

E L
SISTEMA
D E L
BONIATO

(CAMOTE O BATATA)

Las **22** Leyes Científicas
para **Rendimiento Máximo**
en el **Trópico**

AUTORES

Alfredo Morales | Dania Rodríguez

PRIMERA EDICIÓN

EL SISTEMA DEL BONIATO

(Camote o Batata)

Las 22 Leyes Científicas para Rendimiento Máximo en el Trópico

Alfredo Morales

Dania Rodríguez

EL SISTEMA DEL BONIATO (Camote o Batata). Las 22 Leyes Científicas para Rendimiento Máximo en el Trópico

© 2026 Alfredo Morales, Dania Rodríguez

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, sin el permiso previo y por escrito del autor.

Primera edición: 2026

Autores principales

Alfredo Morales^{1*}

Dania Rodríguez¹

Coautores

Jorge López Torres¹, Manuel Lima Díaz¹, María del Carmen Castellón¹, José Efraín González Ramírez¹, Nilo Maza Estrada¹, Lilian M. Morales Romero¹, Vaniert Ventura Chávez¹, Maryluz Folgueras Montiel¹, Milagros Basail Pérez¹, Peiyong Ma², Jia ZhaoDong², Bian Xiaofeng², Iván Javier Pastrana Vargas³, Yoel Beovides García¹, Alberto Espinosa Cuellar¹, Yuniel Rodríguez García¹, Alay Jiménez Medina¹, Lianet González Díaz¹, Víctor Medero Vegas¹, Dablys Guerra Hernández¹, Alexander Mederos Jauriga¹, Juan Ramón Gálvez¹, Onel Días Rodríguez¹, Adrian Rubio Cabrera¹, Carmen C. Pons Pérez¹, Jaime Simó González¹.

Edición y diseño

Alfredo Morales¹

Danay Rodríguez Vázquez⁴

Carmen C. Pons Pérez¹

Yamilet Valle Dorta¹

Corrección de estilo, gramática y redacción

Carmen C. Pons Pérez¹

Maryluz Folgueras Montiel¹

Lilian M. Morales Romero¹

Afiliaciones

¹ Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT), Villa Clara, Cuba.

² Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences (JAAS), Nanjing, China.

³ Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.

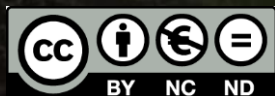
⁴ Ronera Central Agustín Rodríguez Mena, Villa Clara, Cuba.

✉ Autor para correspondencia: alfremr88@gmail.com

Editorial

INIVIT, Villa Clara, Cuba

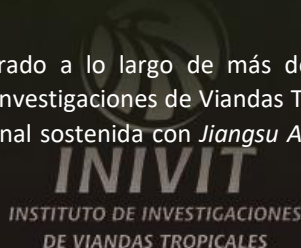
ISBN: 978-959-295-015-3



Esta obra está bajo una licencia
Creative Commons BY-NC-ND 4.0

Agradecimiento institucional

Esta obra es un producto del conocimiento generado a lo largo de más de 50 años en el Programa de Mejoramiento Genético de Boniato del Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT, Cuba), y se ha enriquecido con la colaboración científica internacional sostenida con *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences* (China).



Citación recomendada

Morales, A. y Rodríguez D., *et al.* 2026. EL SISTEMA DEL BONIATO (Camote o Batata). Las 22 Leyes Científicas para Rendimiento Máximo en el Trópico. INIVIT, Villa Clara, Cuba. 181 pp.

DEDICATORIA

Al Dr. Alfredo Morales Tejón (1948–2019), cuya vida y obra son el verdadero sustrato sobre el cual crece todo el conocimiento contenido en este libro.

Este libro no es una obra que comienza en estas páginas. Sus raíces se hunden en la tierra fértil de un compromiso que duró toda una vida. Cuando usted hojee estas líneas y encuentre desde los fundamentos fisiológicos más complejos hasta las recomendaciones más prácticas para la cosecha, debe saber que está leyendo, en esencia, la traducción sistemática de una obsesión: la de un hombre que dedicó 47 años a descifrar, con paciencia de relojero y visión de estrategia, cada secreto de la planta de boniato.

Él fue el arquitecto de la ciencia cubana del boniato. En una época donde la palabra innovación no estaba asociada a la tecnología de punta sino a la agudeza intelectual, enfrentó el reto de un genoma hexaploide complejo con las herramientas más poderosas, la observación meticulosa, el método riguroso y una pregunta científica precisa. Fundó y condujo el Programa de Mejoramiento Genético del INIVIT, pero su mirada fue siempre más amplia que la obtención de una nueva variedad. Comprendió que un cultivar superior era el resultado final de entender una cadena causal que comenzaba en la fisiología de la tuberización, pasaba por la interacción con el suelo y el clima, y culminaba en el manejo poscosecha.

Por ello, su legado impregna cada página de este sistema. Los principios fisiológicos aquí establecidos se forjaron en sus rigurosos estudios del crecimiento. Los protocolos agronómicos que definen cada etapa, fueron probados y validados en cientos de ensayos de campo bajo su dirección. La estrategia integral que este libro propone para alcanzar el rendimiento máximo es, en esencia, la culminación del mapa científico que él ayudó a trazar para el boniato cubano.

Para quienes tuvimos el privilegio de trabajar a su lado, Alfredo Morales Tejón fue más que un investigador eminente; fue el maestro que enseñaba que el rigor y la ética son los cimientos de todo buen trabajo. Fue el ejemplo más profundo de dedicación.

Este libro, El Sistema del Boniato, es por tanto mucho más que una guía técnica. Es el intento de preservar y transmitir la lógica integral de su pensamiento. Es el puente entre su legado científico, tallado con perseverancia frente a la adversidad, y las nuevas generaciones de productores y técnicos que tienen en sus manos el futuro de este cultivo.

Aquí no se encontrará solo información, sino la síntesis de una vida entera de diálogo con la tierra y la planta. Se lo dedicamos, con la certeza de que su mirada curiosa y su espíritu indagador perdurarán en cada decisión acertada que un agricultor tome al seguir estas leyes, y en cada raíz tuberosa que llegue con abundancia a la mesa de los cubanos.

Porque la verdadera semilla del progreso no es la que se siembra en la tierra, sino la que se planta en la mente de quienes buscan el conocimiento.

Con respeto y gratitud eterna,

Los autores
Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales, Cuba.

Faber est suae quisque fortunae

(Cada uno es artífice de su propia fortuna)

Apio Claudio Caecus

PRÓLOGO

El boniato habla. No con palabras, sino con señales, una hoja que se vuelve morada, una raíz que se agrieta, un follaje que crece sin control. Quien aprende a leer esas señales, domina el cultivo. Quien las ignora, depende de la suerte.

Este libro le enseña a escuchar. Y lo hace desde una convicción profunda, la ciencia del boniato se hereda, no se inventa en soledad.

Aquí vive la familia en tres sentidos. Primero, la familia de sangre: el padre, la madre y el hijo que consagraron su vida a este cultivo, fieles a un legado que comenzó décadas atrás en los surcos del Centro de Mejoramiento de Semillas Agámicas. Segundo, la familia institucional: aquel grupo de fundadores (Adolfo Rodríguez Rivera, Adolfo Rodríguez Nodals, Alfredo Morales Tejón, Sergio Rodríguez Morales, José Ángel Pino Algora, Rosa Filipía y tantos otros) que entendieron que el conocimiento se construye en diálogo, no en cátedras unidireccionales.

Y es aquí donde debo detenerme para agradecer. A Dania y Alfredo, por la confianza y la oportunidad de escribir estas palabras. A todos los que, antes que nosotros, pusieron el cuerpo y la mente en el estudio del boniato. Sus nombres están en la historia del INIVIT y también en cada página de este libro, aunque no siempre figuren en los créditos. Este prólogo es, en parte, un reconocimiento a ellos.

Tercero, la familia extensa que este libro convoca: el extensionista, el docente, el estudiante y el productor, unidos por un propósito común.

Porque el boniato no se cultiva bien desde el individualismo. Se cultiva bien desde el legado.

Quizás le cause reparo el uso de la palabra “Ley” en el título. No se trata de mandatos rígidos. Aquí, “Ley” es un principio rector comprobado: un patrón que el boniato respeta en el trópico. Conocerlo no es imponer reglas a la planta, sino aprender a navegar con ella. Cada una de las 22 leyes es una brújula que convierte la incertidumbre del campo en previsibilidad técnica. Y cada ley ha sido validada por generaciones que observaron, fracasaron, corrigieron y enseñaron.

Recuerdo una anécdota de los años ochenta en Camagüey. Durante una clase práctica con estudiantes, les pedí revisar un lote de boniato de excelente vigor. Grande fue la sorpresa cuando, tras examinar veinte metros continuos en un surco, no apareció ni una raíz tuberosa: solo follaje. El encargado del área, negando la evidencia, se metió a buscar con tanto afán que terminó con la uña del pulgar severamente dañada. Esa escena me confirmó algo que este libro sostiene: la agricultura es arte, ciencia y oficio. Pero también es un saber que se pasa de una generación a otra, a veces con el costo de una uña rota. La explicación de aquel fracaso (tan frecuente en nuestros campos) está en estas páginas, y fue descubierta por quienes entendieron que nadie comienza desde cero.

Este texto no se esconde tras jergas innecesarias. La terminología académica se traduce en acciones concretas, y la sabiduría del campo se valida con datos medibles. Usted no necesita más intuición. Necesita un mapa. Y ese mapa ha sido trazado por una familia que le abre la puerta para que usted también sea parte de ella.

Dé vuelta a la página. Las 22 leyes lo están esperando. Detrás de cada una hay un padre, una madre, un hijo, un fundador, un campesino anónimo y un científico de bata blanca. También están Dania y Alfredo, que hicieron posible este encuentro. Y todos ellos le dicen, desde el surco:

Si aprendiste de nosotros, ahora enseña a los que vienen.

Esa es la Ley 23, la que no está escrita en el índice, pero atraviesa cada página. Bienvenido a la familia.

Dr. C. Oscar Parrado Álvarez
Universidad de Camagüey, Cuba



PREFACIO

Este libro nace de una convicción forjada en el surco directo, una verdad que se ha manifestado durante más de 50 años en los campos experimentales y fincas productoras del trópico, el alto rendimiento en boniato no es un accidente ni un misterio, sino la consecuencia inevitable de aplicar un conocimiento científico preciso en el momento adecuado.

El Sistema del Boniato que presentamos aquí es la cristalización de este principio. Es el resultado de una de las trayectorias de investigación más largas y consistentes sobre un cultivo tropical en Cuba, un esfuerzo iniciado por el Dr. Alfredo Morales Tejón y sostenido durante décadas por el INIVIT y sus colaboradores. Este libro no es una colección de prácticas sueltas o recetas aisladas. Es, por el contrario, un cuerpo de conocimiento integrado y jerarquizado, donde la comprensión profunda de la fisiología de la planta dicta las acciones de manejo, y donde cada decisión agronómica, desde la preparación del suelo hasta el último riego, tiene un fundamento biológico claro y un objetivo cuantificable.

Durante años, el conocimiento que permitía superar las 40 toneladas por hectárea residía en la experiencia acumulada de unos pocos. La motivación para escribir este libro fue transformar esa experiencia en un sistema accesible y reproducible. Lo hemos estructurado, por tanto, no como una lista de tareas, sino como una serie de leyes científicas fundamentales. Estas leyes no son teorías abstractas; son principios derivados de la observación minuciosa, la experimentación rigurosa y el análisis de datos de cientos de ensayos.

Este es un libro escrito para el productor que quiere trascender la producción media, para el técnico agrícola que necesita argumentos sólidos para cambiar prácticas, y para el estudiante que busca entender la lógica detrás de cada recomendación. Cada capítulo, cada ley, está diseñado para responder a la pregunta práctica: ¿Por qué debo hacer esto? Y, más importante aún, ¿qué pasa si no lo hago?

El sistema que proponemos es ambicioso, pero realista. Ha sido probado en las condiciones diversas de Cuba y validado en cooperaciones internacionales. Reconoce las limitaciones materiales, pero demuestra que, con conocimiento estratégico, se pueden superar. Es un libro para el trópico, creado desde el trópico, con la firme creencia de que la soberanía alimentaria se construye con ciencia aplicada de la más alta calidad.

Agradezco a la legión de investigadores, técnicos y productores que, a lo largo de más de medio siglo, han contribuido con su trabajo a descifrar el rompecabezas productivo del boniato. Este sistema es, en esencia, un homenaje a su esfuerzo colectivo. Finalmente, va dirigido a usted, lector. Confiamos en que estas páginas se conviertan en su herramienta más confiable para tomar el control del cultivo, para predecir sus resultados y para lograr, cosecha tras cosecha, el rendimiento máximo que su tierra y su esfuerzo merecen.

Alfredo Morales
Santo Domingo, Villa Clara, Cuba
2026

Per aspera ad astra

(A través de las dificultades, hacia las estrellas)

Séneca

AGRADECIMIENTOS

La creación de este sistema es, ante todo, la culminación de un esfuerzo colectivo que abarca generaciones, disciplinas y fronteras. Es el resultado visible de una cadena de conocimiento que se ha ido tejiendo, con paciencia y rigor, desde hace más de medio siglo. Mi más profundo reconocimiento es para quienes han sido parte esencial de esta historia.

A la institución, mi casa y mi crisol científico: el Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT) de Cuba. En sus campos y laboratorios se forjó, año tras año, el acervo de conocimiento empírico y científico que constituye la esencia misma de El Sistema del Boniato. Este libro es, en gran medida, una sistematización del trabajo perseverante de toda una institución dedicada a las raíces y tubérculos tropicales.

A los pioneros y continuadores, los científicos, técnicos y obreros agrícolas del INIVIT, cuyos nombres no caben en esta página, pero cuyo sudor y meticulosidad están inscritos en cada dato, en cada ensayo y en cada protocolo que validó las prácticas aquí descritas. Su trabajo, a menudo anónimo, es el cimiento sobre el que se construye todo el edificio del conocimiento agronómico cubano. En este recuerdo colectivo ocupa un lugar central y eterno el Dr. Sergio Juan Rodríguez Morales (1948-2023), director emblemático del INIVIT durante décadas, incansable luchador por la agricultura cubana y un amigo muy querido. Su clarividencia científica, su pasión por transferir el conocimiento al campo y su ejemplo personal de consagración fueron un faro que guió a varias generaciones de investigadores. Fue un "científico con las botas en el fango".

A la colaboración internacional, que demostró que la ciencia no tiene patria, pero sí un lenguaje común, el del método riguroso. Un agradecimiento especial a los colegas de *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences* (JAAS), de China, por más de dos décadas de intercambio fructífero que enriqueció nuestra comprensión fisiológica y agronómica.

A los productores cubanos, los jueces definitivos y los aliados más honestos. Su sabiduría práctica, sus preguntas incisivas en los días de campo y su capacidad para poner a prueba cualquier teoría en la realidad de sus fincas han sido la brújula que ha orientado siempre la investigación hacia la utilidad concreta. Este sistema fue pensado para servirles.

A la familia científica y personal, que sostiene el esfuerzo detrás de escena. A los colegas que revisaron manuscritos y aportaron su crítica constructiva. Y, de manera íntima e indispensable, a mi familia, por el espacio de silencio y apoyo que hace posible la escritura, y por la comprensión durante las largas ausencias que demanda el trabajo de campo.

Y a ti, Dania. Porque antes que colega y autora de esta obra, eres mi madre. Porque fuiste la compañera incansable de mi padre durante más de treinta años de trabajo conjunto, compartiendo no solo la vida, sino también la pasión por el boniato y el rigor de la investigación. Porque en cada página de este libro, en cada dato y en cada reflexión, está también tu huella, tu paciencia, tu sabiduría y tu amor por lo que hacemos. Gracias por heredarme no solo la vida, sino también la pasión por el boniato.

Finalmente, este sistema se ofrece como un puente. Un puente entre el conocimiento acumulado en el pasado y los desafíos productivos del futuro; entre la ciencia que se genera en las instituciones y las manos que trabajan la tierra. Confío en que sea una herramienta viva, que se adapte, critique y mejore en cada surco donde se aplique, para seguir elevando, juntos, el potencial del boniato en el trópico.

Alfredo Morales
Santo Domingo, Villa Clara, Cuba
2026

ÍNDICE

| | |
|--|-----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| LEY 1: LA ANATOMÍA DEL RENDIMIENTO..... | 3 |
| LEY 2: EL CALENDARIO FISIOLÓGICO..... | 12 |
| LEY 3: EL CAMINO BIFURCADO (VICIO O ALMACENAMIENTO)..... | 20 |
| LEY 4: EL CALENDARIO PRODUCTIVO..... | 24 |
| LEY 5: DEL HÁBITAT LUMÍNICO..... | 28 |
| LEY 6: DE LA BASE EDÁFICA..... | 32 |
| LEY 7: DE LA ELECCIÓN GENÉTICA..... | 36 |
| LEY 8: DEL MATERIAL DE PROPAGACIÓN..... | 59 |
| LEY 9: DEL CRECIMIENTO LIBRE..... | 69 |
| LEY 10: DEL MOMENTO OPORTUNO..... | 75 |
| LEY 11: DE LA DEGENERACIÓN CLONAL..... | 78 |
| LEY 12: DE LA REGENERACIÓN TUBEROSA..... | 91 |
| LEY 13: DEL ESPACIO VITAL..... | 116 |
| LEY 14: DE LA SEMILLA VIVA..... | 120 |
| LEY 15: DE LA ALIMENTACIÓN SABIA..... | 133 |
| LEY 16: DE LA SIEMBRA HORIZONTAL..... | 141 |
| LEY 17: DE LA PROFUNDIDAD JUSTA..... | 149 |
| LEY 18: DEL CAMPO ELEVADO..... | 152 |
| LEY 19: DEL SUELO FRENTE AL CIELO..... | 157 |
| LEY 20: DEL AGUA JUSTA..... | 160 |
| LEY 21: DE LA DEFENSA INTEGRAL..... | 164 |
| LEY 22: DE LA COSECHA OPORTUNA..... | 174 |

INTRODUCCIÓN

Este libro representa un cambio de paradigma en la producción de boniato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.). No es una colección más de recomendaciones agronómicas, sino la materialización de una verdad científica incontrovertible que se ha forjado durante más de 50 años de investigación. El alto rendimiento en boniato es un fenómeno predecible y reproducible cuando se comprenden y se aplican las leyes fundamentales que gobiernan su desarrollo.

Durante décadas, la productividad de este cultivo en el trópico se ha visto limitada por un enfoque fragmentario. Se han enseñado prácticas aisladas, pero sin revelar el por qué fisiológico detrás de cada acción. Esto ha dejado a productores y técnicos aplicando recetas cuyo éxito era incierto, enfrentando pérdidas por plagas como el tetuán del boniato (*Cylas formicarius* Fab. [Coleoptera: Apoinidae]) o cosechas de raíces tipo lápiz sin comprender la causa, una fisiología mal manejada.

El Sistema del Boniato pone fin a esta incertidumbre. Nace del trabajo fundacional y la acumulación metódica de conocimiento en el Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT) de Cuba, un programa que no solo ha liberado variedades de impacto nacional como 'INIVIT B2-2005', sino que ha descifrado, paso a paso, la lógica biológica detrás de su éxito. Este libro es la síntesis de ese viaje científico, estructurado no como un listado de tareas, sino como un sistema integrado de leyes.

La premisa central de este sistema es a la vez profunda y práctica. Para transformar los resultados en el campo, debemos primero comprender la lógica interna de la planta. Todo manejo agronómico eficaz se deriva de este principio. Por ello, el sistema se cimienta en el dominio de dos realidades biológicas fundamentales, los mecanismos que gobiernan la formación de la raíz tuberosa y el ritmo de desarrollo de la planta a lo largo de su ciclo. Entender estos procesos no es un ejercicio teórico, sino la clave para interpretar lo que sucede en el surco y para actuar en el momento preciso, convirtiendo el conocimiento en rendimiento tangible.

Partiendo de esta base científica, el sistema construye una guía de manejo coherente y secuencial. Cada capítulo traslada un principio fundamental a una acción concreta y justificada. Así, la selección de la variedad, la preparación del terreno, el establecimiento del cultivo, el manejo del agua y la protección fitosanitaria dejan de ser prácticas aisladas. Se integran en una estrategia unificada, donde cada decisión está interconectada y apunta hacia un mismo objetivo, crear las condiciones óptimas para que la planta exprese su máximo potencial de producción en nuestras condiciones tropicales.



Este es un libro escrito desde el trópico para el trópico. Reconoce las limitaciones de recursos y se enorgullece de las soluciones ingeniosas y eficientes validadas por la ciencia cubana, como el uso de canteros altos, la fertilización orgánica o el control del tetuán mediante trampas de feromona sexual. Está dirigido al productor que anhela trascender el rendimiento promedio, al técnico que busca argumentos sólidos y al estudiante que desea entender la profunda conexión entre la biología y la cosecha.

En los últimos años, hemos tenido la oportunidad de revisar con atención los manuales de cultivo del boniato publicados por institutos de prestigio en Argentina, Paraguay, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá y Ecuador. Todos ellos cumplen un papel valioso al reunir el conocimiento disponible y ofrecer una guía general para el cultivo. Sin embargo, hemos observado que muchos comparten una estructura similar y, en ocasiones, recomendaciones que se repiten de un manual a otro (como el uso de cepellones o el curado de esquejes) sin que siempre estén respaldadas por experimentación propia en las condiciones específicas donde se aplican.

Este libro nace de una convicción distinta. No hemos partido de lo que otros escribieron, sino de lo que hemos vivido en el campo. Cada una de nuestras leyes es la síntesis de décadas de investigación en el INIVIT, de ensayos propios, de cosechas levantadas bajo el sol cubano y de fracasos que enseñaron más que los éxitos. Hemos escrito lo que hemos vivido, y eso, creemos, es lo que hace falta en la literatura del boniato.

Alguien podría preguntar cuánto tiempo tomó escribir este libro. La respuesta honesta es que se escribió en unos pocos meses. Pero la verdad más profunda es que se gestó durante una vida entera. Este libro no nació de una inspiración repentina; nació de la constancia, de la paciencia, del oficio de mirar la planta todos los días hasta aprender a escucharla. Es, en esencia, el resultado de una vida dedicada a entender el boniato.

