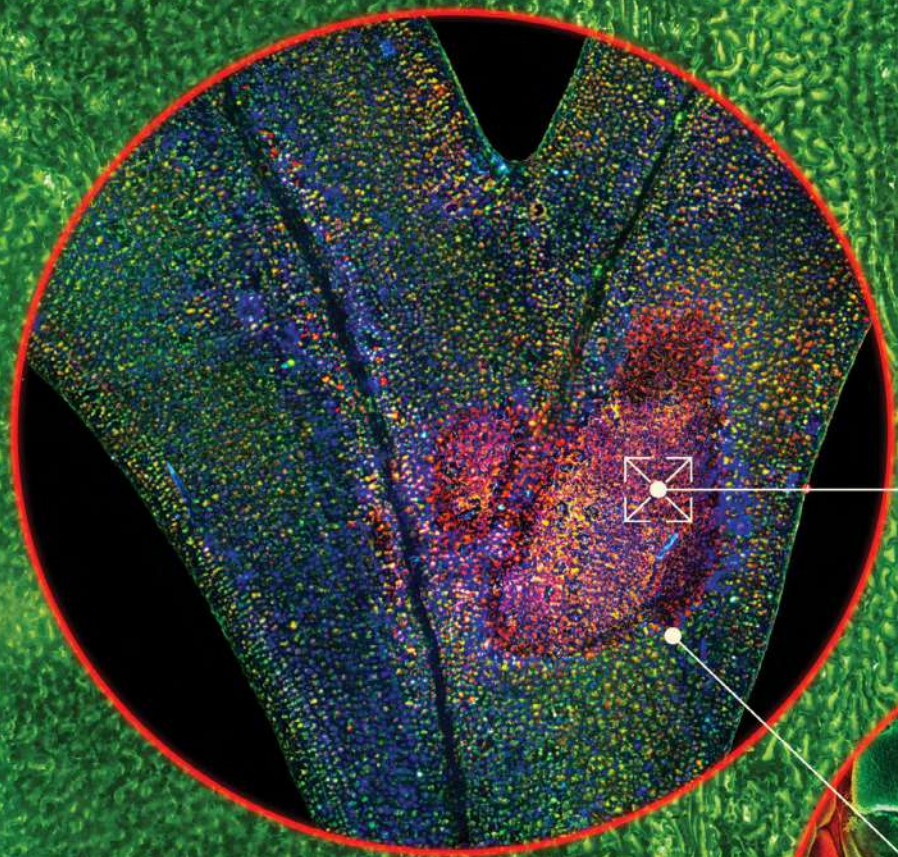
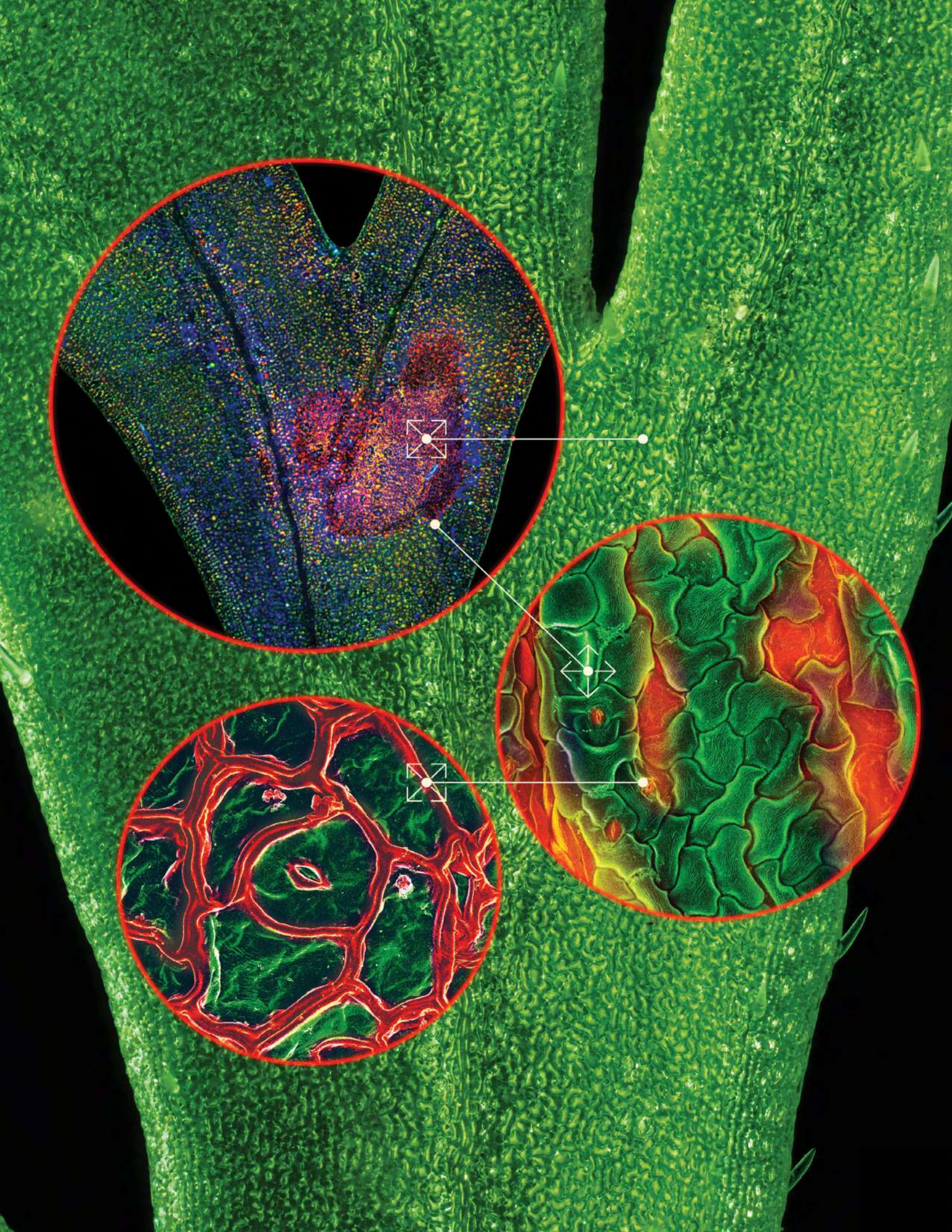
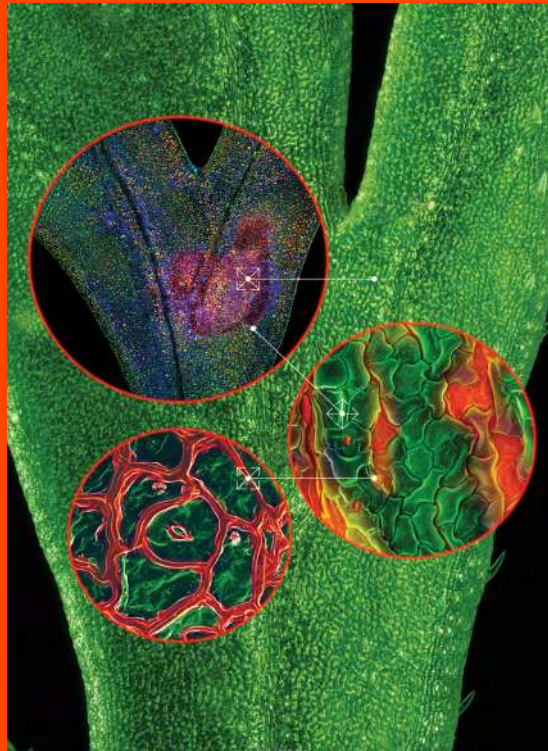






Título

Geometría
de la vida

Técnica

La obra está compuesta por tres técnicas de captura de imagen: T1: microscopía de luz reflejada en 4X, detalle de la venación de una hoja con agrupamiento de 18 fotos; T2: microscopía de fluorescencia por procesamiento Thunder de Leica, agrupando 540 fotos de 30 micras de profundidad; T3: microscopía de barrido con agrupación de imágenes del detector de electrones secundarios y del detector de electrones retrodispersados.

Autoría

Alejandro Moscoso Rojas
Nydia Yadira Arias Morales
Juan Camilo Orozco Cardona
Juan Camilo Henao-Rojas
Paola Andrea Hormaza Martínez

Descripción

Lámina foliar de la hoja de zanahoria, donde se observan las nervaduras en relieve en el fondo de la foto principal y en el borde de la hoja se observan los tricomas. En los círculos se observan las células

de la epidermis con los estomas, que evoca el proceso de fotosíntesis. Colores propios del tejido en T1, propios de la autofluorescencia en T2 y colorización digital en T3.

Capítulo VII

Fisiología de la zanahoria (*Daucus carota* L.) en las condiciones ecológicas del Bosque Húmedo Montano Bajo de Colombia

Ángela María Castaño Marín
Lucas Esteban Cano Gallego
Jaime Darío Posada Rúa
Cristian Domínguez Pulgarín
Carolina Zuluaga Mejía

Luz Mary Quintero Vásquez
Jaison Martínez Saldarriaga
Carolina Ortiz Muñoz
Germán Franco
Paola Andrea Hormaza

Introducción

La fisiología vegetal estudia los procesos vitales que permiten a las plantas crecer, desarrollarse y adaptarse a su entorno. Entre estos procesos se encuentran la fotosíntesis, mediante la cual las plantas capturan la energía lumínica y la convierten en compuestos orgánicos a partir de sustancias inorgánicas (Ortuño et al., 2015); la respiración, que permite liberar energía almacenada; la transpiración, crucial para el balance hídrico y térmico, y el transporte de agua, minerales y fotoasimilados, elementos fundamentales para el metabolismo y el crecimiento. Estos mecanismos también regulan aspectos clave como la morfogénesis, la diferenciación celular

y la producción de estructuras reproductivas y comerciales, como la raíz engrosada en el caso de la zanahoria. De otro lado, la fenología vegetal es el estudio del tiempo y la secuencia de acontecimientos críticos en el ciclo de vida de las plantas, tales como la emergencia, la expansión de las hojas, el engrosamiento de órganos de almacenamiento y la madurez fisiológica, y su relación con condiciones ambientales y climáticas. Esta disciplina considera los rangos temporales y las transiciones entre estados de crecimiento y reproducción, y es una herramienta que ayuda a entender y predecir la interacción entre el desarrollo de las plantas



y factores como temperatura, fotoperiodo y disponibilidad de agua y nutrientes (Cleland & Wolkovich, 2024). La fenología proporciona una base cuantitativa que facilita la sincronización de prácticas agronómicas, como la fertilización, el riego y la cosecha, con los momentos en que las plantas son más receptivas o vulnerables.

Este capítulo está diseñado para proporcionar a productores de zanahoria, técnicos de campo e ingenieros agrónomos y otros agentes de la cadena productiva una base para el manejo óptimo del cultivo, maximizando su potencial productivo a través del entendimiento de su ecofisiología y fenología.

Crecimiento y desarrollo de la zanahoria

En el Oriente antioqueño se concentra una parte significativa de la producción de zanahoria del departamento de Antioquia. Entre los híbridos más comúnmente utilizados en esta región se destacan Extremo F1, Belgrado, Olimpo, Nirvana, Brilliance y Bangor (Quintero & Franco, 2023). Este último ha adquirido especial relevancia en los sistemas productivos locales, posicionándose como uno de los materiales modales gracias a su desempeño agronómico y adaptación a las condiciones agroecológicas de la zona.

Dado este contexto, un material de tipo Berlicum fue seleccionado como base para el estudio ecofisiológico y morfoagronómico desarrollado en 2023 bajo las condiciones típicas

de clima y suelo del Bosque Húmedo Montano Bajo colombiano. Esta investigación se realizó en el Centro de Investigación La Selva de AGROSAVIA, ubicado en el municipio de Rionegro, Antioquia. Los suelos de esta región presentan características edáficas particulares: son formados a partir de rocas ígneas con influencias de mantos de cenizas volcánicas, lo que les confiere una textura media a liviana, buena porosidad, capacidad de infiltración y una notable retención de humedad. Tienen un pH ácido a fuertemente ácido, alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), considerable fijación de fósforo, presencia de aluminio libre en niveles elevados y un contenido significativo de nitrógeno total (Fernández & Santa, 1964).

Estas condiciones edafoclimáticas del Oriente antioqueño constituyen un entorno ideal para evaluar el comportamiento agronómico y fisiológico del cultivo de zanahoria, ya que permiten una visible caracterización de sus fases fenológicas y su respuesta a los factores ambientales.

En cuanto al crecimiento, la acumulación de biomasa en la planta del material de zanahoria evaluado desde la emergencia hasta la cosecha está representada por una curva de tipo logístico que refleja la desaceleración del crecimiento a medida que las plantas se acercan a su máximo tamaño (Castaño-Marín et al., 2026). Esta desaceleración en la tasa de crecimiento se debe principalmente a limitaciones genéticas inherentes al cultivar, que determinan el potencial máximo de crecimiento y acumulación de biomasa bajo condiciones dadas. Los factores genéticos actúan como una restricción interna que regula la expansión celular, la capacidad fotosintética y el alargamiento de órganos, incluso en presencia de condiciones ambientales



óptimas. Estudios con modelos de crecimiento longitudinal han demostrado que parámetros de crecimiento ajustados mediante funciones logísticas o sigmoideas son específicos del genotipo, lo que evidencia que la genética controla tanto la tasa como el patrón temporal de

acumulación de biomasa (Moreira et al., 2020). La figura 7.1 describe la evolución, y el modelo resultante se utiliza para simular el incremento en biomasa total de la planta en función de los días después de siembra (DDS), en línea con lo reportado por Castaño-Marín et al. (2026).

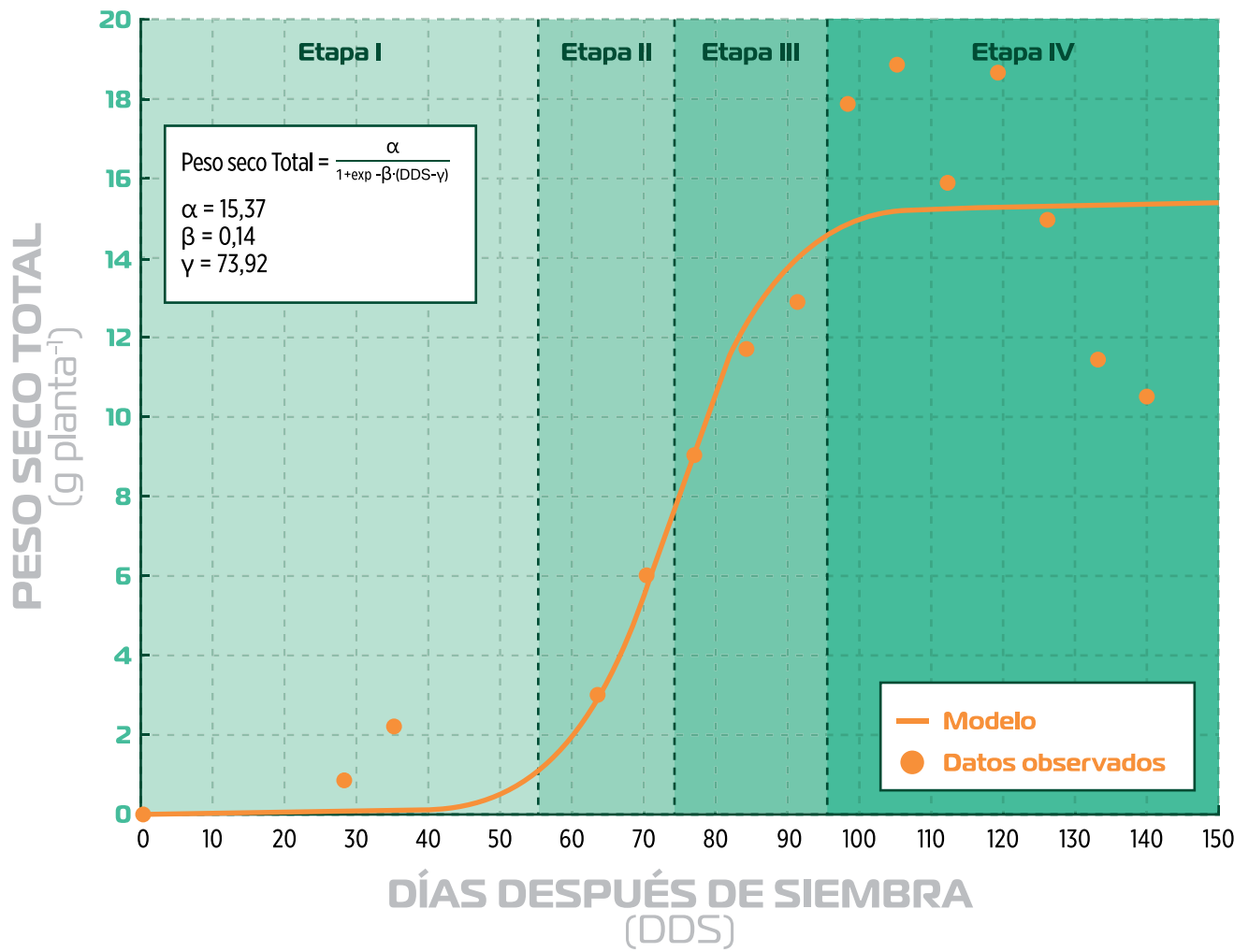


Figura 7.1. Dinámica del crecimiento total de la planta del material de zanahoria tipo Berlicum bajo las condiciones de clima y suelo del C. I. La Selva (Rionegro, Antioquia). Etapas fenológicas.