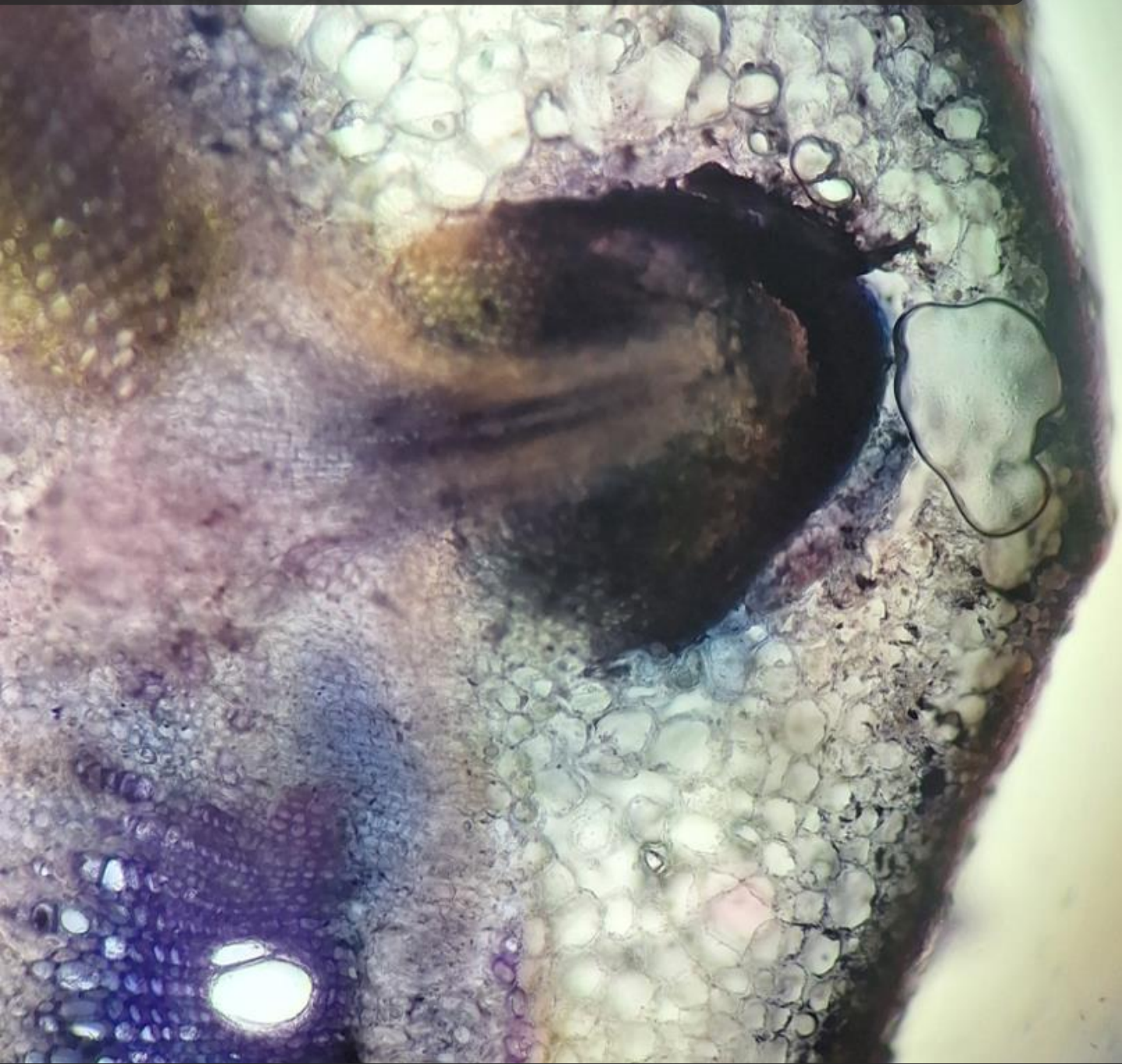
El Sistema del Boniato es, una herramienta de empoderamiento. El camino hacia las 50 toneladas por hectárea, ese número que durante años pareció un espejismo reservado para otros climas y otras tecnologías, está ahora despejado. No es una promesa, es una consecuencia. Solo requiere seguir las leyes que, en realidad, la planta ha estado esperando que cumplamos.

Bienvenido al sistema.



LEY 1

LA ANATOMÍA DEL RENDIMIENTO



Para cosechar boniatos, primero hay que entender cómo se forman. La planta los fabrica desde el primer día, y esa fábrica se activa o se arruina en la primera semana.

INTRODUCCIÓN

Esta primera ley no es teoría opcional. Es el principio rector que gobierna toda posibilidad de alto rendimiento. Comprenderla le permitirá no solo manejar el cultivo, sino predecir y diseñar su éxito desde el momento mismo de la plantación. Dominar esta anatomía es dominar el destino de su cosecha.

EL ORIGEN

Las raíces tuberosas que usted cosecha no brotan de semillas botánicas, sino que se construyen desde cero a partir de los tallos que planta. Este es un proceso de una precisión milimétrica. Imagine el tallo de boniato como un edificio con pisos (nudos). En cada piso, entre los tubos principales que suben agua (xilema) y bajan nutrientes (floema), existe una habitación especial de tejido blando (parénquima). Estas células son como obreros en reposo, con un potencial oculto.

Este nuevo equipo de células forma un pequeño cono de crecimiento (primordio radicular) que debe abrirse paso hacia el exterior. Para no dañar la estructura del tallo, secreta enzimas especiales que disuelven sutilmente la pectina que mantiene unidas a las células vecinas. Es una demolición quirúrgica. Así, la raíz adventicia emerge al suelo, lista para explorar y, potencialmente, convertirse en un boniato.

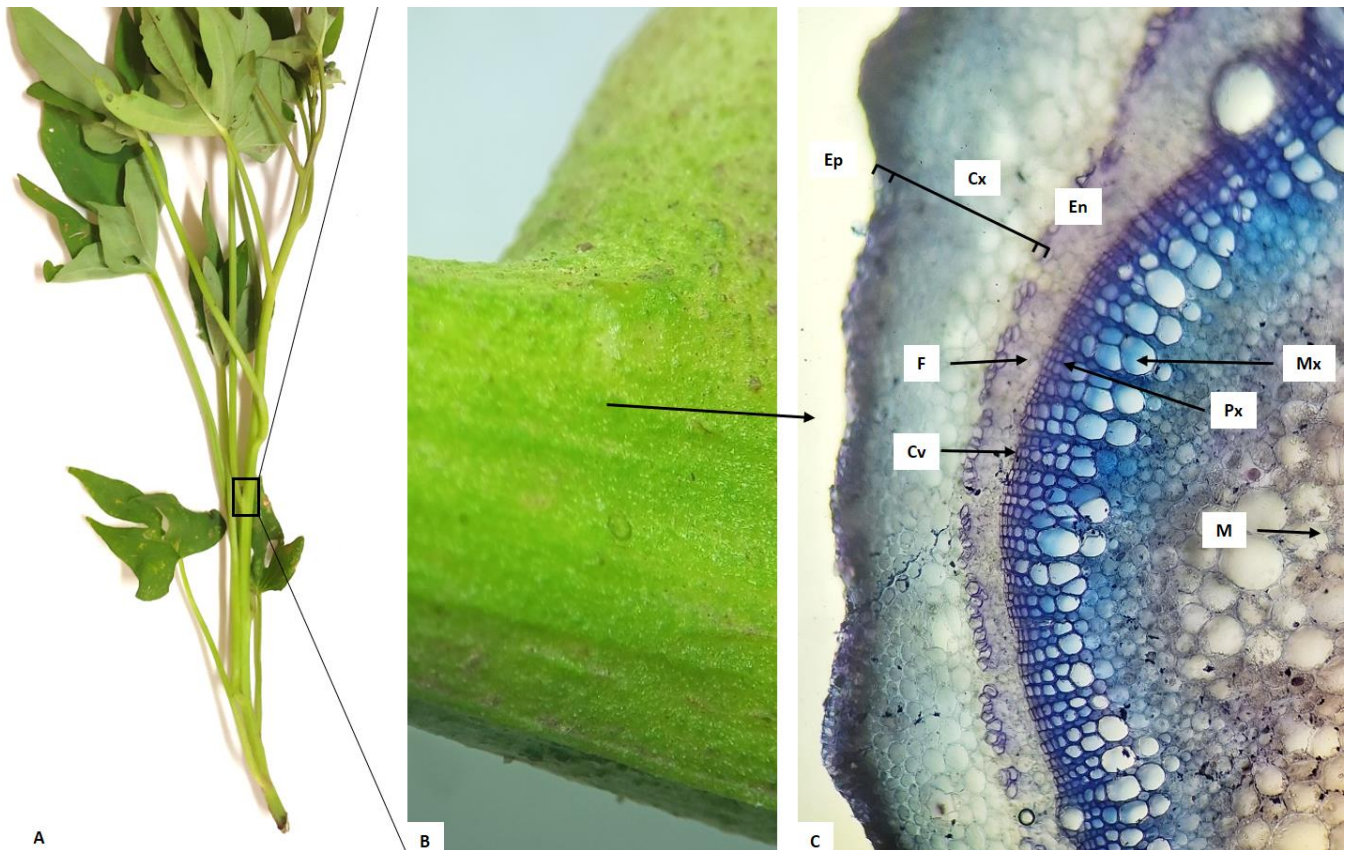
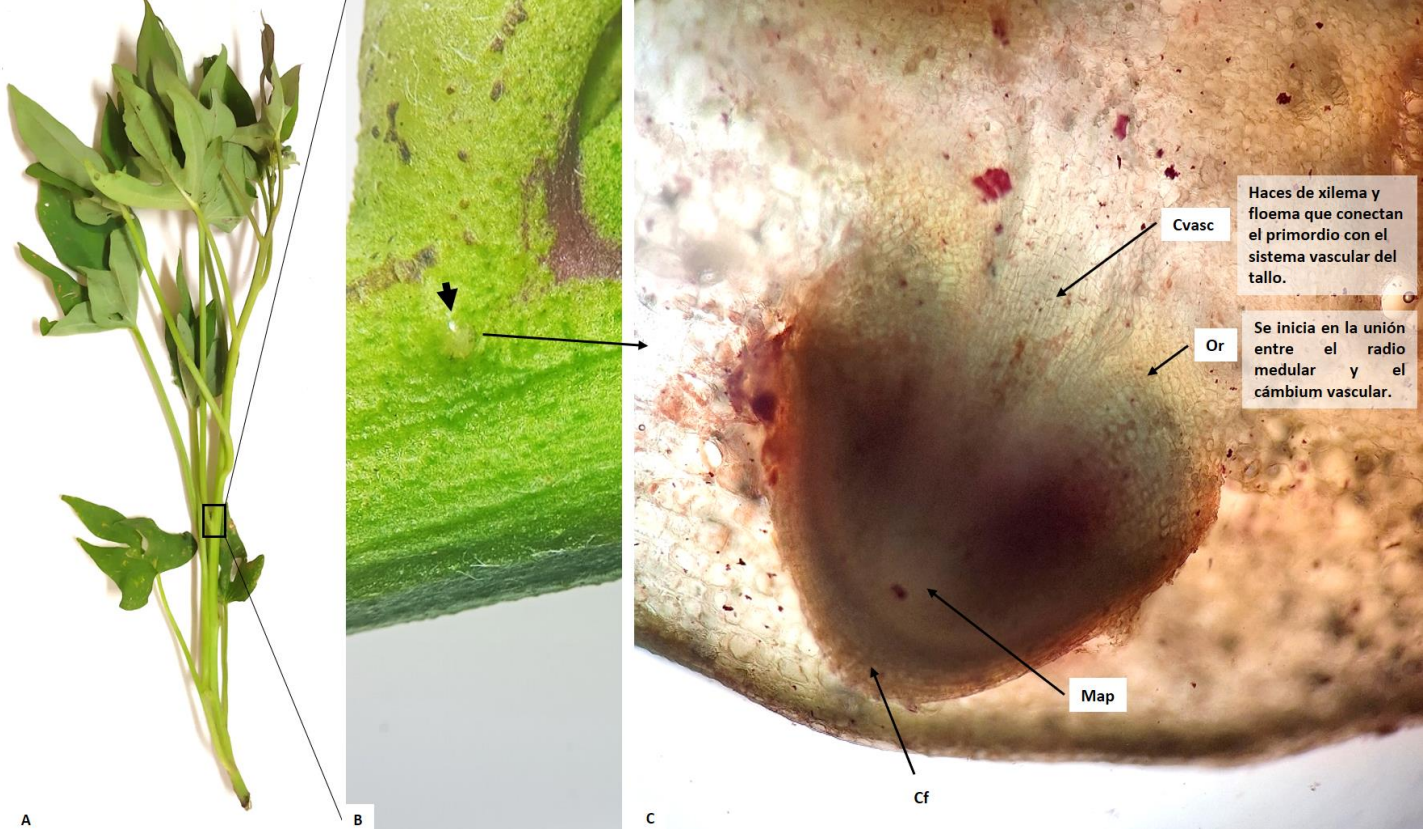


Figura 1.1. Anatomía del tallo de boniato. A: Esqueje de boniato de 30 cm de longitud; B: Detalle de un nudo sin formación de primordios radicales; C: Corte transversal del tallo a nivel de nudo, donde se aprecian las estructuras anatómicas clave para la formación de raíces adventicias. Abreviaturas: Ep = Epidermis; Cx = Corteza parenquimática; En = Endodermis; F = Floema; Cv = Cámbium vascular; Mx = Metaxilema; Px = Protoxilema; M = Médula.



Haces de xilema y floema que conectan el primordio con el sistema vascular del tallo.

Se inicia en la unión entre el radio medular y el cámbium vascular.

Figura 1.2. Formación de raíces adventicias en boniato. A: Esqueje de boniato; B: Detalle de un nudo con un primordio radical en inicio de emergencia; C: Corte transversal del tallo a nivel de nudo mostrando un primordio radical en desarrollo dentro del tejido cortical. Abreviaturas: Or = Origen del primordio (zona de iniciación en la unión del radio medular con el cámbium); Cvasc = Conexión vascular (haces que conectan el primordio con el sistema vascular del tallo); Map = Meristemo apical del primordio; Cf = Caliptra (cofia, cubierta protectora en el ápice del primordio).



Primordios radiculares emergiendo desde el espacio foliar del nudo, mediante división celular y secreción de enzimas que degradan la pared cortical.

Figura 1.3. Origen de las raíces adventicias en el tallo de boniato.

LA ARQUITECTURA QUE DICTA EL DESTINO

No todas las raíces que emergen se convertirán en raíces tuberosas (boniatos). Su destino se decide de forma extraordinariamente temprana e irreversible. Aproximadamente el 90% de las raíces tuberosas se desarrollan a partir de raíces adventicias que se forman en la primera semana después de la plantación. Esto significa que las primeras raíces que la planta emite determinan, en una proporción abrumadora, el techo máximo de rendimiento de esa planta.

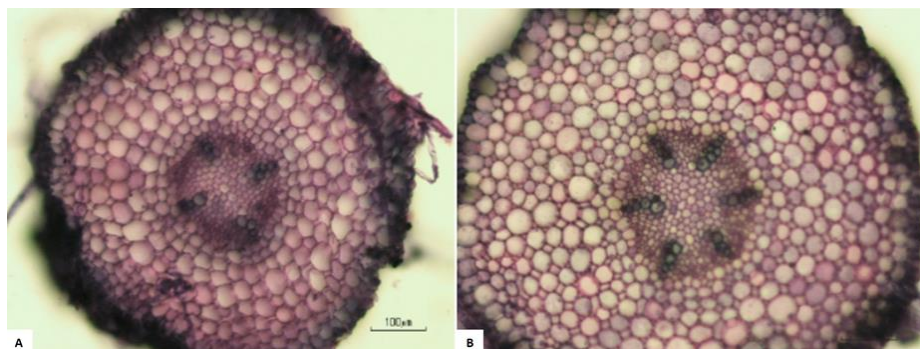
No es una exageración afirmar que la cosecha se juega en los primeros siete días. Si la planta no inicia bien su sistema radical en esta ventana crítica, ninguna práctica posterior podrá compensar por completo un potencial de rendimiento malogrado desde el origen.



Figura 1.4. Desarrollo del sistema radical a los 14 días después de la plantación. Se aprecia la abundancia de raíces fibrosas que ya han definido su arquitectura vascular.

El factor clave es el patrón de los vasos conductores de agua (xilema) en el centro de la raíz joven, conocido como la estela. Las raíces destinadas a ser finas y fibrosas (para absorber agua y nutrientes) forman una figura simple, típicamente con 2,3 y 4 puntos de xilema (diarca, triarca y tetarca). Las raíces con potencial para engrosar forman una figura más compleja, con 5, 6 o más puntos de xilema (pentarca, hexarca). Esta estructura compleja deja, entre los puntos de xilema, cuñas amplias de tejido parenquimático estelar. Este parénquima es el tejido con potencial meristemático; aquí es donde ocurrirá la magia de la tuberización.

Figura 1.5. Secciones transversales de raíces a los 10 días después de la plantación que muestran la arquitectura vascular. A: Estela tetarca (4 polos de xilema); B: Estela hexarca (6 polos de xilema). (Microfotografías adaptadas de: Dong, H.T. (2021).



LIGNIFICACIÓN

Aquí surge la gran amenaza: la lignificación. Este es el proceso por el cual la planta deposita lignina un polímero complejo, duro e impermeable en las paredes celulares. Es el mismo compuesto que endurece la madera de los árboles. Su función natural es brindar rigidez y defensa, pero cuando ocurre de forma prematura en el parénquima estelar, el efecto es catastrófico, la pared celular se rigidifica de forma irreversible. La célula pierde para siempre su capacidad de dividirse y expandirse, abortando su destino como célula de reserva. En esencia, una célula lignificada es una célula “muerta” para la tuberización.

La lignificación no es un evento aleatorio; es una respuesta programada de la planta a señales de estrés o desequilibrio. Identificar y evitar estos desencadenantes es gestionar activamente el rendimiento.

1. **Estrés por sequía.** Al detectar déficit hídrico, la planta prioriza la supervivencia. Lignifica los vasos del xilema para prevenir el colapso por embolias de aire y reduce la pérdida de agua. En el proceso, lignifica también el parénquima estelar circundante, sacrificando el potencial de almacenamiento por una mejor conducción y defensa.
2. **Altas temperaturas del suelo (>30°C).** El calor excesivo en la rizosfera acelera el metabolismo y la maduración o senescencia de los tejidos. La lignificación es parte de este proceso de maduración forzada, rigidificando prematuramente las paredes celulares de las raíces en desarrollo.
3. **Desequilibrios nutricionales.** Un exceso de nitrógeno, particularmente en forma nítrica (NO_3^-), promueve un metabolismo vegetativo exuberante. Esto puede incrementar la disponibilidad de precursores fenólicos para la ruta de la lignina y alterar el balance hormonal (mayor relación Auxina/Giberelina), inclinando la balanza hacia la diferenciación y lignificación en lugar de la división y expansión celular.
4. **Compactación del suelo (estrés mecánico).** La presión física constante sobre la raíz es interpretada como una señal para fortalecer sus tejidos. La planta responde depositando más lignina en las paredes celulares para resistir la presión, lo que anula irrevocablemente su plasticidad.

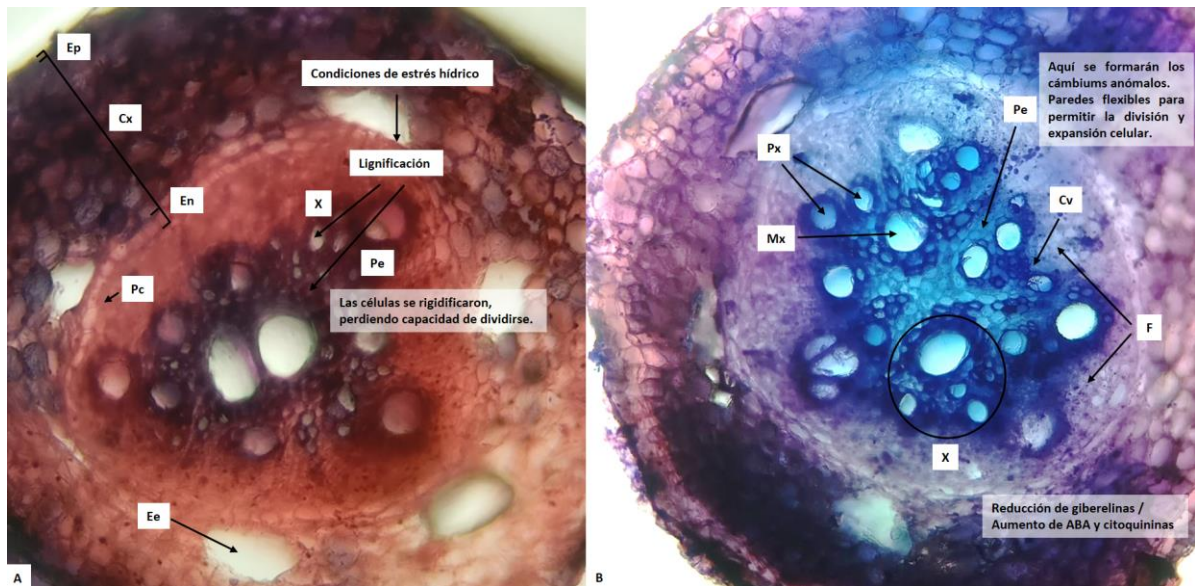


Figura 1.6. Cortes transversales de raíces adventicias de boniato a los 10 días después de la plantación, mostrando la arquitectura vascular que determina el destino productivo. A: Raíz sin potencial tuberoso (estrés hídrico). El centro está ocupado por metaxilema rodeado de células lignificadas (áreas oscuras). La ausencia de parénquima estelar impide la formación de cámbiums anómalos. Esta raíz está destinada a ser fibrosa; B: Raíz con potencial tuberoso (condiciones óptimas). Arquitectura hexarca. El centro está ocupado por parénquima estelar (tejido claro entre los polos de xilema). En este parénquima estelar se activarán los cámbiums anómalos, que producirán las células de almacenamiento que formarán la raíz tuberosa. Abreviaturas: Pc = Periciclo; Px = Protoxilema; Mx = Metaxilema; X = Xilema primario; Pe = Parénquima estelar; F = Floema primario; Cv = Cámbium vascular; Ep = Epidermis; En = Endodermis; Cx = Corteza; Ee = Espacios esquizegenos.

Una raíz con estructura tetrarca está condenada a ser fibrosa; una con estructura hexarca tiene el plano interno para convertirse en raíz tuberosa. El estrés ambiental temprano es el gran enemigo de la arquitectura compleja.