Fuente: Elaboración propia



La evolución del crecimiento de la zanahoria mostrado en figura 7.1 conduce al ajuste de un modelo de crecimiento representado por la ecuación 7.1:

$$PS = 1 + \exp(-\beta \cdot (DDS - \gamma)) \alpha$$

Ecuación 7.1

En donde, *PS* es el peso seco total de la planta, α (alfa) representa el peso seco máximo teórico que la planta puede alcanzar (en este caso $\alpha = 15,37$ g/planta a los 95 DDS), β (beta) es la tasa de crecimiento relativo de la planta ($\beta = 0,14$), γ (gamma) es el punto de inflexión de la curva, donde el crecimen-

to cambia de acelerado a desacelerado ($\gamma = 73,92$), y DDS (días después de la siembra) es el tiempo transcurrido desde la siembra hasta la fecha de la cosecha. Se identificaron cuatro etapas fenológicas de la zanahoria de acuerdo con la ecuación 7.1, las cuales se describen a continuación:

Etapa I: esta es la fase de establecimiento, donde el crecimiento es inicialmente lento. La planta está desarrollando su sistema de raíces y acumulando recursos para el crecimiento futuro. Para el Oriente antioqueño, esta etapa se observa desde la siembra hasta aproximadamente 55 DDS.

Etapa II: se evidencia crecimiento acelerado y la planta comienza a desarrollar su biomasa vegetativa. La curva empieza a ascender más rápidamente, lo que indica una tasa de crecimiento incrementada. Esta etapa se sitúa entre los 55 y los 74 DDS.

Etapa III: el crecimiento sigue siendo rápido y es aquí donde se alcanza el punto de inflexión (γ). La planta está en pleno desarrollo, comenzando a formar el órgano de interés comercial, la raíz de la zanahoria. Inicia desde aproximadamente 74 DDS hasta cerca de 95 DDS.

Etapa IV: finalmente, el crecimiento se estabiliza y la curva se aplan, lo que indica que la planta ha alcanzado un estado de madurez fisiológico y el incremento del peso seco se desacelera y finalmente se detiene. La figura 7.1 muestra que esta etapa comienza alrededor de los 95 DDS y finaliza hacia los 140 DDS.



**CAROTA
360°**

Modelo integral para el desarrollo de
la cadena de valor de zanahoria en el
Oriente departamento de Antioquia

Crecimiento y desarrollo de la raíz

Como se puede observar en la figura 7.2, el crecimiento de la raíz sigue la misma dinámica que la planta en su totalidad (parte aérea y raíces). El modelo matemático de la figura 7.2 muestra que el peso seco aumenta lentamente durante las dos primeras etapas de desarrollo, acelera durante la tercera etapa y luego se estabiliza a medida que alcanza el peso seco máximo teóri-

co de raíz ($\alpha = 12,17$ g/planta); el 95 % del peso máximo teórico de la raíz se alcanza a los 105 DDS. Esta forma del crecimiento es típica para muchos órganos de almacenamiento en las plantas y sumamente importante en zanahoria, dado que permite conocer el punto máximo de acumulación de biomasa en la raíz y posterior tiempo de cosecha.

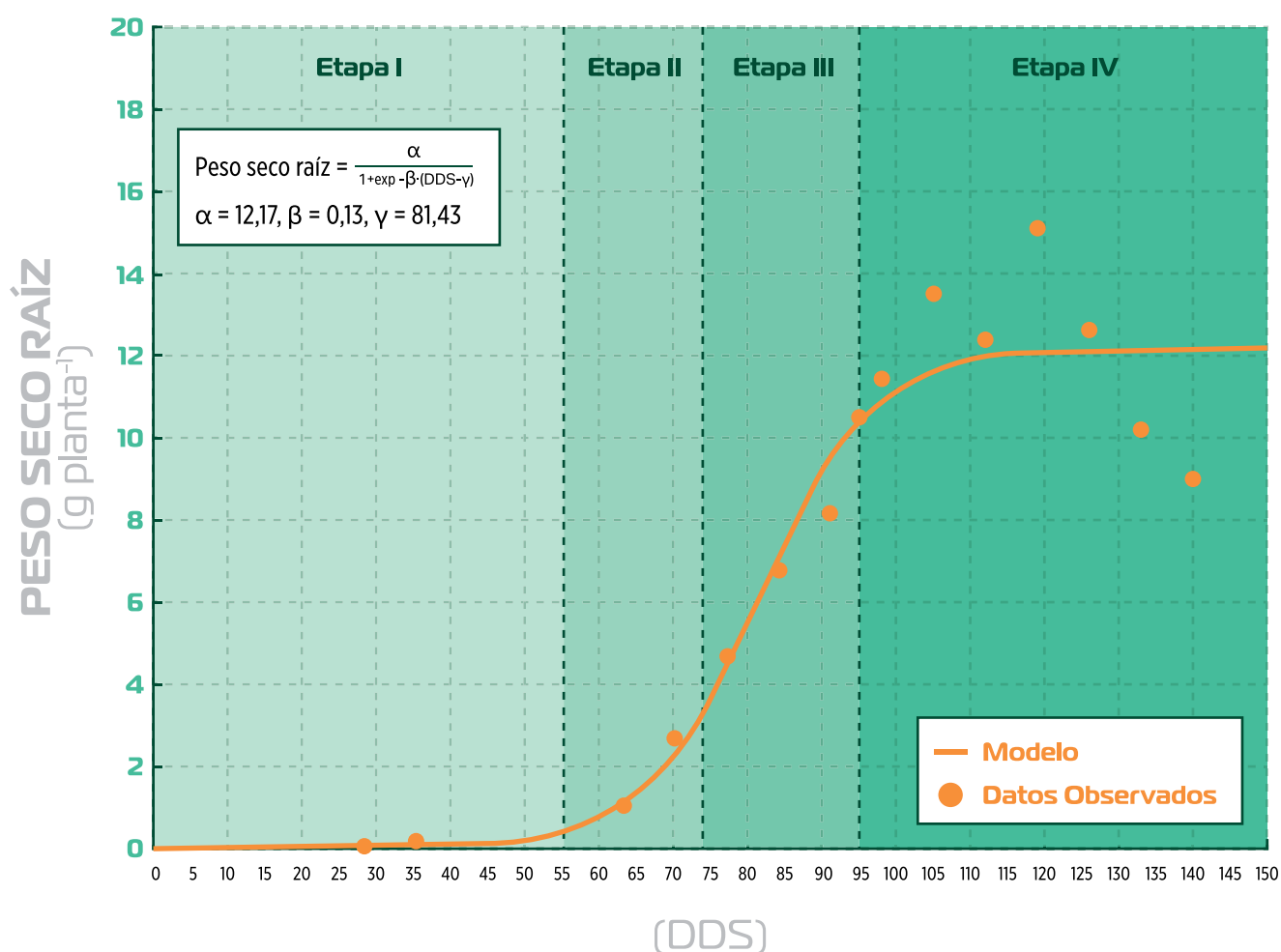


Figura 7.2. Comportamiento del crecimiento y desarrollo de la raíz del material tipo Berlicum para la región Rionegro (Antioquia), Bosque Montano Bajo de Colombia, en cada una de las etapas fenológicas de la planta.

Fuente: Elaboración propia

Crecimiento y desarrollo de la parte aérea

La figura 7.3 ilustra el incremento y posterior declive del peso seco de la parte aérea, siguiendo una dinámica de crecimiento asimétrica. Inicialmente, se observa una fase de crecimiento lento, seguida de una etapa de aumento más rápido que alcanza un máximo y luego una fase de disminución en la biomasa aérea. Este patrón asimétrico es consistente con la variación observada en características de crecimiento de la parte aérea del cultivo de zanahoria, donde

rasgos como cobertura del dosel y altura del follaje alcanzan un pico y luego se estabilizan o desaceleran a medida que los recursos se redistribuyen hacia otros órganos o el crecimiento global se modera (Loarca et al., 2024). El modelo logístico estima un peso seco máximo teórico de biomasa aérea de $\alpha = 5,53$ g/planta, cuyo 95 % se alcanza a los 87 DDS, con una tasa relativa de crecimiento $\beta = 0,00082$, y un punto de inflexión $\gamma = 95,06$ DDS.

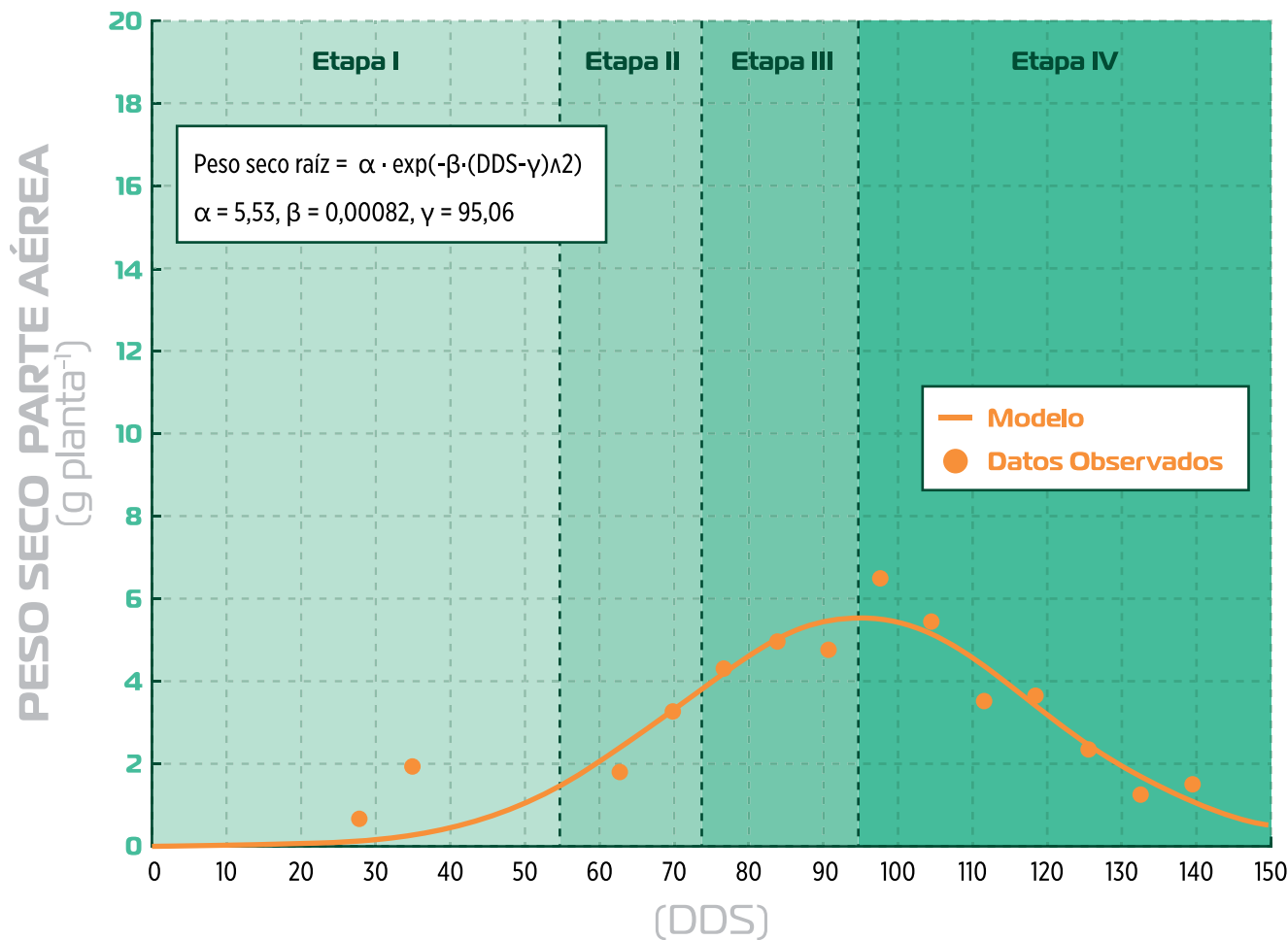


Figura 7.3. Comportamiento del crecimiento y desarrollo del follaje del material tipo Berlicum para la región Rionegro (Antioquia), Bosque Montano Bajo de Colombia, en cada una de las etapas fenológicas de la planta.

Fuente: Elaboración propia





Relación del desarrollo entre la parte aérea y la raíz

La relación entre la parte aérea y la raíz es dinámica a lo largo del ciclo de crecimiento. La figura 7.4 muestra la evolución de la tasa de crecimiento (g día^{-1}) de la parte aérea, la raíz y el total de biomasa de zanahoria durante su ciclo fenológico, en función de los días después de siembra (DDS). Se distinguen claramente las cuatro etapas del desarrollo del cultivo.

Durante la etapa I (hasta ~55 DDS), tanto la raíz como la parte aérea presentan tasas de crecimiento bajas y similares, reflejo de una fase de establecimiento, donde la planta prioriza la formación del sistema radical y de las primeras hojas funcionales. En la etapa II (~55 a 75 DDS), se observa un incremento acelerado en la tasa de crecimiento de la parte aérea, que alcanza su punto máximo cercano a los 75 DDS. Este comportamiento es concordante con el crecimiento vegetativo activo, cuando la planta amplía su superficie fotosintética para generar mayor cantidad de fotoasimilados. Durante esta etapa comienza a intensificarse la traslocación de nutrientes hacia la raíz, lo que explica el aumento progresivo en su tasa de crecimiento.

En la etapa III (~75 a 100 DDS), la tasa de crecimiento de la parte aérea comienza a declinar, mientras que la raíz alcanza su máximo crecimiento (~85 DDS). Este cambio señala el inicio de una fase de redistribución de recursos, donde los fotoasimilados producidos por el follaje se translocan de manera preferencial hacia la raíz, órgano de almacenamiento. La disminución en la tasa de crecimiento aérea también refleja procesos de senescencia parcial y gasto energético en mantenimiento estructural. Finalmente, en la etapa IV (>100 DDS), las tasas de crecimiento de ambas estructuras disminuyen notablemente. Esto indica que el cultivo ha alcanzado su fase de madurez fisiológica, con una raíz plenamente desarrollada (125 a 130 DDS) y un follaje que ha culminado su función fisiológica. Las tasas cercanas a cero en esta etapa sugieren un tránsito hacia un estado de latencia metabólica, típico previo a la floración, aunque este proceso no ocurre en condiciones de día corto intertropicales como las del Oriente antioqueño, donde la zanahoria no entra en fase reproductiva a campo abierto (Paredes, 2021).

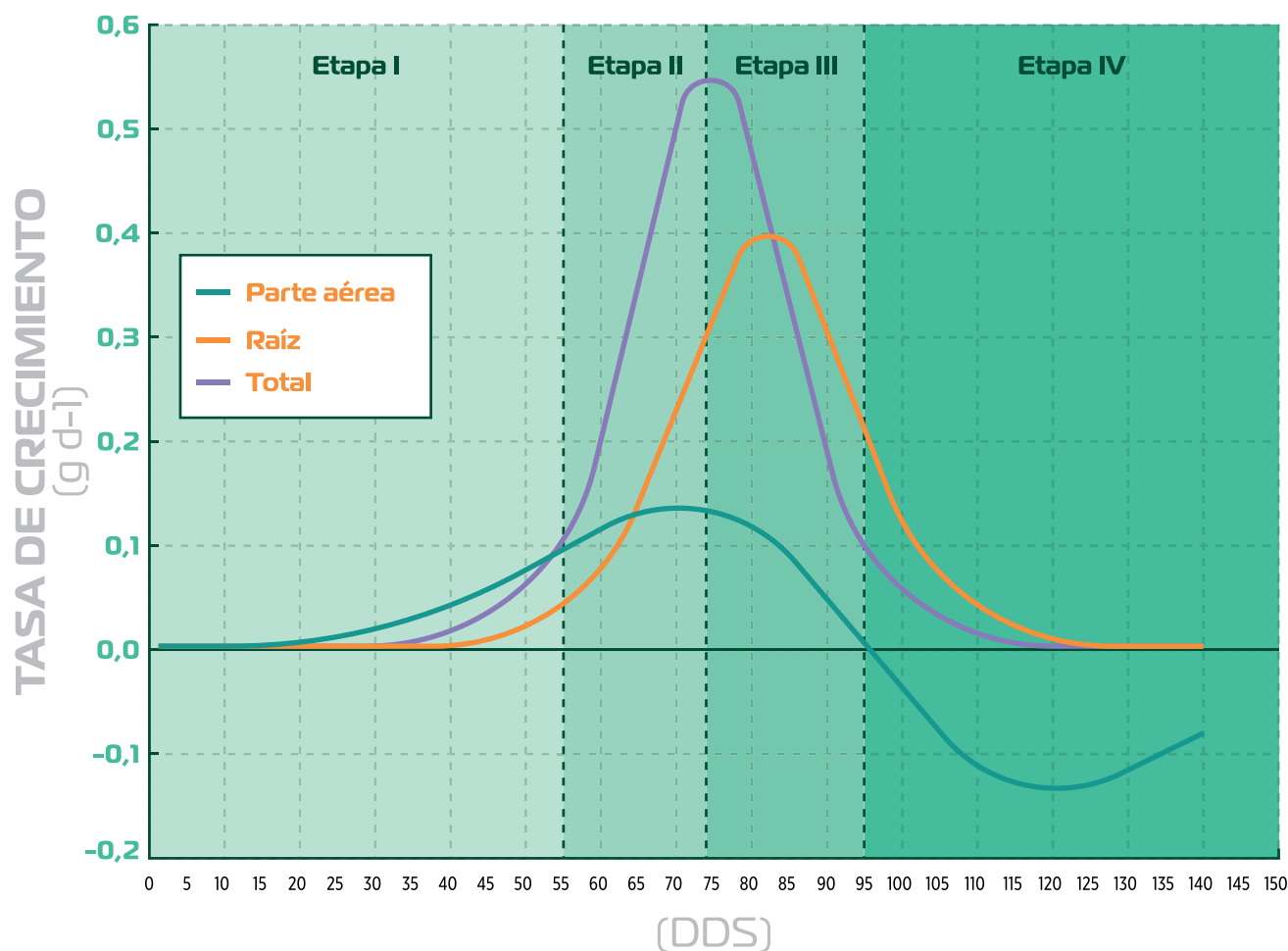


Figura 7.4. Dinámica de la tasa de crecimiento de la planta completa de zanahoria, parte aérea y raíz expresada en g d⁻¹ de materia seca, a través del tiempo después de siembra (DDS), bajo condiciones del Oriente antioqueño.