Figura 1.7. Destino del sistema radical a los 60 días después de la plantación, éxito vs. fracaso en la tuberización. A: Sistema radical con raíces tuberosas en desarrollo; B: Sistema radical completamente lignificado y sin raíces tuberosas.

La tuberización exitosa es un acto de supresión. El mayor riesgo no es que la raíz no engrose, sino que el tejido de almacenamiento se lignifique.

Varias semanas después de la plantación (entre los 25-35 días en variedades precoces), si todo va bien, las raíces con potencial anatómico dejan de alargarse y empiezan a engrosar. Este es el momento fisiológico más crítico del cultivo. La planta ejecuta un cambio hormonal preciso, reduce la síntesis de giberelinas (que promueven el alargamiento) y eleva los niveles de ácido abscísico (ABA) y citoquininas, redirigiendo todos los recursos hacia el crecimiento radial.

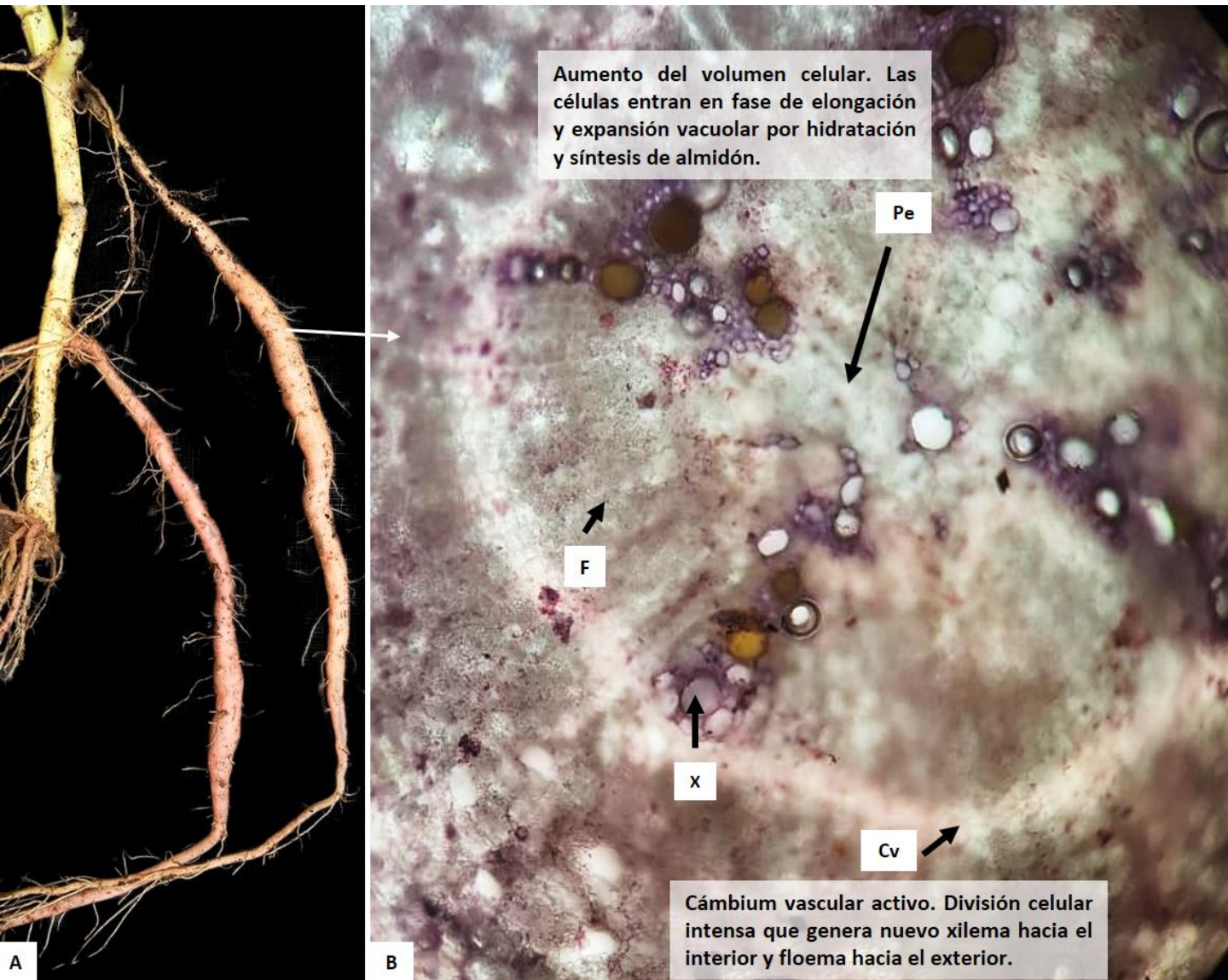


Figura 1.8. Desarrollo anatómico de una raíz tuberosa de boniato a los 30 días después de la plantación (ddp). A: Raíces engrosadas, mostrando un diámetro aproximado de 7 mm, característico del inicio de la fase de llenado; B: Corte transversal de la misma raíz, donde se observa una arquitectura pentarca bien definida. Se distinguen los polos de xilema alternados con el floema primario, amplias regiones de parénquima estelar y la capa del cámbium vascular que delimita el tejido vascular. Abreviaturas: X = Xilema; F = Floema; Pe = Parénquima estelar; Cv = Cámbium vascular.

EL ENGROSAMIENTO FINAL

Entre los 25-35 días después de la plantación, en las cuñas de parénquima estelar de estas raíces, se activan anillos concéntricos de células meristemáticas llamados cámbiums anómalos. Son fábricas dedicadas de células nuevas. Cada uno de estos pequeños cambiums produce nuevas células. Hacia el interior del anillo, generan más vasos de xilema. Hacia el exterior del anillo, producen la mayor parte del parénquima de almacenamiento, que es el tejido que se llena de almidón y hace que el boniato se vaya hinchando. Por eso, cuando la raíz está bien desarrollada (como en la Figura 1.9.B), los anillos de xilema ya no se ven como radios definidos, sino dispersos dentro de una masa grande de tejido de almacenamiento. Para que esta fábrica funcione, las paredes celulares de este tejido deben permanecer flexibles y plásticas.

Con los cámbiums anómalos activos, la raíz entra en la fase de llenado masivo. Este proceso se impulsa por dos fuerzas combinadas:

- Hiperplasia: Aumento en el número de células, gracias a la continua división en los anillos de los cámbiums anómalos.
- Hipertrofia: Expansión en el tamaño de cada célula hija. Estas células se transforman en bodegas de almacenamiento, hinchándose al absorber agua y llenar sus vacuolas y amiloplastos con gránulos de almidón.

Los azúcares (principalmente sacarosa) producidos en las hojas (la fuente) son transportados hasta la raíz (el sumidero). Aquí, una enzima clave, la Sacarosa Sintasa (SuSy), rompe la sacarosa de manera eficiente. Otra enzima fundamental, la ADP-Glucosa Pirofosforilasa (AGPasa), cataliza el paso limitante para la síntesis de almidón, ensamblando las unidades de glucosa en las largas cadenas que se acumulan.

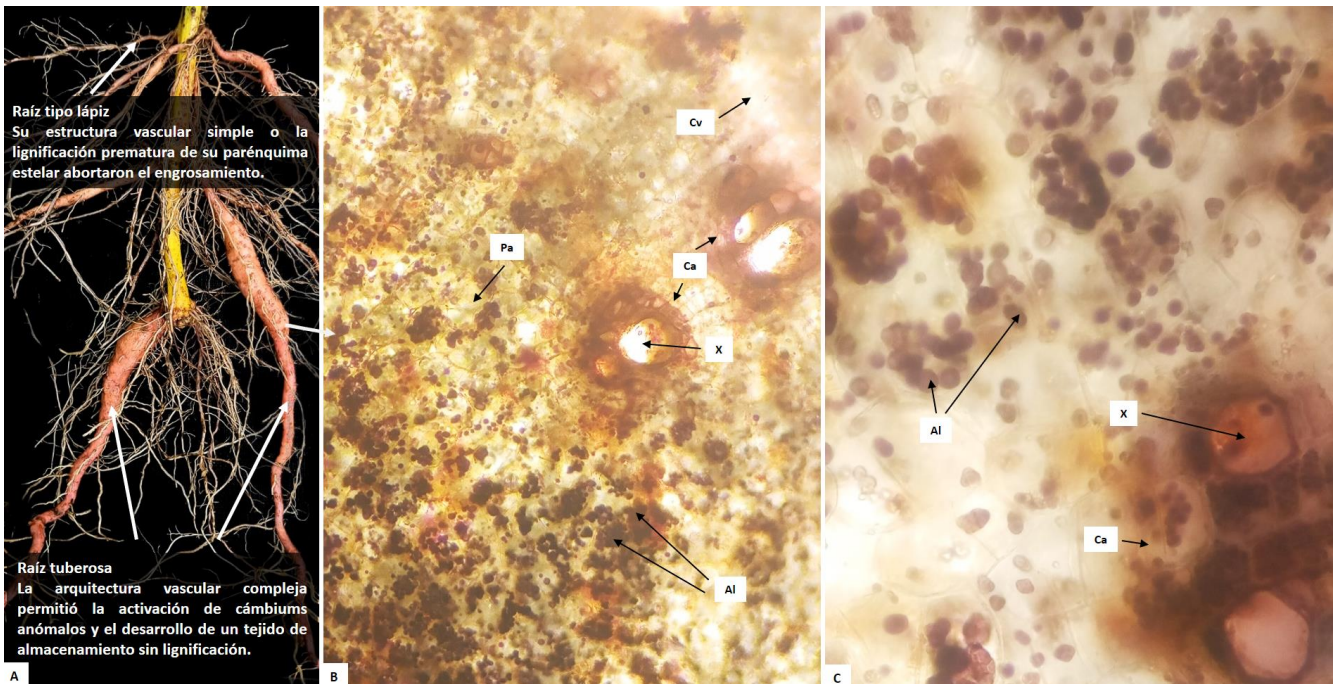


Figura 1.9. Expresión fenotípica y desarrollo anatómico de raíces tuberosas de boniato a los 50 ddp. A: Expresión fenotípica del potencial radical dentro de una misma planta; B: Corte transversal de una raíz completamente desarrollada, donde se observa que el xilema ya no mantiene una organización radial definida, sino que aparece disperso entre el abundante parénquima de almacenamiento; C: Ampliación de la región de los cámbiums anómalos, donde se distinguen claramente los anillos concéntricos de células meristemáticas. La tinción revela la acumulación de gránulos de almidón (puntos oscuros) en el parénquima estelar, evidencia del intenso llenado de la raíz. Abreviaturas: Cv = Cámbium vascular; Ca = Cámbiums anómalos; Pa = Parénquima de almacenamiento; Al = Gránulos de almidón.

APARTADO. CLARIFICACIÓN TERMINOLÓGICA ¿TUBÉRCULO O RAÍZ TUBEROSA?

Es común encontrar una confusión terminológica cuando se hace referencia a los órganos de almacenamiento de cultivos como la papa, el boniato, la yuca y el ñame. Aunque popularmente se les denomina “tubérculos” de manera indistinta, desde el punto de vista anatómico y fisiológico existen diferencias fundamentales que determinan su correcta clasificación y, lo que es más importante, su comportamiento en el campo y su respuesta a las prácticas de manejo y mejoramiento genético.

El boniato produce raíces tuberosas, no tubérculos. La distinción radica en su origen anatómico. Mientras que un tubérculo verdadero, como el de la papa o el ñame, se origina a partir de un tallo subterráneo modificado (un estolón en papa, un hipocotilo engrosado en ñame), la raíz tuberosa del boniato se desarrolla a partir de una raíz adventicia verdadera. Esta diferencia de origen tiene consecuencias anatómicas profundas. En un tubérculo (papa, ñame), la estructura interna conserva características de un tallo, presencia de yemas (ojos) dispuestas en espiral en la papa o en la corona del ñame, haces vasculares organizados en un anillo o dispersos según la familia botánica, y una médula central bien definida. En cambio, la raíz tuberosa del boniato presenta una arquitectura radical típica, una estela con múltiples polos de xilema, sin yemas preformadas en su superficie (las yemas preformadas están en los tallos), y su tejido de almacenamiento se origina por la actividad de cámbiums anómalos que producen parénquima a partir del parénquima estelar original. Sin embargo, conserva una notable capacidad para formar yemas adventicias a partir de células del parénquima o del peridermo, lo que le permite brotar cuando se planta una raíz tuberosa.

Fisiológicamente, la diferencia también es crucial. En la papa, la tuberización es inducida por una señal fotoperiódica que viaja desde la hoja (proteína FT) y actúa sobre un estolón, un tallo especializado. En el boniato, el proceso ocurre sobre una raíz joven que ya ha establecido su arquitectura vascular. Esto explica por qué, a diferencia de la papa, la raíz tuberosa del boniato puede brotar si se planta, no por tener yemas preformadas, sino porque conserva una excepcional plasticidad meristemática en su peridermis y parénquima, que le permite desdiferenciar células y organizar nuevas yemas adventicias. Por el contrario, en la yuca, también productora de raíces tuberosas (preferiblemente raíces reservantes), estas han perdido completamente esa capacidad de brotar. Esto se debe a una mayor especialización hacia el almacenamiento y a una lignificación más temprana de los tejidos, que sella su destino como órgano terminal sin capacidad regenerativa. Lo que demuestra que incluso dentro de las raíces tuberosas existen variaciones funcionales.

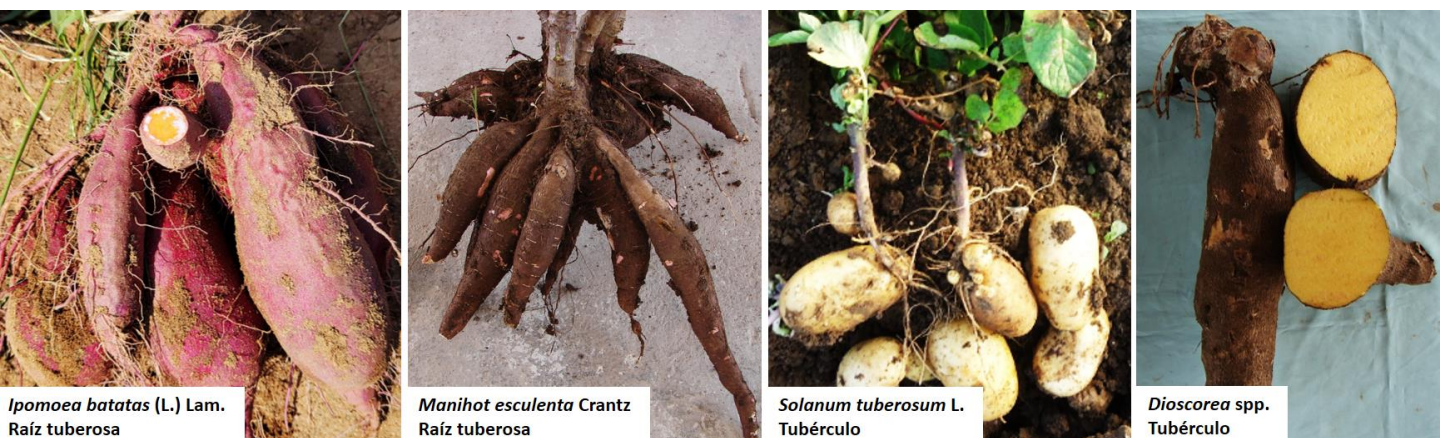


Figura 1.10. Diversidad de órganos de almacenamiento en cultivos tropicales.

LEY 2

EL CALENDARIO FISIOLÓGICO



Sincronice sus labores con el reloj interno de la planta para multiplicar la eficiencia. El tiempo de la planta es el recurso más valioso; sincronícese con él.

INTRODUCCIÓN

Para lograr altos rendimientos en boniato, es fundamental conocer a fondo la planta que cultivamos. Esto trasciende el mero conteo de días a cosecha; significa comprender su reloj interno, las etapas predecibles de su crecimiento y las señales que emite en el campo. Este conocimiento, es lo que transforma al agricultor de un ejecutor de labores en un estratega del cultivo, capaz de anticiparse y tomar decisiones en el momento fisiológicamente preciso.

La vida del boniato, desde la plantación del esqueje hasta la cosecha de las raíces tuberosas, se despliega en tres fases fenológicas claramente diferenciadas: Enraizamiento, Crecimiento y Acumulación.

Este cultivo obedece a un calendario fisiológico trifásico.

La duración e inicio de cada fase varían según el tipo de variedad. En Cuba, las clasificamos por su ciclo:

| Tipo de variedad | Ciclo | Inicio de la tuberización |
|------------------|----------------|---|
| Precoces | 4 meses | 25-30 días después de la plantación (ddp) |
| Intermedias | 4-6 meses | 40-50 ddp |
| Tardías | Más de 6 meses | Más de 60 ddp |

La diferencia fundamental entre estos tipos radica en un evento crítico: **el inicio de la tuberización**. Conocer este dato de su variedad es la clave maestra para ajustar todo el plan de manejo.

FASE I. ENRAIZAMIENTO (0 – 25/30 ddp)

Esta fase abarca desde la plantación hasta el inicio visible de la tuberización. Es la ventana de acción más influyente en todo el ciclo, pues aquí se define y fija irreversiblemente el techo máximo de rendimiento de la planta. El éxito de las fases siguientes depende de lo que se logre en estas primeras semanas.

La planta ejecuta el programa descrito en la Ley 1, la emisión de raíces adventicias desde los nudos y la determinación irrevocable de su arquitectura vascular interna. Este es el momento en que se fabrica la materia prima del rendimiento: las raíces con potencial poliarca. Hacia el final de esta fase (25-30 ddp en precoces), esas raíces iniciarán el cambio hormonal que precede al engrosamiento.

El crecimiento aéreo es modesto (prendimiento, primeras hojas). En primavera-verano (suelo a 22-28°C) el proceso es rápido. En invierno, el frío ralentiza el metabolismo, pudiendo extender esta fase 10-15 días o más. Planificar la plantación con la curva térmica es una decisión estratégica.

El objetivo es crear un ambiente radical ideal. Esto significa suelo siempre húmedo (sin encharcar), suelto y bien drenado, y cálido. Cualquier estrés (sequía, compactación) durante esta ventana promoverá la formación de raíces tetrarcas (fibrosas) sobre las hexarcas, reduciendo irreversiblemente el número potencial de sitios de tuberización.

Control de Malezas

El boniato joven no compite. Se debe llegar al cierre del surco (40 ddp) con el campo limpio.

| Estrategia | Momento |
|----------------|---|
| Primera limpia | 10 ddp |
| Segunda limpia | 20-25 ddp |
| Herbicidas | Preemergentes para un respiro limpio inicial; postemergentes selectivos si es necesario |

En la fase de Enraizamiento, la prioridad ABSOLUTA es el establecimiento radical sin estrés. Cualquier competencia por agua, nutrientes o espacio físico, o cualquier condición que induzca estrés (sequía, compactación), limitará irreversiblemente el rendimiento.



Figura 2.1. Éxito en la fase de enraizamiento, campo de boniato limpio antes del cierre del follaje. Las dos limpieas oportunas garantizan que el cultivo joven no compita con malezas en su etapa más vulnerable.

FASE II. CRECIMIENTO (25/30 - 80/90 ddp)

Esta fase abarca desde el inicio de la tuberización hasta que la planta alcanza su máxima cobertura foliar y área fotosintética. Es el período de mayor demanda fisiológica y de recursos, donde la planta despliega todo el potencial definido en la Fase I. Aquí, el manejo debe pasar de proteger a sostener y potenciar un crecimiento explosivo.

La planta inicia un crecimiento dual sincronizado de alta precisión. Bajo tierra, las raíces con arquitectura poliarca activan sus cámbiums anómalos, iniciando la división celular masiva que marca el engrosamiento activo. En superficie, ocurre una explosión vegetativa para construir la infraestructura fotosintética que alimentará dicho engrosamiento. Este desarrollo se manifiesta en tres indicadores clave medibles:

1. Expansión foliar acelerada, con áreas que pueden superar los 180 dm² por planta.
2. Alargamiento vigoroso de tallos, con tasas de hasta 1 cm por día.
3. Estabilización del número de tallos secundarios, definiendo la arquitectura final de la variedad (de 8-20 tallos en dependencia de la variedad).

Esta sincronía no es casual, la planta debe alcanzar su máxima capacidad de interceptar luz y producir azúcares precisamente cuando las raíces inician su demanda máxima de asimilados para convertirlos en almidón. Por ello, en esta fase se produce el mayor incremento porcentual en la materia seca de la raíz (de ≈16% a ≈26%), evidenciando la intensa acumulación de reservas.

El cultivo logra la cobertura total del suelo (cierra el surco), observándose diferencias entre variedades, debido a su arquitectura aérea (tipo de hoja y hábito de crecimiento). Al escarbar suavemente, se confirma el engrosamiento radial firme y constante de las raíces.

El manejo en esta fase tiene un objetivo claro: sostener este crecimiento dual sin inducir estrés, guiando los recursos hacia la raíz.

- Riego: Período de máxima demanda. Cualquier déficit hídrico no solo frena el crecimiento, sino que activa señales de estrés (como el etileno) que promueven la lignificación en las raíces en desarrollo, arruinándolas. El riego debe ser abundante y regular.
- Nutrición: Balance estratégico. Se requiere incrementar el aporte de potasio. Este elemento actúa como activador central de las enzimas (Sacarosa Sintasa, AGPasa) que gobiernan el transporte y conversión de azúcares en almidón dentro de la raíz.
- Protección Fitosanitaria: Vigilancia extrema. La cobertura densa crea un microclima favorable para plagas y enfermedades foliares. El monitoreo constante y el control integrado son esenciales para proteger el aparato fotosintético.

En la fase de Crecimiento, el manejo debe SOSTENER el desarrollo dual (follaje y raíz). El riego es crítico para evitar estrés.



FASE III. ACUMULACIÓN (80/90 ddp - Cosecha)

Esta fase inicia cuando el follaje alcanza su máximo desarrollo y se extiende hasta la maduración comercial, culminando alrededor de los 120 días en variedades precoces. Es la etapa donde la prioridad fisiológica cambia radicalmente de crecer a madurar y concentrar.

La dinámica fisiológica da un giro definitivo:

1. Cese del crecimiento vegetativo: El área foliar máxima (alcanzada entre 80-90 ddp) disminuye entre un 25-30%. El alargamiento de tallos se detiene significativamente. Esto no es deficiencia; es senescencia programada.
2. Llenado masivo de la raíz: La planta redirige casi el 100% de los fotoasimilados hacia las raíces ya formadas. En las últimas 3-4 semanas (de 90-120 ddp), **se acumula entre el 30-40% del rendimiento total final**. Cosechar antes es dejar un tercio del potencial en el campo.
3. Maduración y calidad: El porcentaje de materia seca, que tuvo su mayor incremento en la Fase II, se estabiliza (aumentos de sólo 0.5-2%). Los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) también se mantienen estables, señal de que la raíz ha alcanzado su madurez interna.

En la mayoría de las variedades, el engrosamiento final agrieta la tierra superficialmente, lo que tiene una implicación crítica para el manejo de plagas.



Figura 2.2 Manifestación externa de la Fase de Acumulación. A: Cierre total del dosel por el follaje, en horas de la tarde, es común observar un ligero marchitamiento de las hojas debido a la alta tasa de transpiración, fenómeno que se revierte durante la noche; B: Grietas superficiales en el camellón, típicas del engrosamiento final de las raíces tuberosas; D: Planta mostrando raíces tuberosas bien formadas.

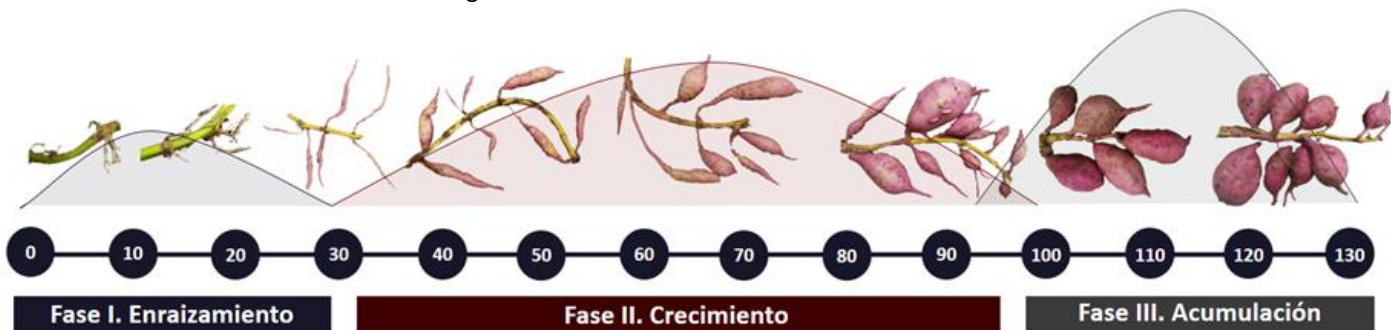
En la fase de Acumulación, el manejo debe CONDUCIR la maduración. La reducción controlada del riego es la práctica más importante para la calidad.

- Riego: Se debe disminuir de forma controlada dos semanas antes de la cosecha. Esto frena la planta, concentra azúcares, aumenta la materia seca y cura la piel del boniato, mejorando su calidad y conservación poscosecha.
- La Decisión Estratégica de Cosecha:
 - o Escenario ideal (Baja presión de plaga): Se cosecha al final del ciclo (120 ddp), maximizando el llenado.
 - o Escenario de riesgo (Alta presión de plaga): Puede ser racional anticipar ligeramente la cosecha para salvar la producción de daños irreversibles, aun sacrificando parte del potencial de llenado.

En la fase de Acumulación, el manejo debe CONDUCIR la maduración. La reducción controlada del riego es la práctica más importante para la calidad.



Figura 2.3. Secuencia del desarrollo radical, desde la plantación (día 0) hasta la madurez (día 128). Se observa la evolución del sistema radical a lo largo de las tres fases.



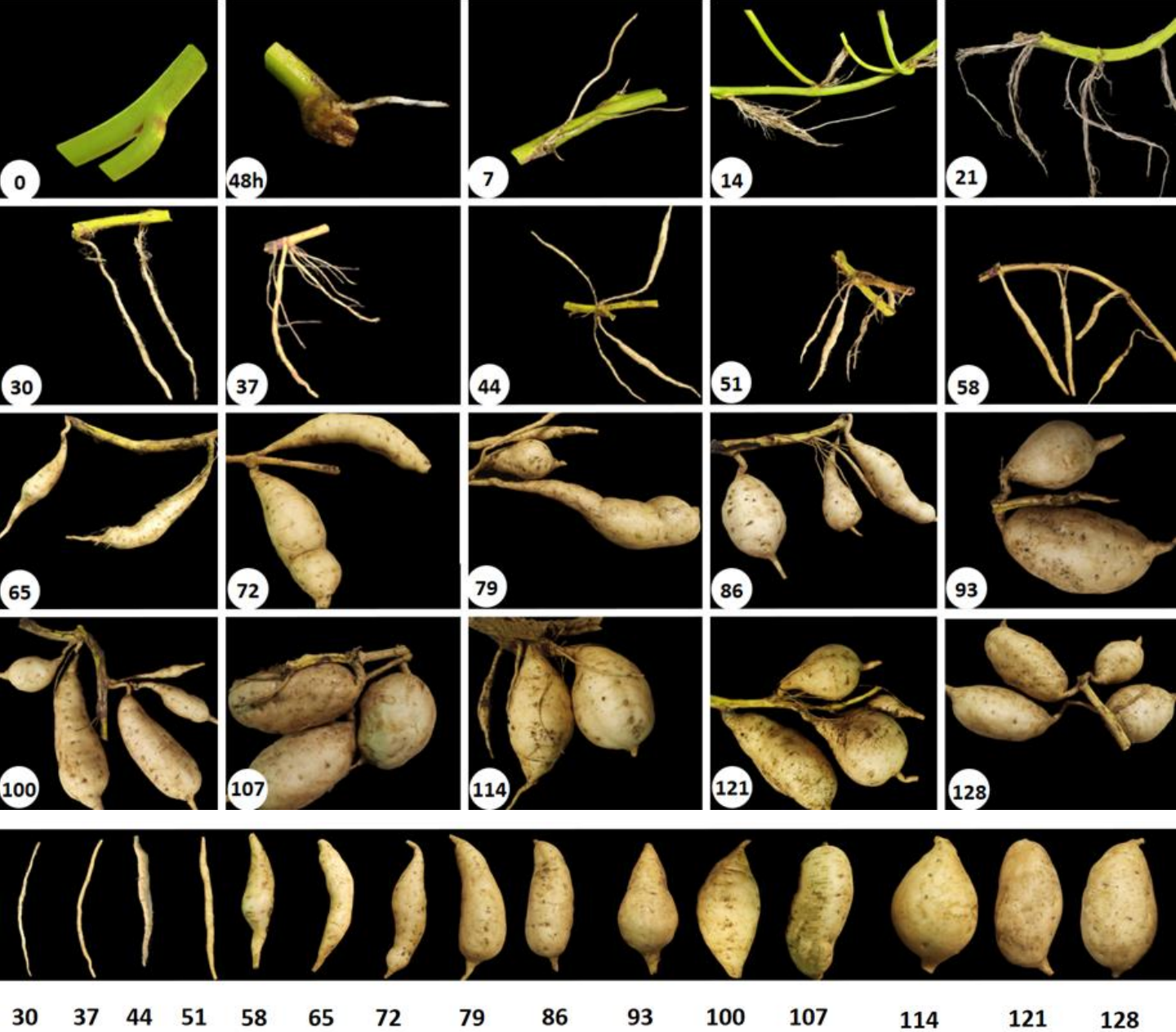


Figura 2.4. Secuencia del desarrollo radical, desde la plantación (día 0) hasta la madurez (día 128). Se observa la evolución del sistema radical a lo largo de las tres fases.

El calendario fisiológico es su estrategia maestra. Conocer en qué fase está su cultivo le dice no solo qué hacer, sino por qué y, lo más importante, qué NO hacer. El tiempo de la planta es el recurso más valioso; sincronícese con él.



LEY 3

EL CAMINO BIFURCADO (VICIO O ALMACENAMIENTO)

Cómo el boniato elige entre dos destinos: crecimiento vegetativo estéril o tuberización productiva.

INTRODUCCIÓN

Esta ley revela la decisión más crítica que toma la planta de boniato, crecer vegetativamente de forma estéril ("vicio") o destinar sus recursos a la formación de raíces tuberosas. Esta elección no es aleatoria; es una respuesta fisiológica programada a señales ambientales precisas que el productor puede y debe manejar. Comprender este mecanismo es la clave para transformar el temido "vicio" en una cosecha abundante.

EL INTERRUPTOR AMBIENTAL

El boniato posee una termo-sensibilidad extrema que dicta su ciclo. Su crecimiento vegetativo visible (elongación de tallos, expansión foliar) se detiene completamente a 15°C y sufre daños irreversibles por exposiciones prolongadas bajo los 12°C (temperatura base). Para un desarrollo satisfactorio requiere un rango diurno entre 20-35°C. Sin embargo, los rendimientos máximos exigen una precisión climática superior: temperaturas diurnas óptimas de 25-28°C y, crucialmente, nocturnas entre 17-20°C.

Esta amplitud térmica día-noche es un regulador fisiológico maestro. Las noches dentro de este rango óptimo (17-20°C) realizan dos funciones esenciales: reducen drásticamente la respiración de mantenimiento (la "pérdida" nocturna de carbohidratos) y, lo más importante, favorecen al máximo la velocidad de translocación de azúcares desde las hojas (fuente) hacia las raíces (sumidero).

La relación entre temperatura y tuberización, sin embargo, no es lineal. Existe una paradoja aparente que es fundamental para el manejo del cultivo:

- Mientras que el crecimiento general de la planta se frena a 15°C, la partición de fotoasimilados hacia la raíz puede optimizarse en un rango de temperaturas ambientales que se extiende incluso hasta los 15°C, especialmente si la temperatura del suelo se mantiene más cálida (alrededor de 20°C). En estas condiciones, la planta, aunque con un crecimiento foliar muy lento, redirige casi toda su energía fotosintética limitada hacia el llenado del sumidero principal, la raíz tuberosa.
- El efecto contrario es igualmente determinante y más nocivo para el rendimiento, temperaturas del aire sostenidas por encima de los 29°C no solo elevan la respiración, sino que comienzan a inhibir específicamente la tuberización, desviando la prioridad metabólica hacia un desarrollo vegetativo excesivo (follaje denso) en detrimento del crecimiento de las raíces tuberosas.

La combinación de días largos (primavera-verano) y noches cálidas (>24°C) activa el programa genético de crecimiento vegetativo. La combinación de días acortándose y noches frescas (17-20°C) activa el programa de almacenamiento en la raíz.



EL FENÓMENO DEL "VICIO"

El "vicio" es la manifestación agronómica de un grave desbalance fisiológico programado. No es una enfermedad, sino la respuesta natural de la planta a un conjunto de señales ambientales que le indican, erróneamente, que debe priorizar la expansión sobre el almacenamiento.

El mecanismo se desencadena cuando la fase crítica de la tuberización (a partir de los 60 días) coincide con un ambiente de días largos y noches muy cálidas ($>25^{\circ}\text{C}$), a menudo agravado por un exceso de nitrógeno en el suelo. Esta combinación es interpretada por la planta como la señal de una estación de crecimiento larga y favorable, activando un cambio dramático en su química interna:

1. Se sintetizan masivamente Giberelinas (GAs), que actúan como la orden directa de CRECER VEGETATIVAMENTE. Promueven el alargamiento de tallos, la producción de hojas y mantienen los meristemas en un estado juvenil de crecimiento.
2. Simultáneamente, se suprime el Ácido Abscísico (ABA), la hormona clave para la tuberización y la respuesta al estrés. Las órdenes genéticas de ALMACENAR quedan silenciadas.
3. Con este comando hormonal alterado, el flujo de carbohidratos se redirige. Los ápices de los tallos, hiperactivos por las GAs, se convierten en sumideros metabólicos insaciables, atrayendo casi la totalidad de los azúcares. Las raíces en formación quedan sin suministro y los mecanismos bioquímicos para almacenar almidón se desactivan.

El resultado en el campo es una planta de apariencia exuberante, con follaje denso y guías largas, que al ser cosechada solo presenta raíces delgadas, fibrosas y sin engrosamiento (raíces lápiz). Es la imagen misma de la energía malgastada.



Figura 3.1. Manifestación agronómica del fenómeno del vicio en boniato. Plantas con follaje exuberante y guías largas, aparentemente vigorosa y sistema radical al momento de la cosecha, mostrando raíces delgadas y sin engrosamiento, producto del secuestro de recursos por los ápices vegetativos.

El vicio es un secuestro hormonal de los recursos. Las giberelinas, inducidas por calor nocturno y días largos, desvían los azúcares hacia los ápices de los tallos, robándoselos a las raíces y abortando la tuberización.

FISIOLOGÍA DEL ALMACENAMIENTO EFICIENTE

El camino alternativo y productivo se activa cuando las señales ambientales son las correctas. Una plantación estratégica asegura que la fase de máximo llenado radical coincida con noches frescas (17-23°C) y días que comienzan a acortarse (otoño). Este escenario genera el balance hormonal opuesto:

- Reducción de giberelinas (GAs): Disminuye la señal de crecer.
- Aumento de señales de almacenamiento: Se favorece la acción del ácido abscísico (ABA) y de las citoquininas, hormonas que inducen la división celular en la raíz y la movilización de asimilados.

Con este comando interno correcto, se produce el acoplamiento eficiente entre la fuente y el sumidero. La potente fábrica fotosintética construida durante el verano, en lugar de ver sus productos respirados en noches calurosas o secuestrados por los tallos, los envía de forma masiva hacia las raíces. Allí, el potasio actúa como el activador maestro de las enzimas (Sacarosa Sintasa, AGPasa) que convierten esos azúcares en almidón, llenando las células de las raíces que ya poseían la anatomía adecuada desde la primera semana.

PROTOCOLO DE RESCATE PARA UN CAMPO EN "VICIO"

Si durante el monitoreo (alrededor de 60 días) se observan los síntomas clásicos del vicio, crecimiento vegetativo excesivo y ausencia de engrosamiento radial en las raíces escaradas, se debe actuar con decisión y rapidez para rescatar parte del potencial productivo. El objetivo no es revertir el proceso, sino reorientar con un *shock* controlado la fisiología de la planta hacia el almacenamiento.

Interrupción del riego: La medida más inmediata y efectiva es suspender completamente el riego por un período de 15 días, dependiendo del tipo de suelo y las condiciones climáticas. Este estrés hídrico moderado induce la síntesis de ácido abscísico (ABA), la hormona del estrés que, paradójicamente, también es una potente señal para la iniciación y el llenado de órganos de reserva. Al limitar el agua, se frena drásticamente el crecimiento vegetativo impulsado por las giberelinas y se fuerza a la planta a redirigir los recursos disponibles hacia las raíces.

Poda de guías: Una práctica común entre algunos productores ante un campo que se va en vicio es el llamado aporreo, que consiste en golpear las guías con palos con la intención de frenar su crecimiento. Esta práctica es errónea y debe evitarse. Los golpes causan heridas desgarradas y magulladuras extensas en los tallos, que se convierten en puertas de entrada para enfermedades y dañan el sistema vascular de la planta. El estrés extremo que genera hace que la planta dedique toda su energía a reparar el daño tisular, desviando recursos de la ya comprometida tuberización y agravando el problema. La técnica correcta es una poda limpia y selectiva. Para ejecutarla se debe utilizar un machete bien afilado. El objetivo no es destruir el follaje, sino eliminar estratégicamente los puntos de crecimiento que consumen los recursos. Se debe cortar cada guía, realizando un tajo limpio a aproximadamente un tercio de su longitud total desde la punta. De este modo se remueven los meristemas apicales hiperactivos de hormonas de crecimiento vegetativo, sin dañar excesivamente las hojas maduras que aún son necesarias para la fotosíntesis.

Aplicación foliar de potasio y boro: Inmediatamente después de la poda, aplicar vía foliar una solución de alta concentración de potasio (K) y boro (B). El potasio, como se ha establecido, activa las enzimas del llenado. El boro es crucial para la integridad de las paredes celulares y la translocación de azúcares. Esta aplicación busca fortalecer bioquímicamente las raíces en formación para que sean sumideros más eficientes y competitivos una vez se reanude el riego.

LEY 4

EL CALENDARIO PRODUCTIVO

No se planta para el clima del mes de siembra, sino para el clima que gobernará la fase crítica 60 días después.

INTRODUCCIÓN

Esta ley traduce el conocimiento fisiológico de la Ley 3 en una herramienta de decisión práctica y contundente, la elección estratégica de la fecha de plantación. En Cuba y el Caribe, una de las grandes ventajas del boniato es su adaptabilidad para ser plantado durante todo el año. Sin embargo, esta flexibilidad es una espada de doble filo, aunque variedades mejoradas con alta estabilidad fenotípica mantienen rendimientos aceptables, las variedades tradicionales y muchos genotipos comunes ven su potencial severamente limitado por la época de plantación, con diferencias que pueden superar el 25% entre la mejor y la peor fecha.

LA PARADOJA PRODUCTIVA

Los resultados del INIVIT presentan una paradoja aparente, agosto y los meses inmediatos que le siguen, aun siendo cálidos en el Caribe, se coronan sistemáticamente como la mejor ventana de plantación, alcanzando rendimientos máximos de 52.2 t/ha. Esta paradoja se resuelve con un principio clave: **no se planta para el clima del mes de siembra, sino para el clima que gobernará la fase crítica 60 días después.**

Al plantar en esta ventana con un ciclo de 120 días, la fase de tuberización activa y engrosamiento masivo (aproximadamente de los 60 a los 120 días después de la plantación) ocurre entre mediados de octubre y finales de noviembre o diciembre. Este es el factor decisivo. Mientras que los primeros meses pueden tener noches cálidas (24-26°C promedio), el período en el que la planta más necesita eficiencia fisiológica coincide con el descenso óptimo de las temperaturas nocturnas a rangos entre 20-23°C, e incluso menos en algunas regiones de Cuba. Plantar en esta época es como programar la etapa vegetativa del cultivo para los días largos y cálidos que favorecen el desarrollo del follaje, y reservar su adultez productiva (tuberización) para los días más cortos y las noches frescas del otoño, que silencian el programa del vicio y activan el del almacenamiento.

Esta sincronía crea una ventana fisiológica perfecta. En los primeros 60 días (agosto-septiembre), la planta aprovecha los días aún largos y luminosos para establecer un dosel foliar extenso y vigoroso, construyendo así una fábrica de asimilados poderosa. Luego, cuando esta fábrica debe operar a máxima capacidad, el ambiente otoñal activa el modo almacenamiento, las noches frescas reducen drásticamente las pérdidas por respiración y, simultáneamente, favorecen la translocación eficiente y las señales hormonales que priorizan el llenado de la raíz.

La plantación de agosto es óptima porque desplaza estratégicamente el llenado de la raíz al otoño. Es el ejemplo perfecto de plantar pensando en el clima que la planta encontrará 60 días después.



EL MAPA ANUAL DEL RENDIMIENTO

La capacidad de plantar boniato durante los doce meses del año es una ventaja logística para Cuba, pero el potencial productivo no es uniforme. Los datos experimentales del INIVIT revelan una variación clara y predecible, permitiendo trazar un mapa de rendimiento relativo (tomando agosto como referencia del 100%):

ÉPOCA ÓPTIMA (AGOSTO - FEBRERO): RENDIMIENTO DEL 93% AL 100%

La plantación en esta ventana asegura que la tuberización ocurra en otoño e invierno. Las noches frescas garantizan un balance fisiológico virtuoso, alta fotosíntesis, baja respiración y señales hormonales que dirigen los recursos a la raíz tuberosa.

ÉPOCA DE ALTO RIESGO (MARZO - JUNIO): RENDIMIENTO DEL 74% AL 78%

La plantación en primavera hace que la fase crítica coincida inevitablemente con el verano. Las noches calurosas (>24°C) disparan las pérdidas por respiración y, lo que es peor, activan las señales hormonales del vicio, desviando la energía al crecimiento vegetativo.

Punto Crítico del Año: Mayo (74.5% - 38.9 t/ha). Es el mes de mayor riesgo de envejecimiento y menor rendimiento absoluto.

PERÍODO DE TRANSICIÓN (JULIO): RENDIMIENTO DEL 87%

Una plantación a finales de julio comienza a escapar estratégicamente del pico del calor estival. Una parte importante del engrosamiento ya se beneficia del inicio del descenso térmico nocturno.

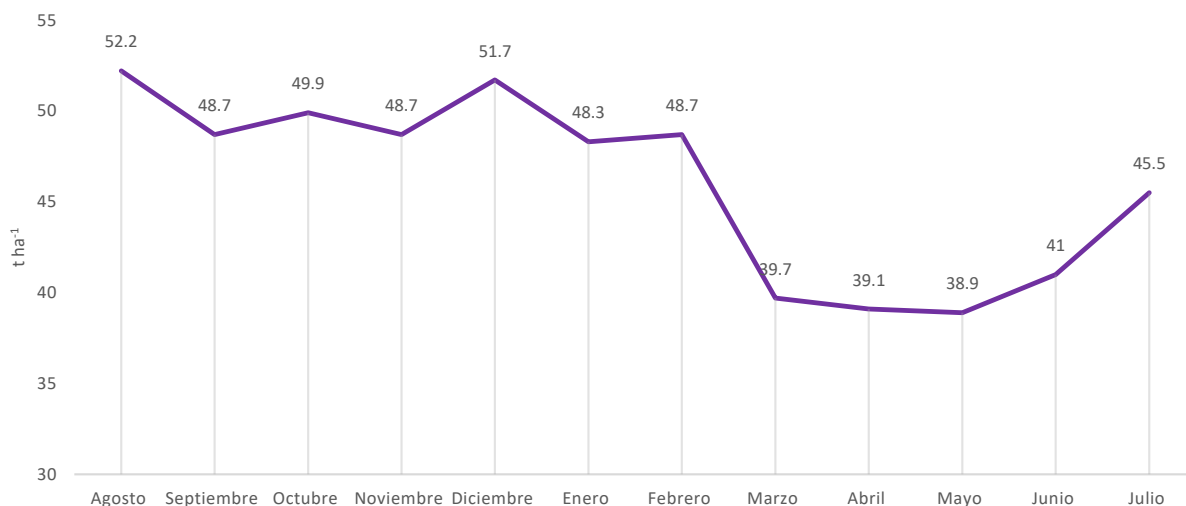


Figura 4.1. Ritmo anual del rendimiento, variación mensual del potencial productivo del boniato en el Caribe. La curva muestra el pico en agosto (52.2 t ha⁻¹) y el punto crítico en mayo (38.9 t ha⁻¹), con una diferencia de más de 13 toneladas entre la mejor y la peor época.