Fuente: Elaboración propia

Área foliar

El área foliar y cantidad de hojas emitidas hasta el final de la primera etapa de crecimiento se incrementan lentamente. Posteriormente, se nota un crecimiento rápido que ocurre durante la segunda y tercera etapas, alcanzando un pico alrededor de los 91 DDS, condición si-

milar a la encontrada por Floari et al. (2021) en la variedad Cadril. Hacia la cuarta etapa, el número de hojas emitidas disminuye y, por lo tanto, el área foliar se reduce (figura 7.5). La relación entre el área foliar y la acumulación de peso seco depende de cómo se distribuye



CAROTA
360°

Modelo integral para el desarrollo de la cadena de valor de zanahoria en el Oriente departamento de Antioquia

el carbono en cada uno de los órganos de la planta (Brouwer, 1983; Martínez-Maldonado et al., 2021). El área foliar puede estar afectada por factores bióticos y abióticos. En cuanto a este último, una deficiencia de nitrógeno

puede ocasionar reducciones en el área foliar, con consecuente disminución en la tasa fotosintética, lo cual se puede reflejar en pérdida del potencial productivo (Zhang et al., 2020; Evans 1989).

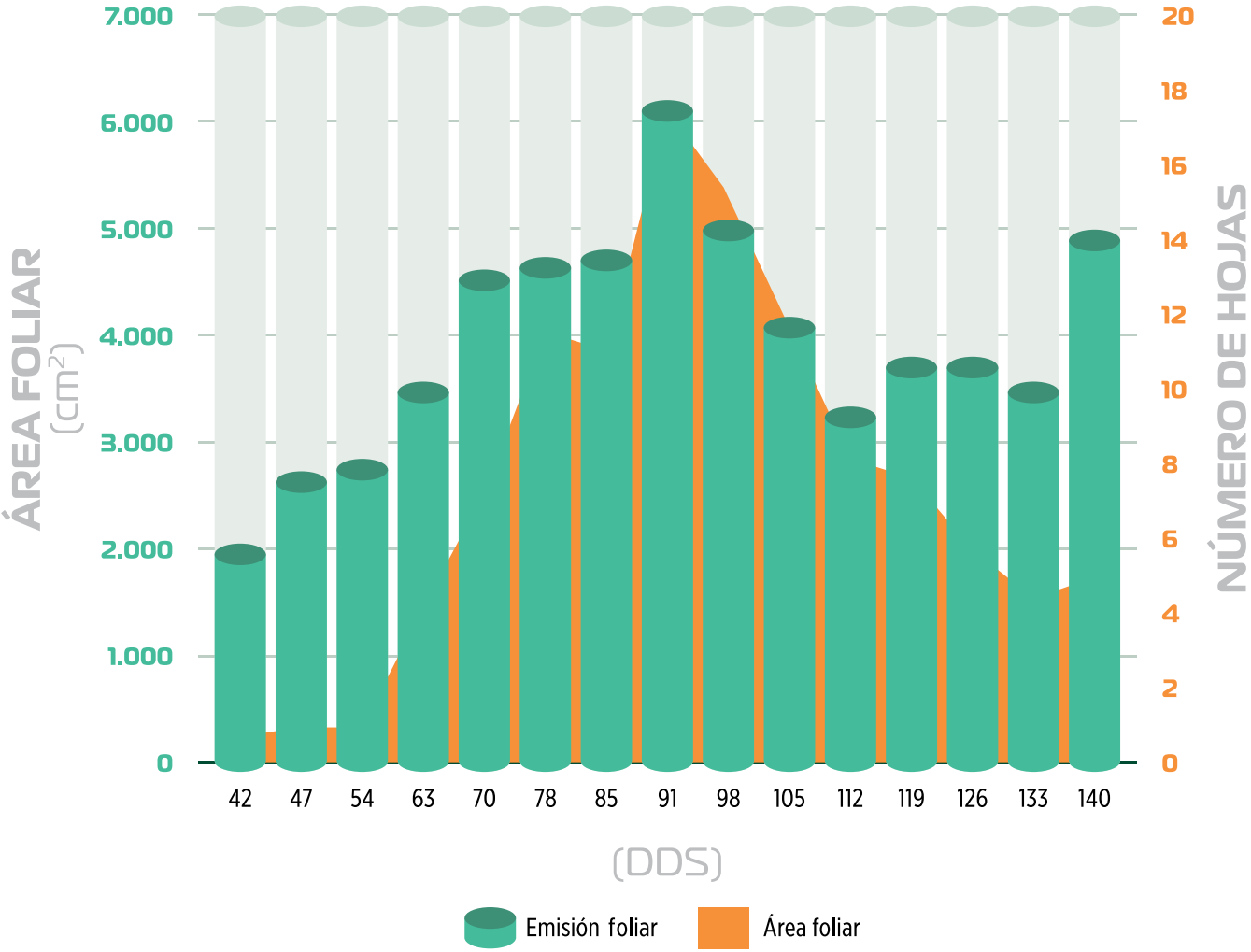


Figura 7.5. Dinámica de la emisión de hojas y área foliar del híbrido Bangor para la región del Oriente antioqueño.

Fuente: Elaboración propia

Tiempo térmico y relación con etapas fenológicas para el cultivo de zanahoria

La temperatura es una de las fuerzas impulsoras del crecimiento y el desarrollo de los cultivos. Para alcanzar las diferentes etapas de desarrollo, las plantas necesitan cierta cantidad de calor denominada tiempo fisiológico o tiempo térmico (TT), el cual se expresa en unidades de grados día acumulados ($^{\circ}\text{C}$) (Jaramillo, 2005; Parra-Coronado et al., 2015). Su cálculo es ampliamente utilizado para predecir el tiempo necesario para que un cultivo alcance determinada fase de desarrollo, de acuerdo con las condiciones específicas de clima de una zona productiva (Zimmermann et al., 2017) y de esta manera estimar el momento óptimo de recolección.

Para el cultivo de zanahoria, el rango de temperatura óptimo para el crecimiento está entre 16 y 21 $^{\circ}\text{C}$ (Purdue University, 2012). La actividad fisiológica de las plantas se ve limitada o incluso puede no ocurrir cuando las temperaturas se sitúan por fuera de los umbrales térmicos definidos como base inferior y superior. En zanahoria, se ha reportado que la temperatura base inferior para el desarrollo es de 10 $^{\circ}\text{C}$ (Dean et al., 1989), mientras que la base superior se encuentra entre 30 y 35 $^{\circ}\text{C}$ (Ruiz Corral et al., 2013).

Cabe aclarar que estos umbrales aplican para determinados materiales genéticos, cultivados generalmente en regiones templadas, por lo que

pueden no ser completamente representativos de los materiales evaluados en condiciones intertropicales como las del presente estudio. En este caso, dichos valores se utilizaron sin ajuste, como una primera aproximación al análisis térmico, reconociendo la necesidad de realizar estudios específicos para estimar los umbrales térmicos reales del material descrito en este capítulo.

Para calcular el tiempo térmico en el cultivo de zanahoria, se utilizó el método del triángulo simple (Universidad de California, 2012). La figura 7.6 muestra que en las condiciones climáticas registradas en el C. I. La Selva se necesitaron 1.174,2 $^{\circ}\text{D}$ para que las plantas de zanahoria del material tipo Berlicum llegaran a su punto de madurez hortícola (etapa IV). Se observa que para la etapa I se deben acumular 542,8 $^{\circ}\text{D}$ desde la siembra; para la etapa II, 722,5 $^{\circ}\text{D}$ y para la etapa III, 946,6 $^{\circ}\text{D}$.

El umbral de temperatura ajustado para el material tipo Berlicum permite establecer los parámetros productivos óptimos para el cultivo de zanahoria, resaltando las condiciones climáticas deseables para su desarrollo en la zona del Oriente antioqueño. Dado que el clima puede variar significativamente entre localidades e incluso a escala de finca, la acumulación de grados día ($^{\circ}\text{D}$) se plantea como un indicador complementario útil para estimar la duración del



ciclo productivo. Esta métrica considera las condiciones térmicas predominantes de cada zona y aporta mayor precisión en la caracterización fenológica, y en la del material tipo Berlicum

establece los parámetros productivos requeridos para la zanahoria, destacando condiciones deseables para su producción dentro de la zona del Oriente de Antioquia.