En términos económicos y prácticos, esta variación es abismal. Un productor que planta en mayo puede estar resignando más de 13 toneladas por hectárea respecto a quien planta en una época de menos riesgo.

Plantar entre marzo y junio, especialmente en mayo, significa aceptar una merma fisiológica inevitable de entre el 22% y el 26% del rendimiento potencial. Esta pérdida no es por mal manejo, sino un impuesto climático sobre la fisiología de la planta.

ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN (PARA SIEMBRAS FUERA DE LA ÉPOCA ÓPTIMA)

Elección varietal inteligente: En esta ventana, la genética es la primera línea de defensa. Se debe priorizar el uso de cultivares con tolerancia intrínseca al calor nocturno y baja sensibilidad a la inducción del vicio, como 'INIVIT B2-2005' o 'INIVIT B-50'. Estas variedades poseen una arquitectura hormonal más estable que les permite mantener una mejor partición de asimilados hacia la raíz incluso bajo señales ambientales adversas.

Ajuste de la densidad de plantación: Con una menor tasa de tuberización y un tamaño potencial de raíz reducido por el estrés térmico, se debe liberar espacio vital para que las plantas que logren tuberizar expresen su máximo potencial individual. Se recomienda ampliar la distancia entre plantas en la hilera de 0.25-0.30 m a 0.40 m. Esto reduce la población de aproximadamente 44,444-37,037 plantas/ha a 27,777 plantas/ha. La estrategia no es tener más plantas, sino plantas con menos competencia por luz, agua y nutrientes, optimizando los recursos para aquellas que superen la barrera fisiológica del calor.

Manejo riguroso del agua y cero nitrógeno: El manejo nutricional e hídrico debe ser contundente y preventivo. Queda terminantemente prohibida la aplicación de nitrógeno (N) en cualquier forma durante esta época. Cualquier aporte de N estimulará la síntesis de giberelinas y la proliferación vegetativa, exacerbando el vicio. El riego debe enfocarse en mantener un perfil de humedad profundo, pero no superficialmente constante, aplicando riegos abundantes pero espaciados para inducir un ligero estrés hídrico que favorezca, de forma controlada, la señal de tuberización.

Refuerzo estratégico de potasio: A partir de los 45-50 días después de la plantación, cuando la planta define su destino, se debe reforzar masivamente la nutrición potásica (K). El potasio es el activador maestro de las enzimas (Sacarosa Sintasa, AGPasa) que convierten los azúcares en almidón dentro de la raíz. Una alta disponibilidad de K fortalece la fuerza de sumidero de la raíz tuberosa en formación, compitiendo contra las señales hormonales del vicio y direccionando los fotoasimilados disponibles hacia el almacenamiento, aun en condiciones subóptimas.



LEY 5

DEL HÁBITAT LUMÍNICO



Porque en el boniato, toda sombra tiene un precio y se paga en toneladas por hectárea.

INTRODUCCIÓN

El boniato es, ante todo, una fábrica bioquímica impulsada por fotones. Cada gramo de almidón almacenado en sus raíces es, en esencia, energía solar capturada y transformada. Por ello, el primer requisito para el alto rendimiento no es un suelo perfecto o un riego impecable (que son vitales), sino una condición previa y no negociable: la exposición total a la luz solar.

Una creencia común y peligrosa es pensar que, por ser una planta de hoja ancha y aparentemente tolerante, el boniato puede desarrollarse bien en condiciones de sombra parcial o al borde de arboledas. Esta idea es fisiológicamente errónea y productivamente costosa. El boniato es originario de las regiones tropicales abiertas y soleadas de América, donde crece como una planta de pleno sol, y es uno de los cultivos tropicales menos tolerantes a la sombra. Aunque es cierto que sus hojas individuales alcanzan la saturación fotosintética a intensidades lumínicas menores (alrededor de 30 klux) que otros cultivos, esto no significa que requieran menos luz. Por el contrario, significa que todo el dosel foliar debe operar de manera colectiva y simultánea a su máxima capacidad para generar el flujo masivo de fotoasimilados necesario para llenar una cosecha de 50 toneladas por hectárea. Cualquier reducción en la cantidad o calidad de la luz incidente se traduce, de forma directa y proporcional, en una reducción del potencial fotosintético total del campo.

LA SOMBRA

La sombra no es solo una reducción de cantidad de luz; es una alteración de su calidad espectral. La luz filtrada por un follaje tiene una proporción mayor de luz roja lejana, una señal que las plantas interpretan como competencia. En respuesta, la planta de boniato puede activar mecanismos de escape a la sombra, como alargamiento excesivo de tallos (guiado por giberelinas), reducción de la ramificación y, críticamente, una redirección de recursos hacia el crecimiento vegetativo en detrimento del almacenamiento radical. Es decir, la sombra puede inducir indirectamente el temido vicio, incluso si las temperaturas nocturnas son favorables.



LA PROTO-ANATOMÍA KRANZ DEL BONIATO

El boniato presenta una característica anatómica que lo distingue de una planta C3 convencional, una proto-anatomía Kranz. Este término describe una configuración foliar que no llega a ser la típica de una planta C4 (como el maíz o la caña de azúcar), pero que muestra rasgos avanzados más allá del estándar C3.

En una hoja C3 típica, los haces vasculares (las venas) están rodeados por una vaina relativamente simple, y la fotosíntesis ocurre de manera homogénea en las células del mesófilo. En el boniato, en cambio, se observan dos particularidades notables:

- Las venas son excepcionalmente densas y están muy cercanas entre sí.
- Las células de la vaina vascular son notablemente grandes y están cargadas de orgánulos, particularmente cloroplastos y mitocondrias.

Esta disposición crea un compartimento celular semi-aislado alrededor de cada vena. La alta densidad de venas acorta la distancia que deben recorrer los fotoasimilados desde el mesófilo hasta el floema, mientras que la vaina vascular especializada actúa como una estación de transferencia que facilita la carga eficiente de sacarosa hacia el sistema de transporte.

Esta anatomía especializada confiere al boniato dos ventajas clave:

- Transporte ultrarrápido de sacarosa. La combinación de venas densas y una vaina vascular activa permite que los azúcares producidos en las hojas sean exportados rápidamente hacia las raíces tuberosas, sin cuellos de botella en la carga del floema.
- Pre-adaptación para mayor eficiencia fotosintética. Los cloroplastos presentes en la vaina vascular son la base estructural para mecanismos como el reciclaje C₂, que recupera el CO₂ perdido durante la fotorrespiración. En esencia, el boniato posee un diseño foliar que le permite capturar carbono con mayor eficiencia que una planta C3 típica.

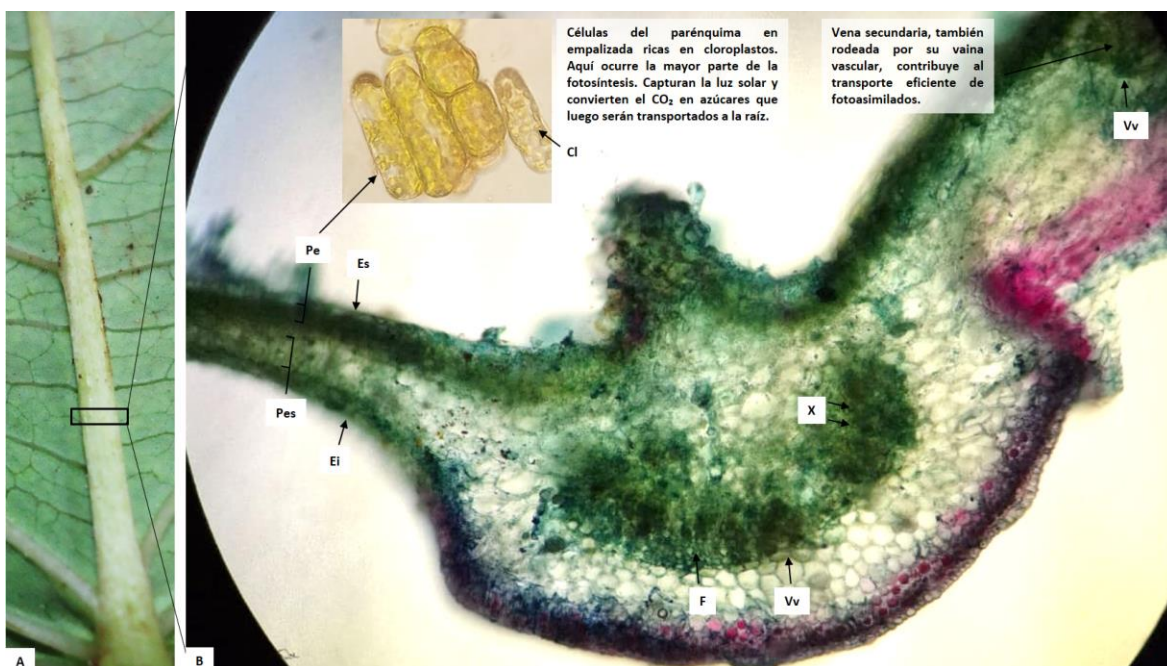


Figura 5.1. Anatomía funcional de la hoja de boniato. A: Hoja mostrando la nervadura central y el limbo foliar; B: Corte transversal de la nervadura central y mesófilo adyacente. La imagen muestra la organización anatómica que permite la alta eficiencia fotosintética del cultivo. En el centro, el haz vascular con xilema y floema rodeado por una vaina vascular de células grandes y ricas en orgánulos, característica de la proto-anatomía Kranz del boniato. En el mesófilo, el parénquima en empalizada contiene numerosos cloroplastos donde ocurre la fotosíntesis, mientras que el parénquima esponjoso facilita el intercambio gaseoso. Abreviaturas: Es = Epidermis superior; Pe = Parénquima en empalizada; Cl = Cloroplastos; Pes = Parénquima esponjoso; Vv = Vaina vascular; X = Xilema; F = Floema; Ei = Epidermis inferior.

CERO TOLERANCIA A LA SOMBRA

El lote debe estar completamente despejado y libre de la sombra proyectada por árboles, cercas vivas o estructuras durante todo el ciclo del cultivo. La siembra al pie de árboles o en lotes con palmas dispersas es una práctica que, literalmente, siembra el límite del rendimiento desde el primer día.



Figura 5.2. Campo de boniato a pleno sol, sin interferencia de sombras. Esta es la base no negociable para un flujo eficiente de asimilados hacia las raíces en formación.

La Ley del Hábitat Lumínico enseña que el primer y más crítico insumo no se aplica con una máquina ni se compra en un saco, es la luz del sol. El boniato no es una planta de sombra; es una fábrica solar que necesita toda la energía disponible para construir las 50 toneladas por hectárea. La anatomía de su hoja, con su parénquima en empalizada densamente empaquetado, su proto-anatomía Kranz y su sistema vascular eficiente, es la prueba de que la evolución lo diseñó para capturar cada fotón disponible.

LEY 6

DE LA BASE EDÁFICA



El potencial genético solo se expresa sobre un suelo físicamente apto, químicamente equilibrado y biológicamente activo.

INTRODUCCIÓN

Para el boniato, el suelo ideal es aquel que permite que las raíces crezcan sin encontrar paredes de tierra dura, que el agua drene rápido y que el aire circule con libertad, o sea, un suelo suelto, profundo y bien drenado. El boniato no es exigente con el suelo, pero la diferencia entre una cosecha mediocre y una de alto rendimiento está en saber leer el suelo que tenemos y manejarlo correctamente.

LO QUE EL BONIATO NECESITA DEL SUELO

La raíz del boniato necesita tres cosas del suelo: espacio, oxígeno y nutrientes. El espacio lo da un suelo suelto, sin compactación. El oxígeno lo da un suelo bien drenado, que no se encharque. Los nutrientes los da un suelo vivo, con materia orgánica.

Cómo reconocer su suelo con las manos

Tome un puñado, humedézcalo y apriételo en la palma.

- Si el suelo es arenoso se desmorona apenas abre la mano. Es ligero, drena rápido, pero se seca y los nutrientes se lavan con facilidad.
- Si el suelo es arcilloso forma una cinta larga que no se quiebra. Es pesado, retiene agua y nutrientes, pero se encharca, se compacta y la raíz se asfixia.
- Si el suelo es franco (el ideal) forma un churro que se quiebra en pedazos al presionarlo. Drena bien, retiene nutrientes, es suelto y fértil.

Cómo manejar cada suelo

- Si su suelo es arenoso el agua y los nutrientes se lavan rápido. La solución es la materia orgánica. Cachaza, estiércol o compost ayudan a que el suelo retenga agua y nutriente.
- Si su suelo es arcilloso, también aquí la materia orgánica es la solución. No labore cuando el suelo está húmedo. Y sobre todo, haga canchales altos para que el agua escurra.
- Si su suelo es franco, no labore en exceso y aporte materia orgánica regularmente.

La compactación

Un suelo compactado asfixia la raíz. La planta no puede profundizar, se vuelve superficial y débil, más vulnerable al tuteo y a la sequía. Las raíces se deforman y pierden calidad.

Para evitarla, no labore con suelo húmedo; reduzca los pases de maquinaria; aplique materia orgánica; siembre cultivos de cobertura que rompan el suelo con sus raíces.

La acidez del suelo

Un suelo puede estar físicamente perfecto y sin embargo la planta no crece. Se atrofia, se pone amarilla o morada. El problema entonces es la acidez.

La acidez no se ve a simple vista. Si el pH es menor de 5.5, el aluminio se vuelve tóxico y el fósforo se bloquea.



Raíces con crecimiento achatado, y engrosamientos irregulares causados por la resistencia mecánica (suelo compactado) que limitó su elongación natural.



Figura 6.1. Contraste en el desarrollo de raíces tuberosas según las condiciones físicas del suelo. A: Raíces provenientes de un suelo compactado: deformes, bifurcadas, con pérdida de valor comercial; B: Raíces desarrolladas en un suelo con estructura óptima: uniformes, lisas, de máximo calibre comercial.

LA LECTURA QUÍMICA

Los parámetros decisivos y sus rangos óptimos para el boniato son:

| Parámetro | Rango Óptimo | Nivel Deficiente (Riesgo) | Nivel Excesivo (Riesgo) |
|----------------------------|-----------------------|--|---|
| pH (en agua) | 5.5 - 6.5 | < 5.0: Toxicidad por Al^{3+}/Mn^{2+} , bloqueo de P. | > 7.2: Bloqueo de Fe, Zn, Mn; P insoluble. |
| Materia Orgánica (MO) | > 3.0 % | < 2.0%: Suelo frágil, pobre en N, se compacta. | Muy raro, siempre beneficiosa |
| Fósforo (P) disponible | 15 - 30 mg/kg (Olsen) | < 10 mg/kg: Raíces débiles, retraso en tuberización. | > 50 mg/kg: Puede inducir deficiencia de Zn. |
| Potasio (K) intercambiable | 0.4 - 0.8 cmol(+)/kg | < 0.2 cmol(+)/kg: Bajo llenado, raíces alargadas. | > 1.0 cmol(+)/kg: Puede antagonizar la absorción de Mg. |
| Relación Ca:Mg | 3:1 a 5:1 | Mg bajo: Clorosis internervial. Ca bajo: Raíces blandas. | Desbalance: Deficiencias inducidas. |

PREPARACIÓN DEL SUELO

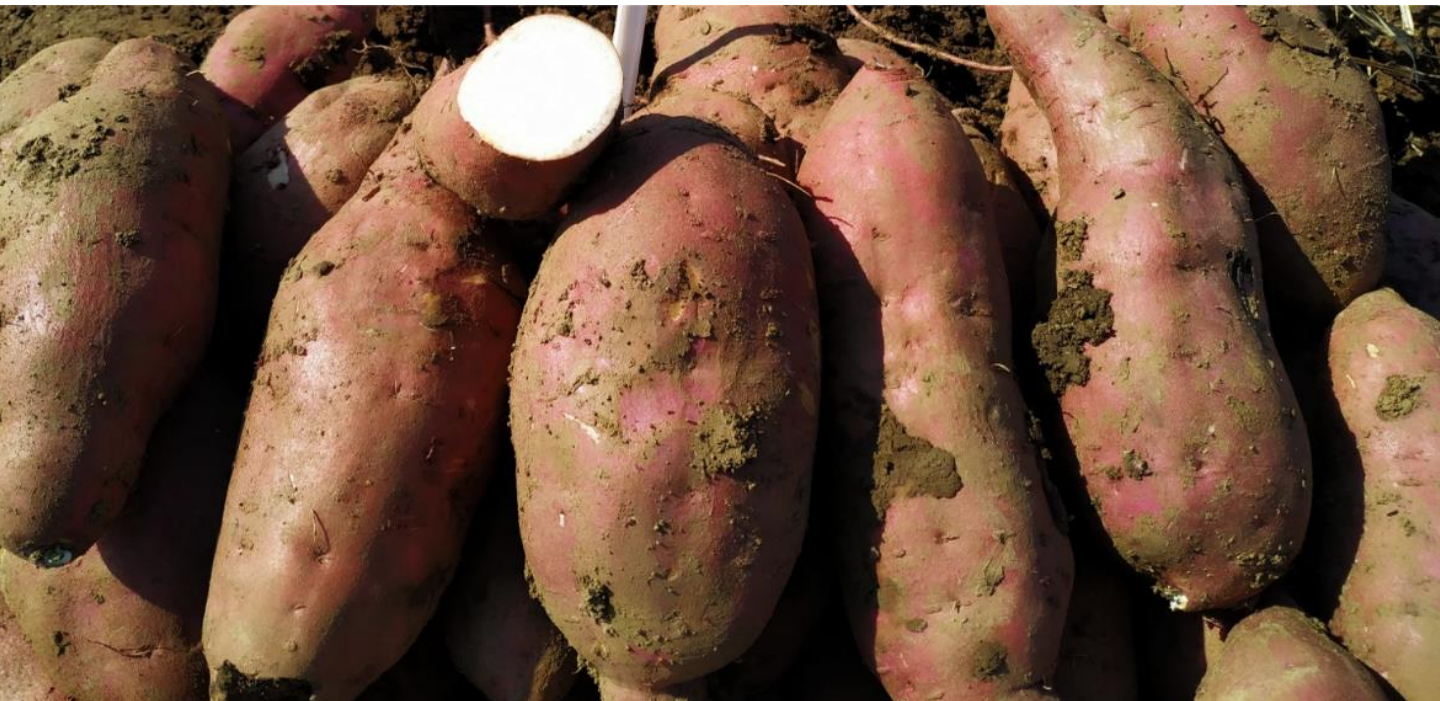
El objetivo final es crear una cámara de crecimiento suelta, profunda y rica para las raíces.

1. Labrar cuando el suelo esté en su humedad templada (forma un terrón que se desmenuza con presión moderada, no se apasta ni está polvoriento).
2. Con arado de discos o vertedera a 25-30 cm de profundidad. En suelos compactados, usar subsolador para romper la suela sin voltear el perfil.
3. Pasar grada de discos o de dientes para desterronar y nivelar. Evitar el exceso de pases que vuelvan a pulverizar y compactar superficialmente.
4. Con arado de vertedera, formar el camellón alto (>30 cm), de base ancha y parte superior redondeada (semicircular). Esta es la cuna definitiva.
5. Aplicar la materia orgánica (15-20 t/ha de cachaza o estiércol) y el fertilizante de fondo en el fondo del surco antes de formar el camellón, para que queden estratégicamente bajo la zona de plantación.

CONSECUENCIAS DE IGNORAR LA BASE EDÁFICA

- Suelo Ácido no Encalado ($\text{pH} < 5.0$): Reducción del rendimiento >40% por toxicidad de aluminio y bloqueo de fósforo. Raíces cortas, gruesas y de punta necrosada.
- Compactación Severa ($\text{RP} > 2.5$ MPa): Pérdida del 20-50% del volumen de raíces comercializables por deformaciones. Mayor incidencia de estrés hídrico.
- Baja Materia Orgánica (<1.5%): Incremento del 30-50% en los requerimientos de riego y fertilizantes químicos para lograr un rendimiento similar, con mayor riesgo de degradación del suelo.

La Ley de la Base Edáfica enseña que un suelo apto para el boniato no se encuentra; se construye y se gestiona. Es una inversión que paga dividendos en cada cosecha, no solo en toneladas, sino en la calidad uniforme, la resiliencia al clima y la sostenibilidad a largo plazo de la finca.



LEY 7

DE LA ELECCIÓN GENÉTICA



El máximo rendimiento está escrito en los genes; el manejo agronómico es simplemente la lectura en voz alta.

INTRODUCCIÓN

La riqueza genética del boniato se despliega en una gama fenotípica que pocos cultivos igualan. Esta diversidad no es ornamental; es un catálogo evolutivo de soluciones donde cada combinación de rasgos representa una estrategia de supervivencia, productividad y adaptación a un nicho específico. Para el productor, este espectro es una paleta de herramientas biológicas; elegir el fenotipo correcto es seleccionar la herramienta perfecta para el trabajo.

EL FENOTIPO AÉREO

Hábito de crecimiento

Varía desde rastreros que se extienden varios metros, generando una cobertura densa que suprime malezas y conserva humedad, hasta portes semierectos y compactos que facilitan la mecanización.



Figura 7.1. Diversidad en la arquitectura aérea del boniato. A: Hábito de crecimiento rastrero; B: Hábito de crecimiento semierecto.

Morfología foliar

La forma de la hoja del boniato es un carácter distintivo y funcional, que va desde cordadas (acorazonadas) y enteras hasta profundamente lobuladas o palmatisectas (en forma de mano). Esta morfología no es casual; regula la intercepción de la luz y el microclima de la planta, influyendo en la dinámica del cultivo.

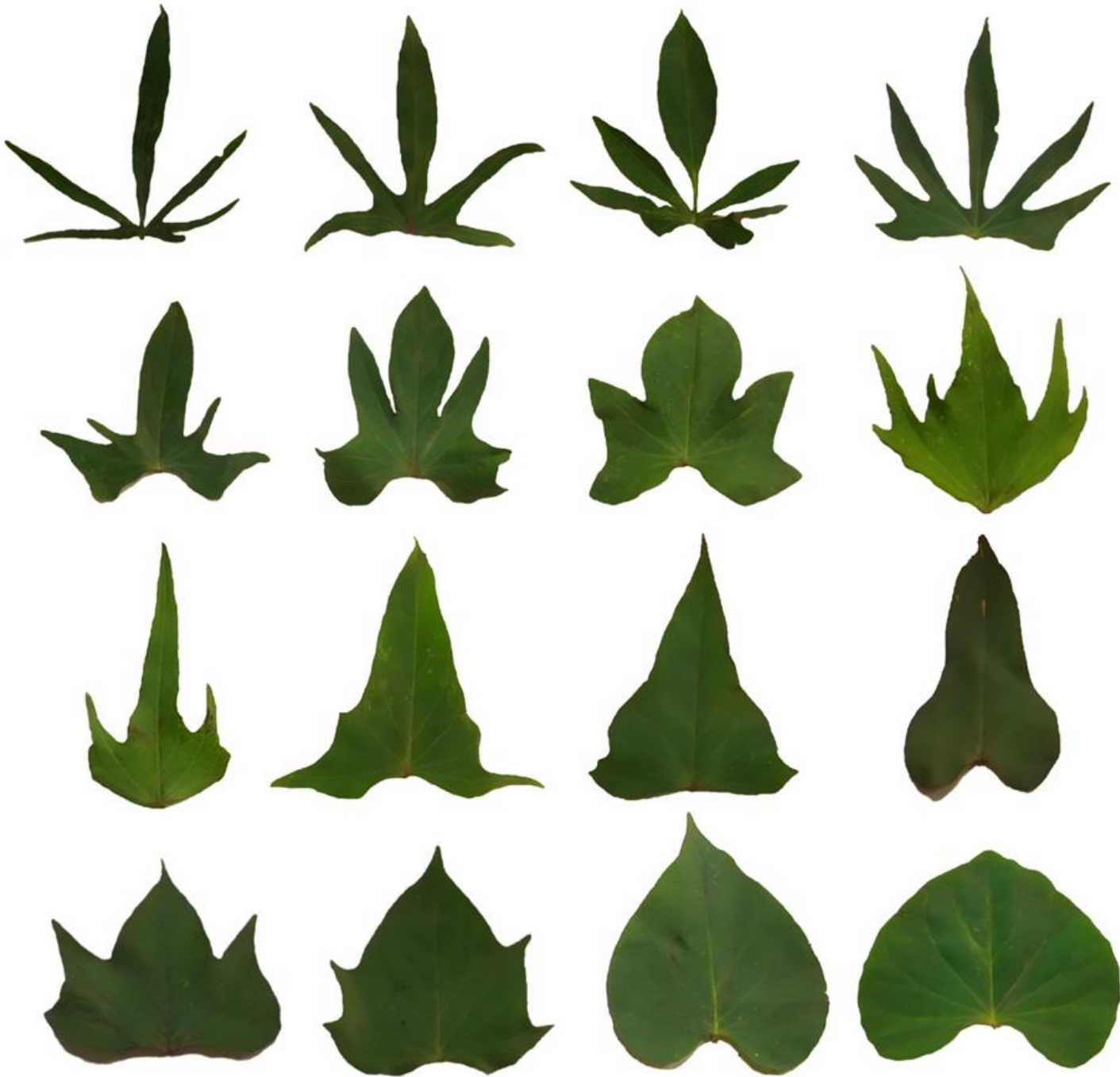


Figura 7.2. Variabilidad fenotípica foliar en el boniato. La imagen ilustra la diversidad morfológica de hojas presentes en distintos cultivares y ecotipos, abarcando desde formas cordadas enteras hasta tipos lobulados y profundamente recortados (palmatisectos). Esta variación es un carácter clave para la identificación varietal.

Las hojas grandes, cordadas y poco lobuladas presentan una mayor superficie fotosintética individual. Este diseño permite un cierre del dosel más rápido y agresivo, compitiendo eficazmente con las malezas desde etapas tempranas al capturar la mayor parte de la luz disponible en la parte superior. Este dosel denso, sin embargo, puede crear más sombra en el estrato inferior, donde las hojas viejas podrían operar con menor eficiencia.

Por el contrario, las hojas lobuladas o palmatisectas permiten una mejor penetración y distribución de la luz a través del dosel, reduciendo las zonas de sombra profunda. Esta arquitectura puede mantener un mayor número de hojas activas en diferentes niveles, distribuyendo la carga fotosintética. Además, la mayor relación perímetro/área de las hojas lobuladas favorece la disipación del calor, lo que puede ser una ventaja fisiológica en condiciones de altas temperaturas.

La morfología foliar define estrategias contrastantes de intercepción lumínica y manejo del calor. Sin embargo, **no es un indicador directo del potencial de rendimiento**, ya que este depende de la integración de la hoja con la arquitectura completa del cultivar y su interacción con el ambiente específico. Por lo tanto, la observación del tipo de hoja debe servir para prever su respuesta en el campo como la rapidez para cubrir el suelo y alinearla con los objetivos de manejo, no para prejuzgar su productividad final.



Figura 7.3. A: genotipo de hoja grande que cierra el campo más rápido; B: genotipo de hoja lobulada que cierra más lento.

EL FENÓMENO DE LAS HOJAS JÓVENES PIGMENTADAS

Un rasgo común y fascinante es la presencia de pigmentación púrpura o rojiza (antocianinas) concentrada en los ápices de crecimiento y en las hojas más jóvenes. Esta no es una deficiencia, sino un mecanismo de protección programado genéticamente. Las hojas emergentes tienen un sistema fotosintético inmaduro y son extremadamente vulnerables al exceso de energía lumínica, especialmente a la radiación ultravioleta y al estrés oxidativo. Las antocianinas actúan como un filtro solar y antioxidante intracelular, protegiendo las estructuras celulares críticas durante este período vulnerable.

A medida que la hoja se expande y madura, sus cloroplastos se desarrollan completamente y activan mecanismos de disipación de energía más eficientes (como el ciclo de las xantofilas). Simultáneamente, la planta detiene la síntesis de antocianinas y, en muchos casos, las degrada o diluye activamente. Por ello, la coloración intensa desaparece, dando paso al verde dominante de la clorofila. Este cambio marca la transición fisiológica de una hoja en modo defensa a una hoja en modo producción fotosintética máxima. La intensidad y persistencia de este color juvenil varía enormemente entre genotipos, siendo un carácter útil para su identificación.



Figura 7.4. Expresión diferencial de antocianinas en hojas jóvenes de boniato. A: Genotipo que presenta una marcada pigmentación púrpura (antociánica) en los ápices de crecimiento y hojas jóvenes; B: Genotipo con hojas jóvenes predominantemente verdes desde su emergencia.

VARIACIÓN ENTRE GENOTIPOS

- **Genotipos de verde uniforme.** Sus hojas jóvenes tienen poca o ninguna pigmentación antocianina. Priorizan la máxima interceptación lumínica desde el inicio, asumiendo un mayor riesgo de daño fotooxidativo en condiciones de estrés lumínico extremo.
- **Genotipos con pigmentación juvenil transitoria.** Exhiben antocianinas en ápices y hojas jóvenes que se pierden con la madurez, equilibrando protección temprana y eficiencia posterior.
- **Genotipos con pigmentación permanente.** Algunos ecotipos locales y variedades ornamentales mantienen altos niveles de antocianinas en hojas adultas. Esta es una estrategia defensiva constitutiva extrema. Aunque confiere una robustez superior frente al estrés abiótico (luz intensa, temperaturas extremas), en el germoplasma evaluado hasta la fecha esta característica se asocia consistentemente con un potencial de rendimiento radical bajo. Las plantas parecen "pagar" el costo de la protección permanente no solo con una reducción en la captura de luz, sino también con una partición de asimilados marcadamente ineficiente para la tuberización. Por ello, estos materiales, valiosos como fuente de genes de resistencia, no son adecuados para la producción comercial (hasta la fecha en Cuba).



Figura 7.5. Ejemplo de un ecotipo de boniato con expresión constitutiva de antocianinas, donde tanto el tallo como las hojas (adultas) presentan una intensa pigmentación púrpura generalizada.

Preguntas Prácticas para el Productor

¿Un genotipo con hojas jóvenes muy moradas es más delicado o más resistente?

Genéticamente, expresa una estrategia de protección frente a alta radiación. Las antocianinas actúan como un filtro lumínico en sus tejidos jóvenes y vulnerables. Sin embargo, **esto no determina su capacidad de enraizamiento ni su establecimiento inicial**. El prendimiento depende de otros factores como las reservas del esqueje, su calidad fisiológica, el genotipo y las condiciones de humedad del suelo, no del color de sus hojas. Simplemente es un rasgo visual sin relación comprobada con el éxito del arraigue.

LÍNEA MORADA EN EL BORDE DE SUS HOJAS

Esa fina línea púrpura que bordea las hojas jóvenes de algunos genotipos tiene dos orígenes posibles, y es importante distinguirlos:

1. Como rasgo genético estable. En muchos genotipos, especialmente en materiales tradicionales o silvestres, esta línea morada es un carácter hereditario y constante. Aparece en hojas jóvenes, tiene un trazo fino y definido, y forma parte de la identidad visual del genotipo (similar a como algunos genotipos tienen tallos púrpuras o verdes). No indica ni deficiencia ni enfermedad.

2. Como respuesta a estrés lumínico. La radiación solar intensa puede inducir o intensificar esta pigmentación, incluso en genotipos que no la muestran de forma tan marcada. Las antocianinas actúan como un filtro solar natural, protegiendo los tejidos más expuestos. En estos casos, la coloración puede ser más variable, aparecer en hojas adultas y estar asociada a condiciones de alta luminosidad.

Cómo diferenciarlos

Si la línea morada aparece consistentemente en hojas jóvenes, con un patrón definido y en distintas épocas del año, es un rasgo genético. Si aparece solo en períodos de alta radiación o en hojas muy expuestas, es más probable una respuesta al ambiente. En cualquier caso, no es un síntoma de alarma.



COLOR Y TEXTURA DEL TALLO

El tallo del boniato muestra una variación simple pero informativa. Su color varía entre verde, púrpura o una combinación de ambos (jaspeado), reflejando la misma presencia de antocianinas que en las hojas. La pubescencia (presencia de pelos) puede ir desde completamente liso (glabro) hasta muy vellosa (piloso). Esta vellosidad actúa como una barrera mecánica natural que dificulta el desplazamiento y la alimentación de pequeños insectos chupadores.



Figura 7.6. Variabilidad fenotípica en tallos de boniato.

EL FENOTIPO SUBTERRÁNEO

Es en la raíz donde la diversidad adquiere su valor económico y nutricional directo. Esta variación está gobernada por una compleja red de genes que controlan la división y expansión celular radial.

- **Número y disposición.** Desde plantas que concentran su energía en 2-3 raíces de gran calibre hasta aquellas que producen racimos de 10-12 o más raíces de tamaño medio. La disposición puede ser agrupada y superficial o dispersa y profunda, un carácter crítico para la susceptibilidad a plagas del suelo.
- **Forma y tamaño.** El espectro abarca raíces fusiformes (ideales para empaque), elípticas o globosas (de alto rendimiento en peso), oblongas e incluso irregulares o acintadas. La uniformidad de forma es un objetivo clave para el mercado fresco y la industria.
- **Color y textura de la piel y la pulpa.** La piel puede ser lisa, rugosa, de color crema, rosa, púrpura o cobrizo. La pulpa exhibe la gama: blanca (alta en almidón), crema o amarilla (rica en flavonoides), naranja intenso (alta en betacaroteno pro-vitamina A) y púrpura (cargada de antocianinas antioxidantes). Es frecuente encontrar pulpas bicolors, con combinaciones como morado-blanco o morado-anaranjado, reflejo de la expresión simultánea de diferentes rutas metabólicas en un mismo genotipo.



Figura 7.7. Diversidad fenotípica en raíces tuberosas de boniato.

Entender esta diversidad es el primer paso para pasar de una agricultura de subsistencia a una agricultura de precisión biológica, donde el material genético se elige con la misma exactitud con la que se dosifica un fertilizante.

CARACTERES AGRONÓMICOS CLAVE

Estos son los caracteres cuantitativos que el fitomejorador selecciona y el productor debe priorizar según su objetivo.

Precocidad

Los genotipos precoces inician la tuberización a los 25-30 días después de la plantación, lo que les permite alcanzar un tamaño comercial en ciclos cortos (100-120 días). Son ideales para escapar a períodos de estrés terminal (sequía, calor extremo) o para realizar varias cosechas al año. Su energía se concentra en iniciar y llenar pocas raíces rápidamente.

¿Existen los boniatos de 40 días?

Es una creencia arraigada entre productores cubanos, con más de 100 años de tradición oral. En múltiples ocasiones hemos acudido a diferentes regiones del país (a veces con varias horas de viaje) para examinar estos famosos "clones de 40 días", siempre por respeto a quienes lo afirman con total convicción. Y en todas ellas, al llegar, ocurría lo mismo, el boniato en cuestión no tenía 40 días. Tenía 50, tenía 60, o simplemente se sembró "por ahí por noviembre" y ya era enero. El productor, honradamente, recordaba haberlo visto pequeño hacía poco, pero la memoria (esa memoria que en el campo a veces se mide por lunas) le jugaba una mala pasada.

Incluso, en varias ocasiones, hemos traído muestras de estos genotipos al INIVIT. Los hemos plantado, los hemos cuidado, los hemos evaluado con rigor científico. Y jamás (ni uno solo) ha producido boniatos comerciales a los 40 días.

Lamentablemente, debemos decir con claridad que esto es un mito, una exageración, como diría el eminente Juan Tomás Roig en su tiempo.

La explicación fisiológica

El boniato es una especie hexaploide ($2n=6x=90$ cromosomas), con una genética compleja donde la precocidad es un carácter cuantitativo, poligénico, influenciado fuertemente por el ambiente. Hasta la fecha, ningún programa de mejoramiento genético en el mundo ha logrado un genotipo que complete su ciclo en 40 días, y es fisiológicamente imposible por una razón fundamental que la naturaleza no puede eludir:

La planta necesita construir primero su fábrica antes de poder producir. Los fotoasimilados que luego llenarán las raíces deben ser generados por un dosel foliar desarrollado, y ese dosel requiere tiempo para formarse. Es como esperar que un niño recién nacido corra una maratón. El organismo necesita tiempo para desarrollar sus músculos, sus huesos, su capacidad aeróbica. El boniato no es diferente, la energía para el llenado de las raíces proviene de las hojas, y esas hojas no existen a los 40 días en la cantidad y madurez necesarias para sostener una cosecha comercial. Además, la formación de raíces tuberosas no es un evento instantáneo. La diferenciación del cambium vascular (el tejido que permitirá el engrosamiento) comienza en las primeras semanas (después de los 20 días). Antes de ese período, aunque existen raíces adventicias, no han desarrollado aún la estructura anatómica necesaria para convertirse en órganos de almacenamiento.



Entonces, ¿qué es lo que ven los productores a los 50-60 días?

Efectivamente, a los 50-60 días es posible encontrar pequeños engrosamientos en las raíces, del tamaño de un huevo o incluso mayores (entre 50 y 80 gramos aproximadamente). Estos "boniaticos" son visualmente atractivos y pueden hacer creer al productor que el cultivar ya está listo.

Pero la realidad fisiológica es otra. Estos engrosamientos tempranos tienen un contenido de materia seca muy bajo (15-18%), comparado con el 25-30% que alcanza una raíz madura. Son básicamente agua con almidón incipiente. Su sabor es acuoso, poco dulce y su textura harinosa o fibrosa al cocerse.

Cosechar en ese momento significa perder entre el 60% y 70% del rendimiento potencial que se acumularía en las semanas siguientes, porque el llenado masivo ocurre después de los 90 días (ver LEY 2: EL CALENDARIO FISIOLÓGICO).

Lo que sí es cierto

La precocidad es un carácter real y muy valioso. Existen genotipos que, bien manejados, alcanzan su madurez comercial a los 110-120 días (los considerados precoces). Otros requieren ciclos de 140-150 días para expresar su máximo potencial (clones tardíos o de muchas raíces por planta).

La diferencia entre unos y otros no es de 40 vs 120 días, sino de cómo distribuyen su energía y llenado a lo largo del ciclo.

Afirmar que un cultivar se cosecha a los 40 días es, sencillamente, desconocer la fisiología básica del cultivo. El boniato necesita su tiempo; la naturaleza no se engaña. Nadie ha logrado, violar las leyes fundamentales que gobiernan la relación entre la fotosíntesis, la partición de asimilados y el tiempo biológico necesario para construir un órgano de reserva.



Figura 7.8. Contraste del desarrollo del cultivar 'INIVIT B-50' a los 60 y 100 días después de la plantación.

Capacidad de carga

Los genotipos con potencial para muchas raíces tuberosas por planta (6-7 o más) siguen una estrategia fisiológica distinta. Su programa genético prioriza primero el establecimiento de una extensa fábrica fotosintética (follaje robusto) que pueda sostener la demanda energética de múltiples órganos de almacenamiento. El llenado, en estos casos, es progresivo y prolongado, pues los fotoasimilados deben distribuirse entre varios sumideros simultáneamente.

Por esta razón, estos genotipos suelen requerir ciclos más largos (140-150 días) para que todas las raíces alcancen su tamaño comercial. No es que demoren más en un sentido negativo; es que su programa genético exige un período de acumulación más extenso para expresar su potencial de rendimiento total, que en condiciones óptimas suele ser muy alto. La naturaleza no se apura; se organiza.

Aunque no es una ley absoluta, en la práctica los genotipos de alta carga (muchas raíces por planta) suelen necesitar más días hasta la cosecha que aquellos genéticamente programados para producir pocas raíces de gran calibre.



Figura 7.9. Estrategias contrastantes de partición de asimilados en genotipos de boniato. A: genotipo de baja capacidad de carga (2-3 raíces por planta), concentra los fotoasimilados en pocos órganos de almacenamiento, lo que permite ciclos más cortos (110-120 días) y raíces de gran calibre; B: genotipo de alta capacidad de carga (6-7 o más raíces por planta), distribuye la energía entre múltiples sumideros, requiriendo ciclos más largos (140-150 días) para que todas las raíces alcancen su tamaño comercial. Su potencial de rendimiento total suele ser superior, pero exige paciencia y manejo adecuado.

Profundidad del sistema radical

Este es un carácter de alta heredabilidad y crucial para el manejo de plagas. Genotipos con raíces tuberosas superficiales y agrupadas son un blanco fácil para el tetuán (*Cylas formicarius*) y pueden sufrir daños por herramientas durante la cosecha. Por el contrario, genotipos con raíces profundas y dispersas poseen una tolerancia intrínseca a la plaga, ya que no hacen grietas en el suelo y las raíces quedan fuera del alcance fácil del adulto hembra.



Figura 7.10. Influencia de la profundidad de tuberización en la susceptibilidad al tetuán. A: genotipo de tuberización superficial; B: genotipo de tuberización profunda.

ENRAIZAMIENTO EN NUDOS

Una característica común en el boniato es la capacidad de emitir raíces adventicias en los nudos de las guías cuando estas entran en contacto con el suelo húmedo. En algunos genotipos, esta capacidad es tan pronunciada que las guías enraizan en múltiples puntos a lo largo de su recorrido, y en algunos punto de enraizamiento pueden formarse pequeños boniatos. A estos se les llama boniatos secundarios.

¿Por qué ocurre?

La capacidad de enraizar en nudos aéreos es una estrategia de supervivencia evolutiva. En condiciones naturales, permite a la planta colonizar nuevos territorios, una guía que toca el suelo y enraíza puede generar una nueva planta independiente. Esto se debe a que los nudos conservan la capacidad de formar primordios radicales incluso después de que la guía ha crecido varios metros.

¿Qué ocurre con los boniatos secundarios?

En los puntos donde la guía enraíza, se forma un pequeño sistema radical adventicio. Si las condiciones son muy favorables (suelo suelto, alta disponibilidad de nutrientes, baja competencia), algunos de estos sistemas radicales pueden iniciar la tuberización y formar pequeños boniatos.

¿Aumenta el rendimiento total?

No necesariamente. La evidencia sugiere que la formación de boniatos secundarios no se traduce en un aumento significativo del rendimiento comercial por varias razones:

1. La planta tiene una capacidad limitada de producir fotoasimilados. Si destina energía a formar boniatos secundarios en múltiples puntos, resta recursos al llenado de las raíces principales, que son las que realmente alcanzan tamaño comercial.
2. Los boniatos secundarios suelen ser pequeños, alargados y deformes, con baja aceptación en el mercado. Su aporte al rendimiento total es marginal en términos de producto comercializable.
3. La formación de boniatos secundarios es más pronunciada en ciertos genotipos (especialmente los de hábito rastrero muy agresivo) y en condiciones de alta humedad y baja competencia. En variedades modernas de alto rendimiento, este carácter ha sido seleccionado en contra porque se considera un desperdicio de energía.



CARACTERES DE CALIDAD

Para consumo humano en fresco

- Materia seca (MS). Genotipos con MS intermedia (25-30%) tienen una textura húmeda y se ablandan rápido al cocer. Son los preferidos para hervir o asar.
- Color de pulpa. El naranja intenso indica alto contenido de betacaroteno (pro-vitamina A), un carácter de gran valor nutricional seleccionado en programas de biofortificación. El púrpura señala la presencia de antocianinas, potentes antioxidantes. El color blanco o crema suele asociarse a un sabor más neutro.
- Textura y sabor. Se buscan pulpas de fina granulación, no fibrosas, con un balance adecuado de azúcares (sacarosa, glucosa) que aporte dulzor sin resultar empalagoso.

¿Qué es la fibrosidad y por qué ocurre?

Cuando decimos que una raíz es "fibrosa" nos referimos a la presencia de tejidos endurecidos que se perciben al masticar, como hebras o grumos duros. Esto tiene una explicación anatómica precisa, durante el desarrollo de la raíz, algunas células del xilema y del parénquima vascular pueden sufrir un proceso de lignificación excesiva, depositando lignina en sus paredes celulares. Estas células lignificadas se convierten en elementos esclerenquimáticos que el paladar detecta como fibras.

La cantidad de fibra varía significativamente entre genotipos. Existen diferencias de hasta 4.5 veces en el contenido de fibra entre distintas variedades, con valores que oscilan entre 25 y 100 mg por 100 g de raíz fresca. Estas fibras están compuestas principalmente por celulosa (32.5%), hemicelulosa (22.3%) y lignina (29.6%). Por tanto, la fibrosidad no es un defecto puramente ambiental sino un carácter genético, ciertos genotipos simplemente están programados para lignificar más sus tejidos vasculares, lo que los hace indeseables para consumo fresco, pero quizás útiles para otros fines.