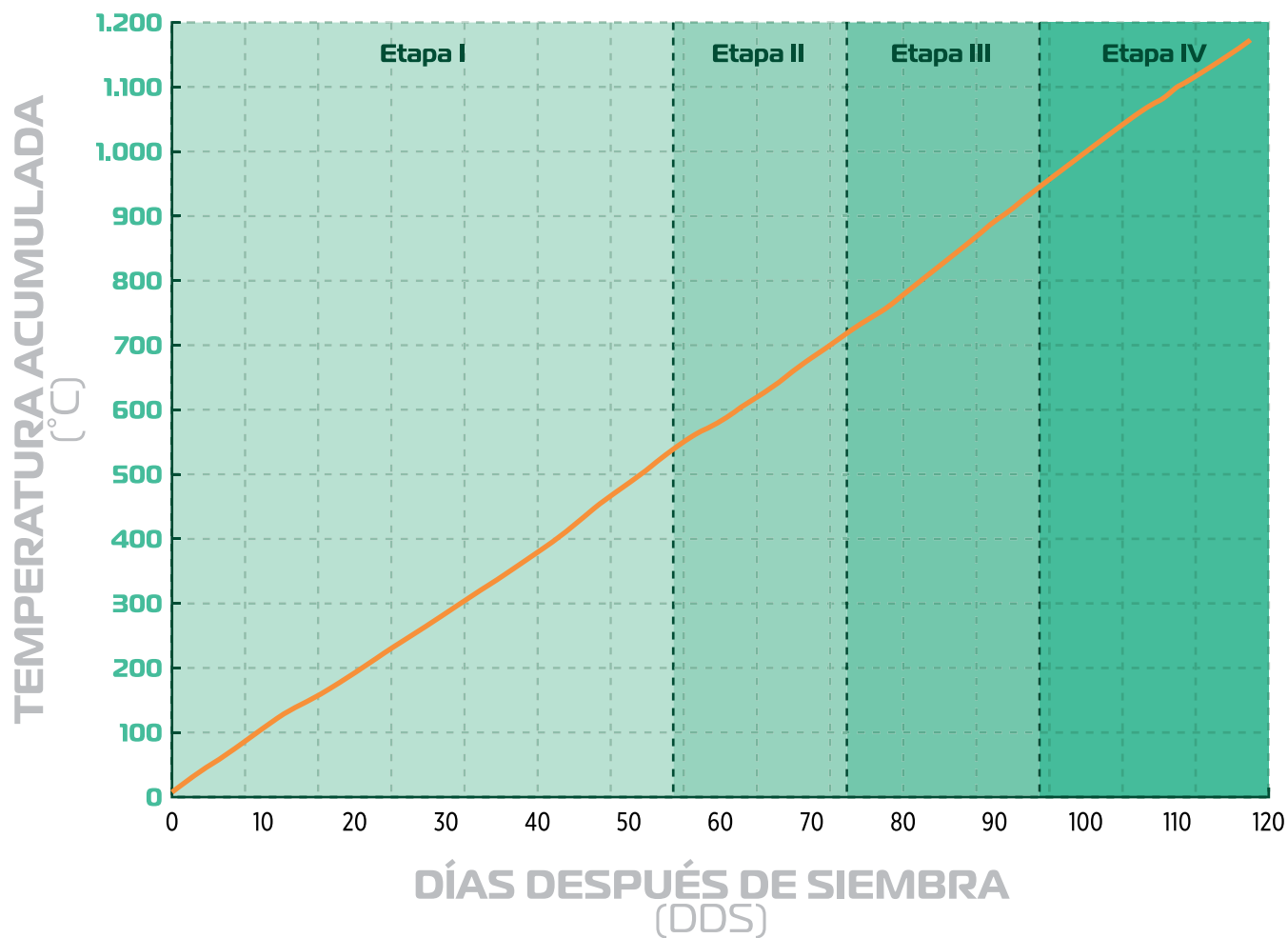


Figura 7.6. Tiempo térmico (TT) acumulado por etapa de desarrollo en plantas de zanahoria bajo condiciones ambientales del Oriente antioqueño.

Fuente: Elaboración propia

Momento óptimo de recolección (MOR) de la zanahoria y su calidad de consumo

Para las condiciones ambientales del Oriente antioqueño, las tasas de crecimiento de la raíz y de la parte aérea en zanahoria del material tipo Berlicum disminuyen alrededor de 85 DDS, proceso que ocurre en la etapa III. En la etapa IV, la tasa de crecimiento de la raíz disminuye a valores cercanos a cero, con tasa entre $0,02 \text{ g d}^{-1}$ y $0,005 \text{ g d}^{-1}$, y la parte aérea presenta una tasa de crecimiento negativa ($-0,1311 \text{ g d}^{-1}$). Esto indica que la acumulación de biomasa total en la planta es baja, por lo que se puede inferir que los recursos se están dirigiendo hacia la raíz y las hojas han entrado en senescencia en la fase vegetativa de la planta. La combinación de estos factores (tasa de crecimiento de la planta completa, de la raíz y follaje) indica que la zanahoria ha alcanzado su potencial de crecimiento y la calidad hortícola de consumo, por lo que se puede recomendar el MOR del material de zanahoria estudiado en el periodo comprendido entre los 115 y los 125 DDS. La calidad de la raíz de la zanahoria como producto final para su consumo y agroindustria debe reunir ciertos factores, como tamaño, forma, color, contenido de azúcares y firmeza, cualidades que alcanza en el MOR recomendado; además, debe tener una apariencia fitosanitaria óptima.

La definición apropiada del MOR es importante porque la calidad del producto puede deteriorarse si se recolecta demasiado temprano o tar-

de. En cosechas tempranas, la zanahoria pierde firmeza rápidamente, lo que acorta su vida útil, mientras que, en cosechas tardías, se afecta la calidad del producto puesto que la raíz se torna fibrosa, se afecta el sabor y disminuye la textura (Gabriel, 2013; Saavedra & Kehr, 2019).

En cuanto a la calidad morfológica y visual de la raíz, la zanahoria ha alcanzado la tonalidad y la saturación típica del material, desde alrededor de los 77 DDS (etapa III). A partir de este tiempo y hasta alcanzar el MOR, la evolución del color es baja en la corteza, con incremento del color de 8,8, en el xilema de 6,9 y en el floema de 5,1. Estos incrementos en el color pueden ser perceptibles a los ojos del consumidor y estarían asociados a las fases finales del metabolismo de la raíz en la etapa IV de crecimiento de la planta.

En el periodo comprendido entre los 115 y los 125 DDS (MOR), se observa que la textura tiene una tendencia ascendente en la variable dureza o fuerza necesaria para deformar la zanahoria (Oficina Nacional de Normalización [ONC], 2002), con valores de 13 kgf, para ascender a unos 20 kgf en el tiempo máximo de la cosecha (figura 7.7a), por lo que la zanahoria se considera como vegetal duro, característica que influye en el diseño y capacidad de los empaques, tal como lo considera la Norma Técnica Colombiana NTC 1226-2 (Icontec, 1996), con recomendaciones de empaques que van desde los 25 a los 50 kg.

Los valores de la elasticidad (figura 7.7b) o rapidez con la cual se recupera la zanahoria de la deformación después de aplicar una fuerza, la cohesividad (figura 7.7c) relacionada con la crujencia de la raíz y la masticabilidad (figura 7.7d), referida a la



energía requerida para masticar la zanahoria hasta que esté lista para su deglución (ONC, 2002), presentan tendencia similar a la textura. López (2019) reporta condiciones similares a las expues-

tas, manifestando que la zanahoria se caracteriza por tener valores altos de dureza, masticabilidad y fracturabilidad, o fuerza necesaria para romper la zanahoria en trozos (ONC, 2002).