Para Procesamiento Industrial (Harinas, Almidón, Purés)

- Alta materia seca (>30%). Es el carácter cardinal. Maximiza el rendimiento de producto procesado por tonelada de raíz fresca. Estos genotipos poseen una mayor actividad de las enzimas de síntesis de almidón (Sacarosa Sintasa, AGPasa) en el tejido de almacenamiento.
- Forma uniforme y tamaño. Facilita el pelado y corte mecanizado, reduciendo mermas.
- Baja tendencia a la oxidación. Se prefieren genotipos con bajo contenido de compuestos fenólicos que, al reaccionar con enzimas (PPO), causen pardeamiento indeseable en el producto terminado.

Para alimentación animal

Se prioriza el rendimiento total de biomasa utilizable (raíces + follaje). El follaje de algunas variedades puede tener un contenido proteico de hasta un 10-20% en base seca, constituyendo un excelente forraje.



VENAS

Las protuberancias gruesas y elevadas que parecen venas en la superficie del boniato no son defectos internos ni síntomas de enfermedad. Son raíces fibrosas que han quedado adheridas a la superficie de la raíz tuberosa durante su desarrollo. Estas estructuras forman parte del sistema de transporte natural de la planta, actuando como vasos que movilizan agua y nutrientes.

Causas de la formación de venas

1. Condiciones de estrés ambiental (calor y sequía)

La causa más común es la exposición a clima cálido y seco durante el desarrollo de la raíz. Bajo condiciones de estrés hídrico y altas temperaturas, la planta responde incrementando la producción de raíces fibrosas para maximizar la absorción de agua. Algunas de estas raíces fibrosas quedan adheridas a la superficie de la raíz tuberosa en formación, creando el aspecto venoso.

2. Fertilidad excesiva del suelo

El cultivo en suelos demasiado fértiles, especialmente con alto contenido de nitrógeno, puede estimular un crecimiento vegetativo excesivamente rápido. Este crecimiento acelerado puede resultar en la formación de raíces fibrosas alargadas que se adhieren a la raíz tuberosa. La raíz tuberosa crece más rápido de lo que su piel puede expandirse, y las raíces fibrosas quedan atrapadas en la superficie.

3. Factores genéticos y varietales

No todas las variedades de boniato son igualmente propensas a desarrollar estas venas. Algunas variedades, son más susceptibles a esta condición. Esto indica un componente genético en la expresión de este rasgo, que puede ser más pronunciado en ciertos cultivares.

Prevención

- Mantener un riego uniforme durante todo el ciclo, evitando períodos de sequía seguidos de riego abundante.
- Evitar el exceso de fertilización nitrogenada, especialmente en la fase de formación de la raíz.
- Asegurar un buen drenaje del suelo para evitar el anegamiento.
- En caso de suelos muy fértiles, reducir las dosis de fertilizante o equilibrar con potasio y fósforo.



HENDIDURAS LONGITUDINALES

Esta anomalía se manifiesta como una serie de elevaciones y depresiones que recorren la raíz en sentido longitudinal, dándole un aspecto acanalado o acordonado. Lo que el productor observa es un boniato con lomas y bajadas muy pronunciadas a lo largo de toda la raíz, como si hubiera crecido de forma desigual.

Causa anatómica

Durante el engrosamiento secundario anómalo del boniato, se forman múltiples cámbiums (anillos meristemáticos) alrededor de los vasos de xilema. Estos cámbiums producen hacia adentro xilema secundario y hacia afuera floema, pero también generan gran cantidad de parénquima de almacenamiento. Cuando este proceso no es uniforme alrededor de la raíz, ocurre lo siguiente:

- En las zonas donde los cámbiums producen más parénquima de almacenamiento, la raíz se expande formando crestas.
- En las zonas donde la producción es menor o donde predomina la formación de xilema lignificado, la expansión es menor, formando surcos.

Factores predisponentes

- Genéticos: Algunas variedades tienen mayor tendencia a desarrollar surcos que otras; es un carácter varietal.
- Fluctuaciones hídricas: Ciclos de sequía seguidos de riego abundante durante la fase de llenado exacerbaban el crecimiento desigual, ya que la raíz se expande bruscamente en áreas de menor resistencia.
- Estrés temprano: Condiciones adversas en los primeros 30 ddp (sequía, bajas temperaturas) alteran el patrón de diferenciación del xilema, predisponiendo a crecimientos desiguales posteriores.

Aunque estos surcos no afectan la calidad nutricional ni el sabor del boniato, reducen significativamente su valor comercial, especialmente para mercados que exigen un producto de forma uniforme y piel lisa. Las raíces con surcos muy pronunciados suelen clasificarse como segunda calidad o destinarse a procesamiento industrial.



GRIETAS

Las grietas en los boniatos son la manifestación visible de un desequilibrio fisiológico que ocurre durante la fase de crecimiento acelerado de la raíz. Hemos identificado múltiples causas:

1. Fluctuación de humedad

Es la causa más común. Cuando la planta sufre un período de sequía durante la fase temprana de formación de la raíz y luego recibe agua en abundancia, ocurre lo siguiente, las raíces, estresadas por la falta de agua, desarrollan una corteza más delgada de lo normal. Al reanudarse el riego, las células internas absorben agua rápidamente y se expanden con fuerza, pero la piel delgada y rígida no tiene la elasticidad suficiente para acompañar ese crecimiento.

2. Velocidad de crecimiento desigual

Durante la fase de crecimiento rápido (entre 30 y 60 ddp), el tejido interno de la raíz se expande impulsado por la acumulación masiva de almidón y agua. Si esta expansión es demasiado rápida y la piel no ha tenido tiempo de engrosarse y suberificarse adecuadamente, se produce un desfase entre el crecimiento interno y el externo. **Existe una base genética en la susceptibilidad al agrietamiento.** El espesor de la piel y la dureza de la piel están altamente correlacionados negativamente con la incidencia de grietas. Esto significa que las variedades con piel más gruesa y dura son significativamente menos propensas a agrietarse.

3. Desórdenes nutricionales

- Un exceso de nitrógeno, promueve un crecimiento vegetativo exuberante que también acelera la expansión radical.
- Una deficiencia de boro debilita la estructura de las células epidérmicas, haciéndolas más propensas a romperse bajo presión.
- Un exceso de potasio desbalanceado (especialmente en relación con el calcio) puede afectar la integridad de la pared celular y contribuir al agrietamiento.

4. Daño por nematodos

El nematodo reniforme (*Rotylenchulus reniformis* Linford & Oliveira) se alimenta de las raíces en formación, causando daños microscópicos en los tejidos de la epidermis y el parénquima cortical. Estas microlesiones actúan como puntos de debilidad estructural que, bajo la presión interna del crecimiento, se convierten en puntos de inicio de grietas.

5. Herbicidas

Ciertos herbicidas, especialmente los de tipo hormonal (como el 2,4-D), pueden causar crecimiento anómalo y desordenado de los tejidos. Al ser absorbidos por las raíces, alteran el equilibrio hormonal de la planta, induciendo divisiones celulares descontroladas y debilitando la estructura de la piel, haciéndola más propensa a agrietarse.



AGALLA POR *Agrobacterium*

La agalla de la corona es una enfermedad bacteriana causada por *Agrobacterium tumefaciens* (Smith & Townsend) Conn, un microorganismo del suelo que tiene la capacidad única de transferir un fragmento de su ADN (plásmido Ti) al genoma de la planta hospedante. Este ADN bacteriano reprograma las células vegetales para que se dividan descontroladamente, formando tumores o agallas en el cuello de la raíz, en la base del tallo y, ocasionalmente, en las raíces tuberosas.

En el cultivo, la infección se manifiesta como protuberancias irregulares, de aspecto carnoso en sus etapas iniciales y leñoso con el tiempo, ubicadas preferentemente en la zona de unión entre el tallo y la raíz. Las agallas pueden variar desde pequeños nódulos hasta masas tumorales de varios centímetros de diámetro. A diferencia de otras deformaciones, estas estructuras no presentan raíces adventicias ni una organización definida. Las plantas afectadas pueden mostrar un crecimiento reducido y mayor susceptibilidad al estrés hídrico, aunque en infecciones leves el síntoma puede pasar desapercibido.

La bacteria ingresa a la planta a través de heridas causadas por labores culturales, daños de insectos o lesiones mecánicas durante la siembra o el deshierbe. Su desarrollo es favorecido por suelos húmedos y temperaturas cálidas (25-30°C). Aunque la enfermedad es más conocida en frutales y ornamentales, se ha reportado en boniato en varios países tropicales, especialmente en condiciones de estrés o en plantas con heridas previas. En Cuba, su presencia es esporádica y no constituye un problema fitosanitario generalizado.



CÓMO ESCOGER EL CULTIVAR ADECUADO

Un cultivar élite moderno, como los desarrollados por el INIVIT, no es simplemente una semilla mejorada. Es el resultado de combinar, tras años de selección, decenas de caracteres en un solo individuo, un paquete tecnológico biológico donde se han armonizado la precocidad, el hábito de crecimiento, el potencial de rendimiento, la calidad específica y los mecanismos de defensa. Cada genotipo lleva en sus genes una historia de cruzamientos, evaluaciones y selecciones que lo hacen único para determinadas condiciones.

La tarea del productor es realizar el *match* perfecto entre el paquete-solución que representa el genotipo y el paquete-problema de su realidad productiva: época de plantación, clima esperado, tipo de suelo, presión histórica de plagas y, sobre todo, el destino comercial de su cosecha. No existe el mejor cultivar en abstracto; existe el cultivar más adecuado para su situación concreta.

Elegir un cultivar de alto rendimiento, pero susceptible al tetuán en un campo con alta presión histórica de la plaga, es una apuesta donde las probabilidades de pérdida están en contra del productor. La elección genética es, por tanto, la primera y más determinante práctica de manejo, el acto que establece el techo de lo posible para toda la campaña que sigue.

Ninguna otra decisión (fertilización, riego, densidad de plantación, control de plagas) podrá superar el límite que impuso la genética desde el día uno. Un cultivar inadecuado, por más que se mime, nunca alcanzará su potencial; un cultivar bien elegido, con un manejo acertado, multiplicará sus resultados. Por eso, antes de preparar el suelo, de seleccionar la semilla o de definir la fecha de plantación, el productor debe hacerse una pregunta fundamental: **¿Qué problema necesito resolver y qué cultivar tiene la solución escrita en sus genes?**



EL CATÁLOGO GENÉTICO DEL INIVIT

SOLUCIONES PARA CADA REALIDAD PRODUCTIVA

A lo largo de décadas de mejoramiento genético, el INIVIT ha liberado una serie de cultivares élite (30) que encapsulan, en su información genética, las respuestas a los desafíos más comunes de la producción cubana. Cada uno de estos cultivares representa una combinación única de caracteres: precocidad, tolerancia a estreses, calidad culinaria o industrial, alta estabilidad fenotípica y adaptabilidad a condiciones específicas de suelo y clima.

La siguiente tabla resume las características principales de los cultivares más importantes desarrollados por la institución. No se trata de una lista jerárquica (no hay mejores o peores), sino de una guía para la decisión informada. El productor debe encontrar en ella el cultivar que mejor se ajuste a su realidad.

Tabla 7.1. Principales cultivares de boniato liberados por el INIVIT y sus características agronómicas.

| Cultivar | Progenitores y año de liberación | Ciclo (días) | Rendimiento (t/ha) | Susceptibilidad/Tolerancia | Característica de raíz | Mejor para: | Observaciones |
|-------------------|-------------------------------------|--------------|--------------------|--|--|--|--|
| 'CEMSA 78-354' | ♀ CEMSA 74-228 1982 | 110-120 | 35-45 | Susceptible a <i>Cylas formicarius</i> Susceptible a enfermedades virales (complejo SPVD) | Raíces uniformes, buen calibre. Alto contenido de materia seca (28-32%). | Cierre rápido del campo, suelos de mediana a alta fertilidad, mercado de consumo fresco e industria. | Clasé icónico de referencia nacional. Requiere buen manejo fitosanitario. |
| 'INIVIT B2-2005' | ♀ CEMSA 78-326 2005 | 140-150 | 45-55 | Tolerante a sequía Tolerante a altas temperaturas Tolerancia a virus Tolerancia moderada a <i>Cylas formicarius</i> | Raíces de calibre grande y uniforme, piel roja, pulpa amarilla. | Épocas con estrés hídrico, rotaciones para romper ciclo de tetuán, producción en suelos marginales. | Ideal para zonas con periodos secos prolongados. Cultivar más importante en Cuba. |
| 'INIVIT B-23' | ♀ INIVIT B-240 2014 | 110-120 | 40-50 | Tolerante a sequía Tolerante a salinidad Tolerante a altas temperaturas | Raíces fusiformes, piel cobriza, pulpa amarilla clara. | Escapar a periodos críticos de plagas, mercado fresco de alta calidad nutricional. | Excelente estabilidad de rendimiento en ciclos cortos. |
| 'INIVIT B-50' | 2005 x INIVIT B 16-2010 2015 | 115-125 | 45-55 | Tolerante a sequía Tolerante a altas temperaturas Tolerancia a virus | Raíces oblongas, piel roja clara, pulpa amarilla clara. | Zonas cálidas y secas. | Variedad de alto potencial y buena adaptación general. |
| 'INIVIT BM-90' | Morado INIVIT x Ningzi No.1 2016 | 140-150 | 30-40 | Susceptible a sequía Susceptible a <i>Cylas formicarius</i> | Alto contenido de antocianinas (pulpa y piel púrpura intenso). Raíces alargadas. | Mercado de nicho (salud), agroindustria para colorantes naturales, extractos antioxidantes. | Requiere condiciones óptimas y protección contra estrés para expresar su calidad. |
| 'INICIP B-60' | PJ05.130 x PZ08.038 2026 | 110-120 | 40-50 | Tolerante a sequía Tolerante a <i>Cylas formicarius</i> | Raíces uniformes, forma elíptica, pulpa anaranjada, buena calidad culinaria. | Rotaciones cortas, escape a estrés, características exportables. | Nuevo cultivar, completado con perfil de uso general. |
| 'INICIP Dorado-4' | PJ05.130 x PZ08.038 2026 | 110-120 | 45-55 | Tolerante a sequía Tolerante a salinidad Resistente a <i>Cylas formicarius</i> | Piel cobriza, pulpa anaranjada por alta concentración de betacaroteno. | Biofortificación, alimentación infantil y materna, mercados especializados. | Cultivar con resistencia destacada a tetuán y alto valor nutricional. |
| 'INIVIT B-30' | PJ14.03815 x PZ14.10564 2026 | 120-130 | 50-60 | Tolerante a sequía Tolerante a altas temperaturas Tolerante a <i>Cylas formicarius</i> | Alto número de raíces por planta. Raíces de calibre grueso y uniforme. | Sistemas de alta tecnología (riego, fertilización), maximizar índice de cosecha y rentabilidad. | Genotipo con el mayor potencial de rendimiento, responde muy bien al manejo intensivo. |

Los valores de rendimiento corresponden a valores alcanzables en condiciones óptimas de manejo. El ciclo puede variar según la época de siembra, el tipo de suelo y las condiciones climáticas predominantes. La tolerancia a plagas y enfermedades es un carácter relativo, no una resistencia absoluta; requiere complementarse con las demás prácticas de manejo integrado.



'CEMSA 78-354'



'INIVIT B2-2005'



'INIVIT B-23'



'INIVIT B-50'



'INIVIT BM-90'



'INICIP B-60'



'INICIP Dorado-4'



'INIVIT B-30'



Figura 7.11. Principales cultivares de boniato liberados por el INIVIT.



LEY 8

DEL MATERIAL DE PROPAGACIÓN



Un esqueje de calidad no es un tallo que se planta, es un sistema fisiológico completo que carga el potencial de toda la cosecha.

INTRODUCCIÓN

En el cultivo del boniato, la calidad fisiológica del material de plantación no es un detalle inicial; es el factor más crítico que establece el máximo rendimiento potencial de la plantación. Un esqueje no es solo un tallo para enraizar, es una unidad fisiológica compleja donde cada nudo posee una memoria hormonal y un potencial de desarrollo radical distinto. Ignorar esta realidad es aceptar, desde el inicio, un límite artificial a la productividad.

EL MITO DEL ESQUEJE APROVECHABLE

La práctica tradicional, especialmente en sistemas de bajos insumos, suele considerar todo el tallo del boniato como material válido para plantación, desde la punta tierna hasta la base leñosa. Este enfoque, basado en la disponibilidad y no en la calidad, es una de las causas primarias de los bajos rendimientos y la alta variabilidad dentro de un mismo campo.

Nuestras investigaciones han develado que a lo largo del tallo existe un gradiente fisiológico axial, donde la posición de cada nudo (contando desde el ápice) determina de forma dramática su capacidad para: 1) formar raíces adventicias rápidamente, 2) establecer un sistema radical fibroso vigoroso, y 3) lo más importante, iniciar y engrosar tuberosas.

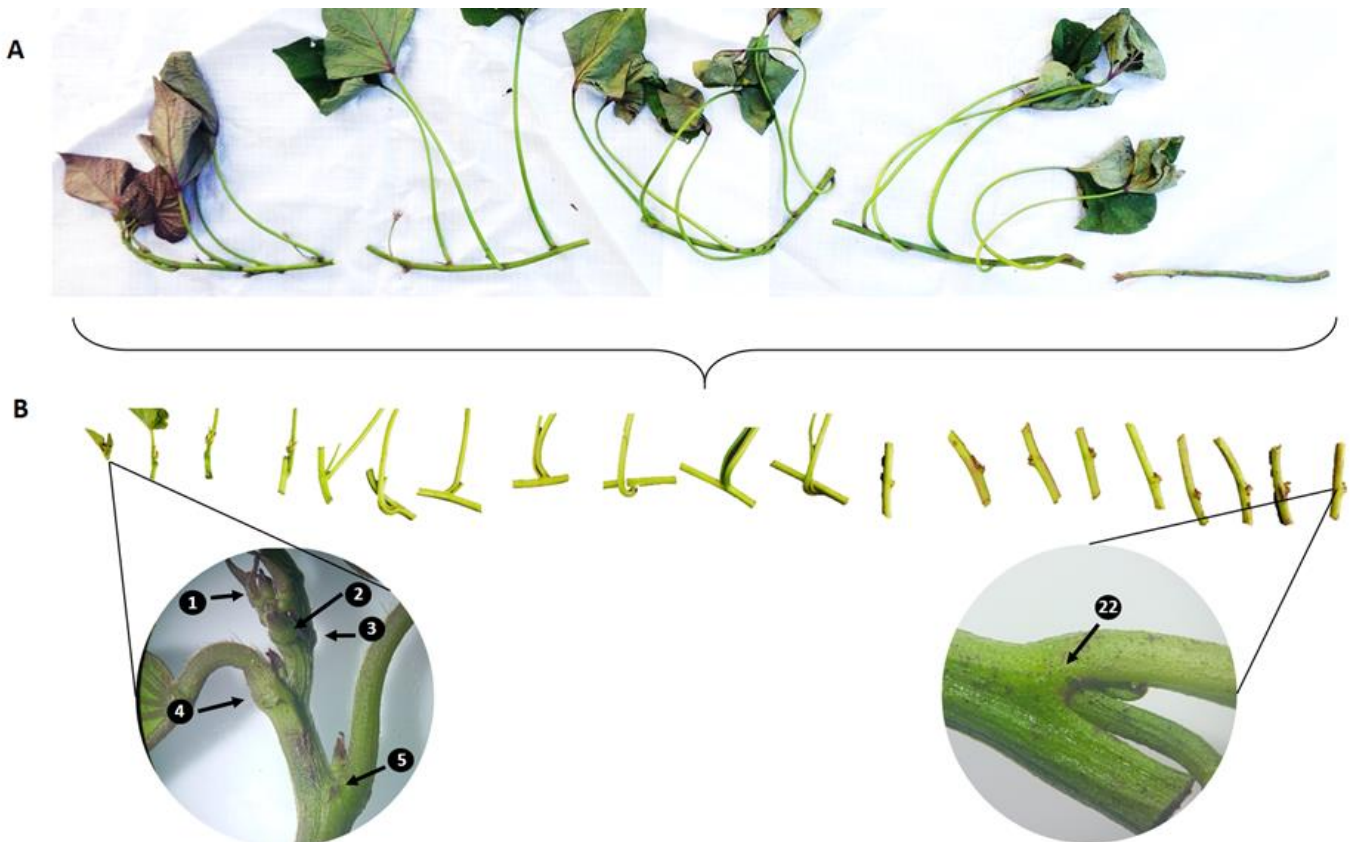


Figura 8.1. A: tallo completo de boniato, mostrando las cinco secciones (25-30 cm) en que los productores suelen dividirlo: apical, pre-apical, media 1, media 2 y basal. Esta práctica, basada en la disponibilidad, ignora el potencial fisiológico de cada nudo; B: Segmentación nodal del tallo, el mismo tallo seccionado en unidades nodales individuales (nudos 1 al 22), permitiendo visualizar la gradación fisiológica desde el ápice (nudo 1) hasta la base (nudo 22). Esta representación evidencia cómo cada nudo es una unidad funcional independiente con potencial distinto.

LA PARADOJA DEL NUDO

Los resultados experimentales revelan una verdad contraintuitiva que desafía el conocimiento convencional, respaldada por datos cuantitativos contundentes:

- Los nudos apicales (Nudos 1-4): Aunque poseen la máxima totipotencia y concentración de hormonas de crecimiento como auxinas, son inmaduros fisiológicamente. Carecen de hojas expandidas capaces de realizar fotosíntesis eficiente y sus tejidos están programados para el alargamiento, no para la diferenciación radical inmediata. Los nudos 1-3 no desarrollan raíces en absoluto a los siete días, y los nudos 4-6 apenas producen menos de 5 raíces fibrosas, con longitudes inferiores a 5 cm. Su capacidad de formar raíces tuberosas es nula o muy baja, con 0 raíces tuberosas a los 60 días. Plantar solo la punta extrema (top apical de 5 cm) es desperdiciar el potencial del esqueje.
- Los nudos basales senescentes (Nudos 17-22): Han perdido sus hojas, sus tejidos están lignificados y su metabolismo está reducido. Carecen de las reservas y la plasticidad necesaria para una respuesta rizogénica vigorosa. Su tasa de mortalidad es alta (superior al 50% en nudos 20-22) y, si sobreviven, solo producen raíces fibrosas leñosas en baja cantidad (menos de 5 raíces por nudo), con longitudes muy reducidas. Críticamente, estos nudos son incapaces de iniciar la tuberización, presentan 0 raíces tuberosas a los 60 días, confirmando que el tejido senescente ha perdido irreversiblemente la capacidad de diferenciación hacia órganos de reserva.
- La zona de oro (Nudos 8-12): Esta franja intermedia del tallo representa el punto óptimo de equilibrio fisiológico. Los datos cuantitativos son concluyentes:
 - o Primordios radicales: El Nudo 10 presenta la mayor densidad, con 3.0 ± 3 primordios a las 24 horas.
 - o Raíces fibrosas: Los nudos 10, 11 y 12 producen 24.6 a 26.7 raíces por nudo a los 7 días, más del doble que cualquier otra región del tallo.
 - o Longitud radical: Las raíces de estos nudos superan consistentemente los 10 cm a los 7 días, evidenciando un vigor excepcional.
 - o Tuberización: Los nudos 8-11 alcanzan el máximo desempeño con más de 1.30 raíces tuberosas por nudo y el mayor peso de biomasa acumulada a los 60 días.