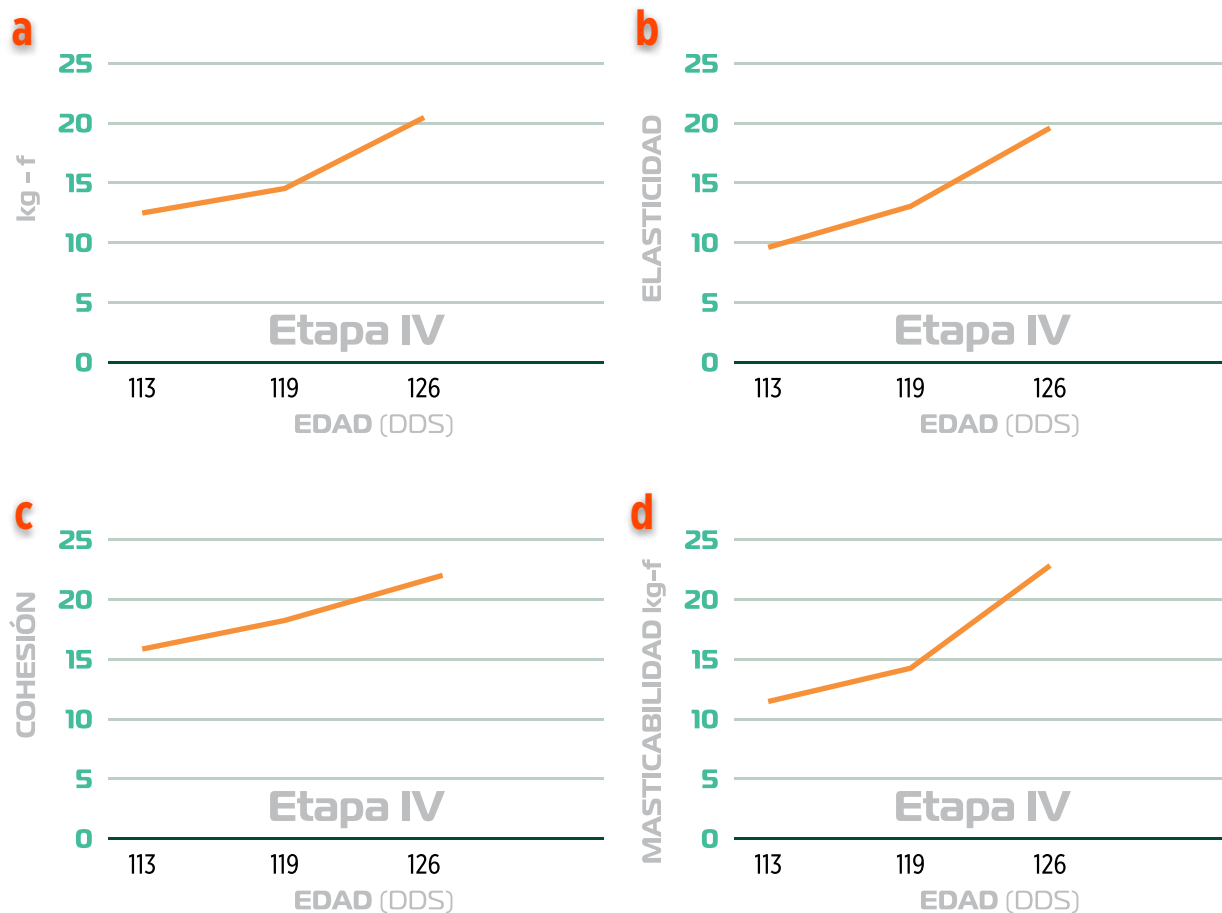


Figura 7.7. Evolución de variables de textura de la zanahoria del material tipo Berlicum durante el MOR en la etapa IV de crecimiento. a. Textura; b. Elasticidad; c. Cohesión; d. Masticabilidad. Todas las anteriores en unidades de kgf.

Fuente: Elaboración propia



La mayor acumulación de sólidos solubles totales se obtiene entre los 107 y 126 DDS (etapa IV de crecimiento), con un valor máximo de 7,7 °Brix (figura 7.8a), tal como lo mencionaron Richmond et al. (2011), Larsen y Wold (2016) y Ghorbani et al. (2021), que coincide con la MOR recomendada. El pH presenta valores estables con ligera tendencia a la disminución (figura 7.8b), situación también encontrada por Ghorbani et al. (2021). La acidez titulable expresada como el porcentaje de ácido málico se presenta estable (figura 7.8c), acorde a los valores re-

portados en la literatura (Bastidas & Valencia, 2014; Dussán et al., 2015). En el caso de proponer un índice de madurez basado en los sólidos solubles/acidez titulable, los mayores valores se presentan en la época recomendada como MOR según las condiciones ambientales del Oriente antioqueño (figura 7.8d). La evolución de las variables fisicoquímicas que acompañan el crecimiento y desarrollo de la zanahoria verifican que las mejores condiciones de calidad y madurez hortícola se obtienen en la época de recolección recomendada.

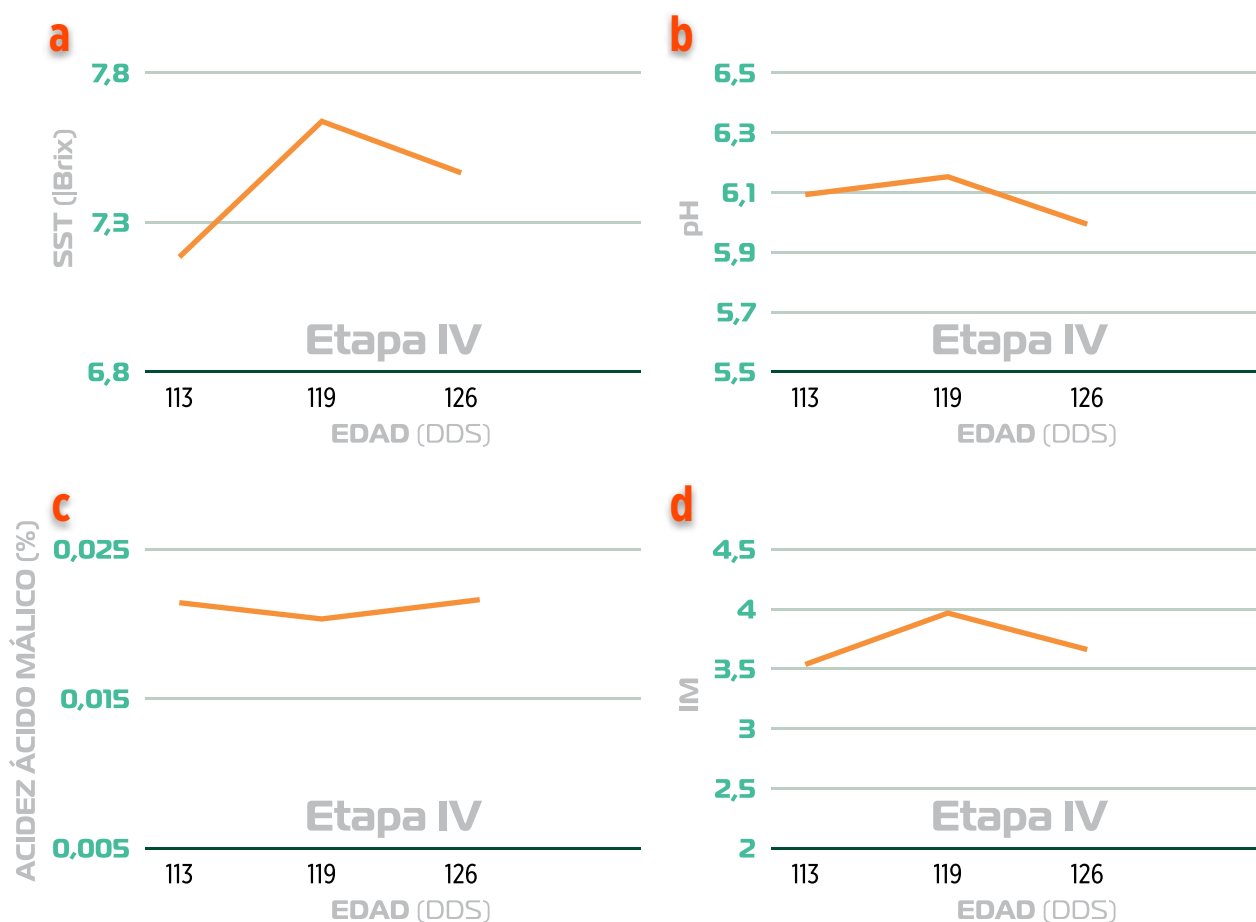


Figura 7.8. Evolución de las variables fisicoquímicas de la zanahoria del material tipo Berlicum durante el MOR en la etapa IV de crecimiento. a. Sólidos solubles totales; b. pH; c. Acidez; d. Índice de madurez.

Fuente: Elaboración propia



CAROTA
360°

Modelo integral para el desarrollo de
la cadena de valor de zanahoria en el
Oriente departamento de Antioquia

Algunas recomendaciones para el manejo agronómico basadas en la fenología

Con base en el estudio del crecimiento y desarrollo del material tipo Berlicum presentado en este capítulo, se recomienda el siguiente manejo, de acuerdo con la etapa fenológica:

Etapa I: es importante realizar una buena preparación del suelo con arado profundo y rastra, para asegurar un suelo suelto y bien drenado e incorporar materia orgánica para mejorar su estructura. Se recomienda aplicar fertilización, previo análisis de suelo, y garantizar la disponibilidad de fósforo (P) y potasio (K) para favorecer el desarrollo radicular, así como sembrar a una densidad adecuada para evitar competencia entre plantas, con una distancia recomendada de 20 cm entre hileras y 10 cm entre plantas. Es importante mantener una humedad constante en el suelo, especialmente durante la germinación y establecimiento inicial. Realizar desyerbas manuales o mecánicas para evitar la competencia por nutrientes y luz.

Etapa II: durante esta fase, caracterizada por un crecimiento acelerado de la biomasa total de la planta, es necesario asegurar el suministro adecuado de nitrógeno mediante fuentes como nitra-

to de amonio (NH_4NO_3) o urea, mantener una humedad óptima del suelo, continuar con el control de arvenses y realizar un monitoreo riguroso para la detección temprana de plagas y enfermedades. Para un manejo integrado, pueden utilizarse agentes biológicos como *Bacillus thuringiensis* y *Trichoderma* spp., de manera preventiva.

En esta etapa, el desarrollo de la parte aérea, especialmente del follaje, reviste gran importancia, ya que las hojas, aunque no acumulan directamente la biomasa final del cultivo (que en el caso de la zanahoria se concentra en la raíz), desempeñan un papel determinante como órganos fotosintéticos. A través de la captura de CO_2 y la fotosíntesis, generan los fotoasimilados necesarios para el crecimiento de todos los órganos de la planta, incluyendo la raíz.

Por lo tanto, entre los 55 y 95 DDS, se recomienda un manejo fitosanitario enfocado en la protección y funcionalidad del follaje. Pasado este periodo, la tasa de emisión de nuevas hojas y el crecimiento foliar disminuyen, por lo que las aplicaciones preventivas orientadas al sostenimiento del tejido aéreo pierden efectividad.

Para no olvidar...



- » En el intertrópico colombiano, el cultivo de zanahoria no entra en dormancia ni en fase reproductiva debido al fotoperiodo, a diferencia de lo que ocurre en climas templados. Esto permite prolongar el ciclo vegetativo en campo, si las condiciones lo permiten, pero también exige definir cuidadosamente el momento óptimo de cosecha para no perder calidad.
- » El momento óptimo de recolección del material de zanahoria tipo Berlicum, en condiciones del Oriente antioqueño, ocurre entre los 115 y 125 días después de siembra, lo cual garantiza raíces con mayor firmeza, buen contenido de azúcares y excelente calidad comercial.
- » Entender cómo y cuándo la planta transloca biomasa hacia la raíz permite optimizar el uso de fertilizantes, agua y productos fitosanitarios. Por ejemplo, la protección del follaje es crítica solo hasta que se alcanza el máximo de producción fotosintética (etapa III), lo que evita gastos innecesarios en la etapa final del cultivo.

Conclusiones y perspectivas de los autores

- » Mediante el estudio fisiológico de la zanahoria, en este caso del material tipo Berlicum ampliamente utilizado, se obtuvo información aplicable para el manejo técnico del cultivo, bajo las condiciones ambientales de siembra.
- » La caracterización del crecimiento, basada en modelos logísticos y el análisis de grados-día acumulados (1.174,2 °D hasta la madurez), permite a técnicos, agrónomos y productores anticipar con precisión las etapas críticas del desarrollo del cultivo. Se identificaron cuatro fases fenológicas bien definidas, destacando que el momento óptimo de recolección (MOR) se encuentra entre los 115 y 125 días después de siembra (DDS),

cuando la raíz alcanza su mayor calidad hortícola con valores máximos de textura (hasta 20 kgf), sólidos solubles (hasta 7,7 °Brix) y características morfológicas óptimas como color, forma y firmeza. Además, se evidenció que el 95 % del peso seco máximo de la raíz (12,17 g/planta) se alcanza a los 105 DDS, y el área foliar alcanza su máximo a los 91 DDS, lo cual orienta sobre el momento de mayor actividad fotosintética. Estas métricas permiten ajustar con precisión prácticas como la fertilización nitrogenada entre los 55 y 95 DDS, el control fitosanitario del follaje y la programación de la cosecha, reduciendo pérdidas y mejorando la eficiencia del uso de recursos. La incorporación del tiempo térmico como herramienta predictiva, junto con las recomendaciones agronómicas por etapa fenológica, representan un insumo clave para planificar el cultivo con base en las condiciones climáticas locales, propiciando así una producción más eficiente, sostenible y rentable.



Referencias

- Castaño-Marín, A. M., Góez-Vinasco, G. A., Hormaza-Martínez, P. A., Cano-Gallego, L. E., López-Hernández, L. F., Posada-Rúa, J. D., Zuluaga-Mejía, C., Domínguez-Pulgarín, C., García-Valencia, V., & Henao Rojas, J. C. (2026). Growth dynamics and ecophysiological performance of two carrot (*Daucus carota* L.) types under high-altitude Andean tropical conditions. *Horticulturae*, 12(5), 525. <https://doi.org/10.3390/horticulturae12050525>
- Cleland, E. E., & Wolkovich, E. M. (2024). Effects of phenology on plant community assembly and structure. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 55, 1-25. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102722-011653>
- Fernández, F., & Santa, N. (1964). *Estudio general de suelos del Oriente antioqueño*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/1157e2.pdf>
- Gabriel, E. (2013). Implantación y manejo del cultivo. En J. Gaviola (Ed.), *Manual de producción de zanahoria* (pp. 47-69). INTA. <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/423f6293-6b1d-46a4-824d-99f6257ca741/content>
- La Vanguardia. (2022). Zanahoria: propiedades, valor nutricional, beneficios y qué tener en cuenta a la hora de comprarla. <https://www.lavanguardia.com/comer/materia-prima/20180918/451854795056/zanahoria-beneficios-propiedades-valor-nutricional.html>
- Ortuño, A., Díaz, L., & Del Río, J. (2015). Evolución de la fisiología vegetal en los últimos 100 años. *Revista Eubacteria*, 34, 74-82. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5370382>
- Saavedra, G., & Kehr, E. (2019). Zanahoria (*Daucus carota* L., Var. sativus Hoffm.). *Boletín INIA*, 411, 71-119. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/6818>
- Torres, A. (2016). Siete beneficios de la zanahoria que no conocía. *El País*. https://elpais.com/elpais/2014/07/21/buenavida/1405934369_335839.html
- Universidad Nacional de Colombia, Instituto Nacional de Salud & Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. (2020). *Encuesta nacional de la situación nutricional 2015*. ICBF. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/GCFI/libro-ensin-2015.pdf>
- Van Schaik, C. P., Terborgh, J. W., & Wright, S. J. (1993). The phenology of tropical forests: adaptive significance and consequences for primary consumers. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 24, 353-377. <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.es.24.110193.002033>
- University of California Agriculture & Natural Resources. (2013). *Weather, models, & degree-days*. <http://ipm.ucdavis.edu/WEATHER/index.html>
- Bastidas-Cadpata, R., & Valencia-Chamorro, S. (2015). Estudio del efecto de la aplicación de sanitizantes en la calidad de zanahoria (*Daucus carota* L.) de IV GAMA. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(2). <https://www.redalyc.org/pdf/813/81343176023.pdf>
- Dussán-Sarria, S., García-Mogollón, C. A., & Gutiérrez-Guzmán, N. (2015). Cambios fisicoquímicos y sensoriales producidos por el tipo de corte y empaque en zanahoria (*Daucus carota* L.) mínimamente procesada. *Información Tecnológica*, 26(3), 63-70. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300010>

- Forero-Ulloa, F. E., Cely-Reyes, G. E., & Neira-Rodríguez, E. (2015). Requerimientos hídricos de la zanahoria (*Daucus carota* L.) durante tres etapas de su desarrollo. *Ciencia y Agricultura*, 12(2), 43-50. <https://www.redalyc.org/pdf/5600/560058661005.pdf>
- Ghorbani, Z., Zamindar, N., Baghersad, S., Paidari, S., Jafari, S. M., & Khazdooz, L. (2021). Evaluation of quality attributes of grated carrot packaged within polypropylene-clay nanocomposites. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(4), 3770-3781. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00925-7>
- Larsen, H., & Wold, A. B. (2016). Effect of modified atmosphere packaging on sensory quality, chemical parameters and shelf life of carrot roots (*Daucus carota* L.) stored at chilled and abusive temperatures. *Postharvest Biology and Technology*, 114, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.11.014>
- Loarca, J., Liou, M., Dawson, J. C., & Simon, P. W. (2024). Evaluation of shootgrowth variation in diverse carrot (*Daucus carota* L.) germplasm for genetic improvement of stand establishment. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1342512. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1342512>
- Matute, M. (2008). *Influencia de la distribución de las líneas de siembra en las mesetas de cultivo sobre la producción y calidad de la zanahoria CV. Maestro*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Moreira, F. F., Oliverira, H. R., Volenec, J. J., Rainey, K. M., & Brito, L. F. (2020). Integrating high-throughput phenotyping and statistical genomic methods to genetically improve longitudinal traits in crops: logistic growth curve modeling of genotype-specific growth patterns. *Frontiers in Plant Science*, 11, 681. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00681>
- Northolt, M., Van Der Burgt, G.-J., Buisman, T., & Bogaerde, A. Vanden. (2004). *Parameters for Carrot Quality and the development of the Inner Quality concept*. Louis Bolk Instituut. <https://www.louisbol.nl/sites/default/files/publication/pdf/1411.pdf>
- Parra-Coronado, A., F., Gerhard, B., & Chaves-Cordoba. (2015). Tiempo térmico para estados fenológicos reproductivos de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). *Acta Biológica Colombiana*, 20(1), 163-173. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n1.43390>
- Purdue University. (2012, August 5). *Daucus carota* L. *Center for New crops and Plants*. http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/solanum_tuberosum
- Richmond, F., Méndez, C. H., & Umaña, G. (2011). Cambio en las características de calidad de 12 híbridos comerciales de zanahoria durante el almacenamiento. *Agronomía Costarricense*, 35(1), 163-174. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242011000100009
- Rosas, V. (2011). *Evaluación del potencial productivo de tres cultivares de zanahoria (Daucus carota L.) en Valdivia*. Universidad Austral de Chile.
- Sarli, A. E. (1980). *Tratado de horticultura* (2.ª ed.). Hemisferio Sur.