En esta zona convergen tres factores fisiológicos críticos:

- Madurez tisular suficiente: Las células han superado la fase meristemática apical y están preparadas para responder a señales de diferenciación, como la formación de raíces.
- Máxima capacidad fotosintética: Cada nudo en esta zona está asociado a una hoja completamente expandida y funcional. Esta hoja es una fuente inmediata y autónoma de fotoasimilados (azúcares) que proveen la energía y el carbono necesario para la división y elongación celular en las raíces emergentes.
- Densidad de primordios radicales: Nuestros estudios muestran que es en estos nudos intermedios donde se encuentra la mayor densidad de primordios radicales preformados. Estos son pequeños grupos de células indiferenciadas, que ante la señal hormonal correcta (auxinas provenientes de la yema axilar y la hoja) se activan y emergen como raíces adventicias en cuestión de horas.

Nudo 4 (apical). Primordios inactivos, sin emergencia visible. Tejido aún inmaduro para responder a señales de enraizamiento.



4

Nudo 10. Zona de Oro. Máxima activación. Múltiples primordios emergiendo como puntas blancas de raíces en apenas 24 horas.



10

Nudo 14. Activación moderada. Menor número de primordios activados, emergencia más lenta.



14

Nudo 19. basal senescente, sin emergencia visible. Tejido viejo con pérdida de capacidad rizogénica.



19

Figura 8.2. Emergencia de raíces a las 24 horas según la posición nodal. Se observa la activación diferencial de los primordios radicales según su posición en el tallo.



Figura 8.3. Desarrollo de raíces fibrosas a los 7 días. Las diferencias en número, longitud y vigor son evidentes según la posición nodal.

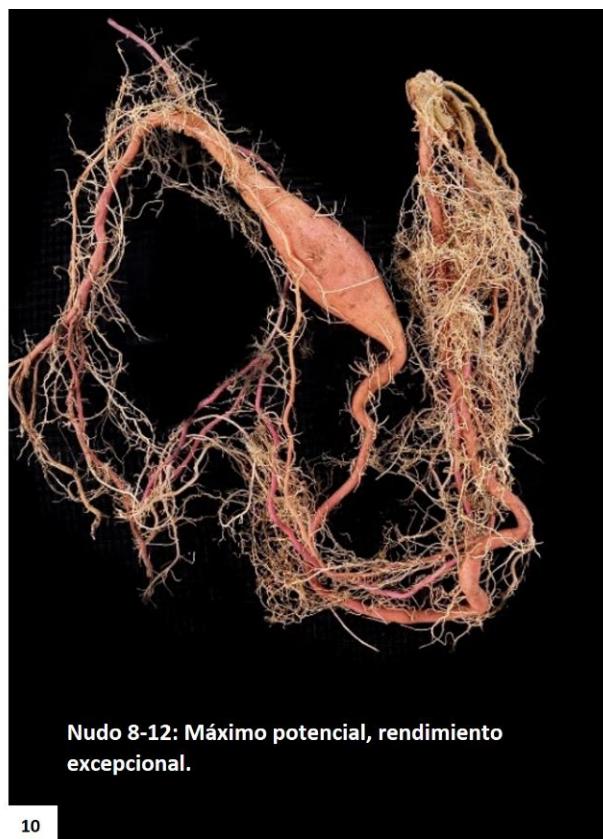


Figura 8.4. Formación de raíces tuberosas a los 60 días. Las diferencias en número, peso y calidad son contundentes.

LA TRADUCCIÓN PRÁCTICA

Estos hallazgos científicos tienen una aplicación inmediata y transformadora para el productor. Para entenderla correctamente, primero debemos ser precisos sobre qué llamamos "**punta**" y qué llamamos "**pre-punta**".

La punta (esqueje apical) es, sin duda, **la mejor semilla**. Es la sección que recomendamos prioritariamente. Cuando hablamos de un esqueje apical de 30-35 cm de longitud, **este suele contener todos los nudos de la zona de oro (8-12) en su interior**. En ese caso, no se necesita ninguna técnica especial, se planta de forma convencional y los nudos valiosos quedarán correctamente distribuidos a lo largo del esqueje, con varios de ellos enterrados.

Sin embargo, en la práctica, los esquejes apicales que se cortan no siempre alcanzan esa longitud ideal. Un esqueje apical más corto (de 25 cm, por ejemplo) puede llegar solo hasta el nudo 10. Esto significa que los nudos 11 y 12 (que forman parte de la zona de oro) no están incluidos en la punta, sino que quedan en la sección siguiente: la pre-punta.

Aquí es donde surge la necesidad de la técnica invertida. Si vamos a utilizar esquejes de pre-punta (el segmento que sigue inmediatamente a la punta), debemos ser conscientes de que esta sección contiene los últimos nudos de la Zona de Oro (11-12) y los primeros nudos de transición (13-15). En estos esquejes de pre-punta, los nudos más valiosos (11-12) se encuentran en la parte superior del segmento. Si plantamos la pre-punta de forma convencional (con el ápice hacia arriba), la parte más valiosa (los nudos 11-12) quedarán afuera del suelo, desaprovechando completamente su potencial. Sin embargo, el problema es que los nudos inferiores de la pre-punta (13-15), que son los que quedarían en la parte subterránea, tienen menor capacidad rizogénica. La solución más elegante y efectiva es plantar la pre-punta de forma invertida. Al hacerlo:

- Los nudos 11-12 (Zona de Oro) quedan estratégicamente enterrados en el suelo, posición ideal para activar su potencial radical.
- Los nudos 13-15 quedan afuera de la tierra, donde pueden contribuir de forma fotosintética.
- La yema que emerge buscará la luz sin dificultad, independientemente de su orientación original.

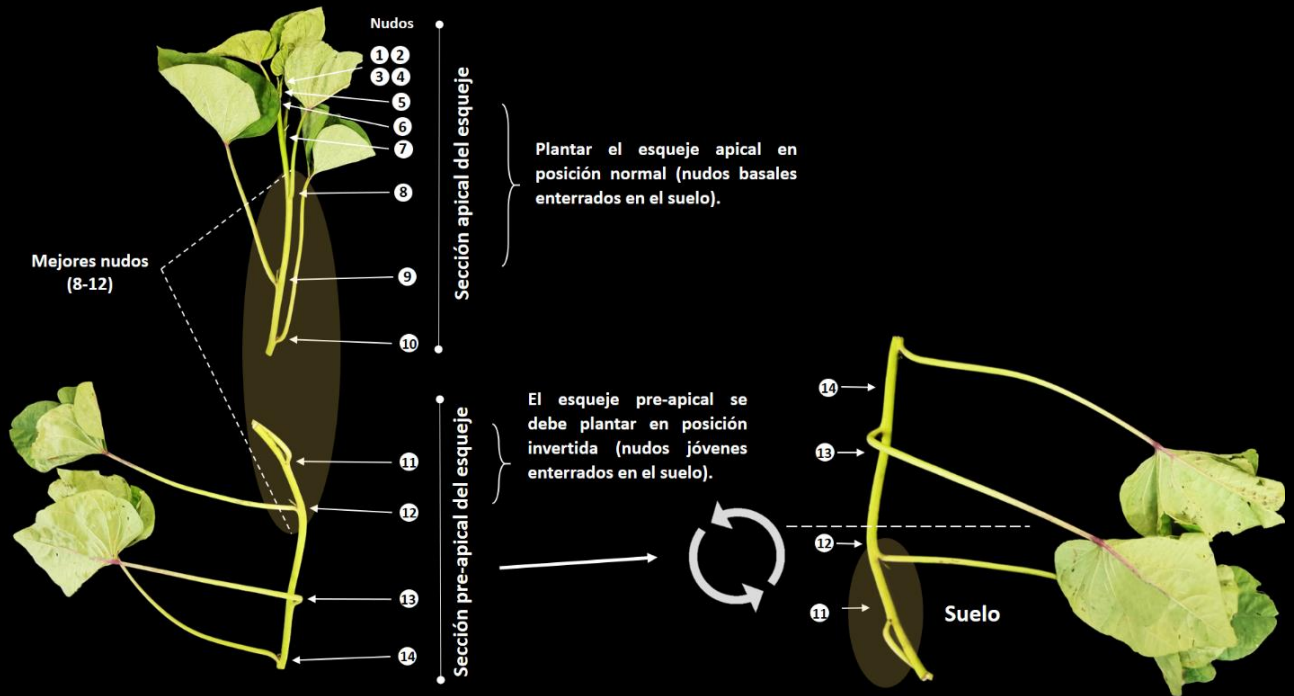


Figura 8.5. Plantación invertida para esquejes pre-apicales.



Figura 8.6. Esquema comparativo de las técnicas de plantación. A: siembra tradicional; B: técnica de plantación invertida de la parte pre-apical (pre-punta).

¿Se retrasa la brotación con la siembra invertida?

Es una pregunta inevitable y totalmente lógica. Cualquier productor observador notará que, a los nueve días después de la plantación, los brotes de los esquejes de pre-punta sembrados de forma invertida parecen más pequeños y atrasados en comparación con los de la siembra tradicional. Y tienen razón, es cierto, hay un retraso aparente en el desarrollo inicial de los brotes. Pero la fisiología explica por qué ocurre y, más importante aún, por qué ese retraso inicial no solo se compensa, sino que se traduce en una mayor productividad final.

Para entenderlo, primero hay que recordar qué es la pre-punta: un segmento de tallo que no tiene ápice (el ápice se quedó en la punta, que ya fue cortada). Lo que tiene son yemas axilares, una en cada nudo, ubicadas en la axila de cada hoja. En un esqueje de pre-punta de 25-30 cm, hay aproximadamente 4-5 nudos, cada uno con su yema axilar.

¿Qué ocurre en la siembra tradicional (pre-punta con la base hacia abajo)?

Cuando plantamos la pre-punta de forma convencional, las yemas axilares quedan orientadas hacia arriba, en su posición natural. No existe una yema apical dominante como en la punta, por lo que varias yemas axilares brotan simultáneamente. A los nueve días, observamos múltiples brotes en desarrollo, con un crecimiento inicial acelerado porque las yemas están en su orientación natural y responden rápidamente a las señales de luz y gravedad.

¿Qué ocurre en la siembra invertida (pre-punta con la base hacia arriba)?

Cuando plantamos el mismo esqueje pero invertido, las yemas axilares quedan orientadas hacia abajo. Aunque siguen siendo las mismas yemas, su orientación invertida genera un pequeño retraso inicial porque:

- Necesitan reorientar su crecimiento. Las yemas detectan la gravedad y la falta de luz en la dirección correcta, y deben redirigir su patrón de crecimiento para emerger hacia arriba. Este proceso de reorientación toma unos días adicionales.
- En la pre-punta, al no haber ápice, varias yemas axilares intentarán brotar, pero todas parten con la misma desventaja de orientación. Esto hace que el crecimiento inicial parezca más lento y los brotes más pequeños.

Sin embargo, lo crucial es entender qué está ocurriendo bajo tierra durante esos días:

Mientras las yemas axilares se reorientan lentamente hacia la luz, los nudos de la Zona de Oro (8-12) (que ahora están estratégicamente enterrados) están trabajando intensamente, activando sus primordios radicales, desarrollando un sistema fibroso denso y vigoroso, y preparando el escenario para la tuberización.

Lo que el productor ve a los nueve días es simplemente el reflejo de esa diferencia inicial de prioridades. En la siembra tradicional, el esqueje invierte primero en el crecimiento aéreo (brotes rápidos). En la siembra invertida, el esqueje invierte primero en el desarrollo radical (raíces vigorosas), mientras los brotes se toman unos días adicionales para reorientarse.

Y esa inversión temprana en el sistema radical (más denso, más profundo, más explorador) es la que marca la diferencia al final del ciclo. Cuando llegue la fase de llenado, la planta con mejores raíces tendrá mayor capacidad para absorber agua y nutrientes, sostener más raíces tuberosas y alcanzar un rendimiento superior.

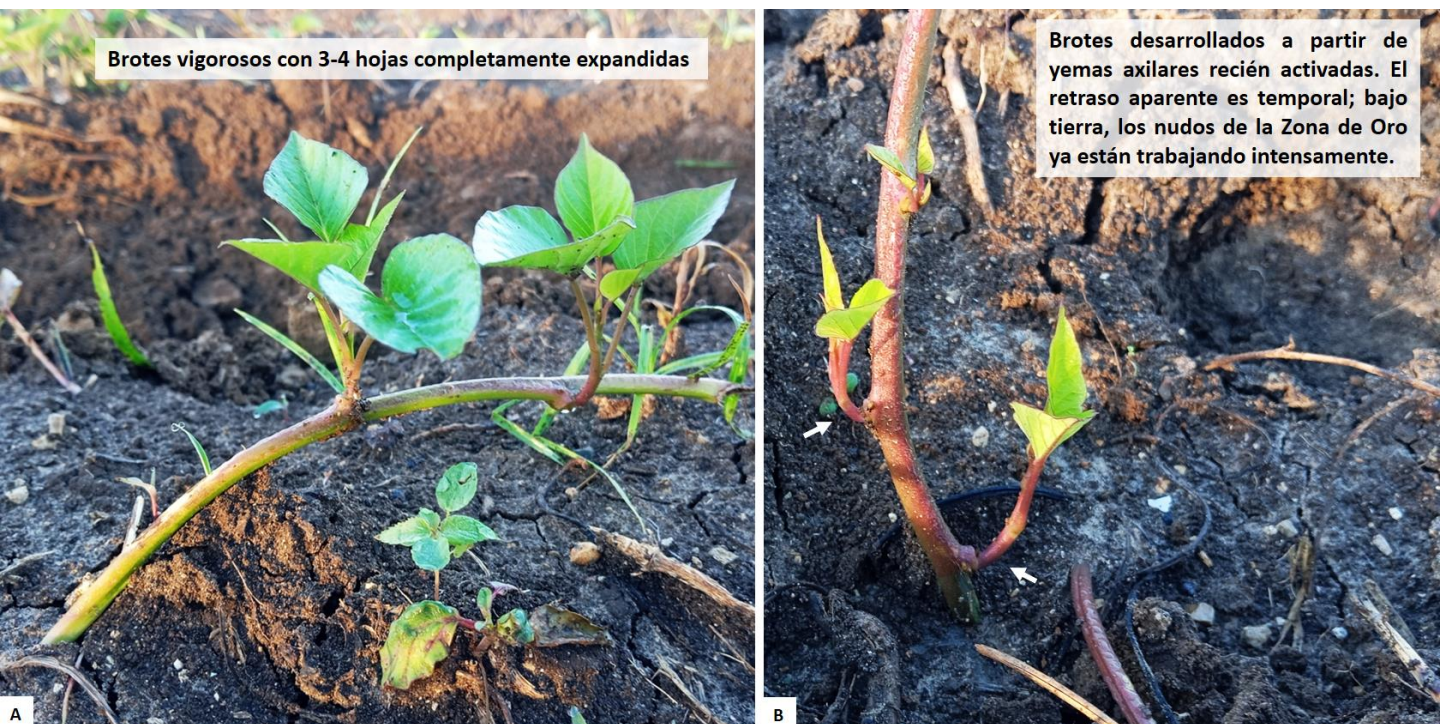


Figura 8.7. Desarrollo inicial de brotes a los nueve días después de la plantación. A: Siembra tradicional (ápice arriba); B: Siembra invertida (base arriba).

LO QUE IMPORTA ES LA COSECHA

Ese retraso inicial en los brotes, que tanto puede preocupar al productor, desaparece por completo al llegar la cosecha. Más aún, se transforma en una ventaja productiva cuantificable. Los resultados de nuestras evaluaciones son concluyentes.

Tabla 8.1. Comparación del rendimiento y componentes del rendimiento entre esquejes de pre-punta sembrados en posición tradicional vs. invertida.

| Variable | Pre-punta tradicional | Pre-punta invertida | Diferencia |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|
| Número de raíces por planta | 3-4 raíces de gran calibre | 5-7 raíces de tamaño medio | +40% más raíces |
| Peso promedio por raíz | 350-400 g | 280-320 g | -20% |
| Rendimiento total (t/ha) | 100% (base) | +10% | Incremento del 10% |

La respuesta está en lo que ocurrió bajo tierra durante esos primeros días:

- Pre-punta tradicional (ápice arriba): Priorizó el crecimiento aéreo desde el inicio. Sus nudos basales, los únicos enterrados, tienen menor capacidad de tuberización. Produce pocas raíces, pero de gran calibre porque concentra los fotoasimilados en pocos sumideros.
- Pre-punta invertida: Invertió sus primeras energías en desarrollar un sistema radical más extenso y denso a partir de los nudos de la Zona de Oro. Este sistema radical superior permite:
 - o Mayor exploración del suelo para agua y nutrientes.
 - o Soporte para un mayor número de raíces tuberosas.
 - o Una partición más eficiente de los fotoasimilados entre varios sumideros.

El resultado neto es un incremento del 10% en el rendimiento total, a pesar de que las raíces individuales son algo más pequeñas. En términos comerciales, esto significa más toneladas por hectárea y, frecuentemente, mejor uniformidad del producto.



Menor número de raíces, pero de gran tamaño. Rendimiento bueno, pero techo limitado por el potencial de los nudos basales.



Mayor número de raíces por planta, excelente uniformidad. Rendimiento total superior (+10%) gracias a la activación de la Zona de Oro.

Figura 8.8 Resultado final a la cosecha. Imagen comparativa de plantas cosechadas provenientes de esquejes de pre-punta sembrados con ambos métodos. A: Siembra tradicional (ápice arriba); B: Siembra invertida (base arriba).

VALIDACIÓN CON SECCIONES COMPLETAS

Después de comprender el potencial individual de cada nudo, era necesario llevar la investigación a la escala real de producción, evaluar la respuesta de las secciones completas de tallo, tal como los productores las utilizan en el campo. Para ello, se dividieron tallos de plantas madres en cuatro secciones típicas de 25-30 cm de longitud.

- Punta: Sección apical que abarca aproximadamente los nudos 1-10/11. Incluye el meristemo apical, hojas jóvenes en desarrollo y las primeras hojas completamente expandidas.
- Pre-punta: Sección inmediatamente siguiente, con nudos 11/12-15. Corresponde a la zona de hojas completamente funcionales y tallo con madurez intermedia.
- Media: Sección con nudos 16-20. Tallo con cierto grado de lignificación, hojas adultas que comienzan a mostrar signos de senescencia.
- Basal: Sección final, nudos 21-25 o más. Tallo lignificado, con hojas senescentes o caídas, próxima a la conexión con la raíz tuberosa de la planta madre.

Los resultados confirman, ahora a escala de esqueje completo, lo que ya habíamos observado en los nudos individuales.



Figura 8.9. Desarrollo radical a los 7 días después de la plantación en las cuatro secciones del tallo.

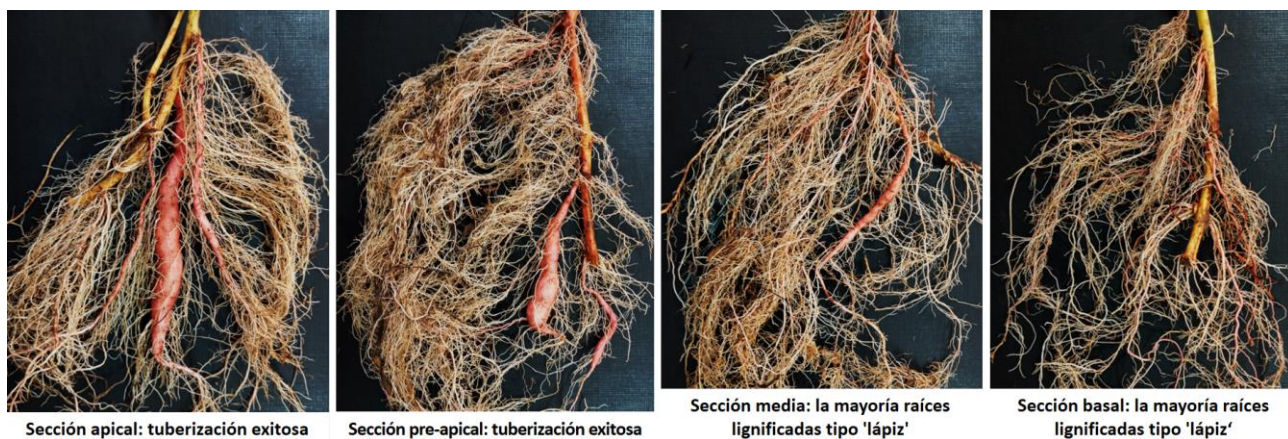


Figura 8.10. Resultado a los 60 días, formación de raíces de raíces tuberosas en las cuatro secciones del tallo.

EL PROBLEMA DE LA LIGNIFICACIÓN PRECOZ EN SECCIONES MEDIA Y BASAL

¿Por qué las secciones media y basal, que logran desarrollar cierto sistema radical fibroso, son frecuentemente incapaces de producir raíces tuberosas? La respuesta está en un proceso fisiológico irreversible, la lignificación prematura del tejido vascular.

En los nudos jóvenes (punta y pre-punta), el cambium vascular mantiene su plasticidad y responde a las señales hormonales que inducen la formación de parénquima de almacenamiento. Sin embargo, en los nudos de secciones media y basal, el estrés mecánico de su propia edad y la programación genética de senescencia activan la producción de etileno y otras hormonas que inducen la deposición de lignina en las paredes celulares.

Estas células lignificadas:

- Pierden su capacidad de dividirse para formar tejido de almacenamiento.
- Se vuelven rígidas e impermeables, dificultando el flujo de fotoasimilados.
- Constituyen barreras físicas que impiden el engrosamiento radial.

El resultado son esas raíces delgadas, duras y quebradizas que los productores conocen como "raíces tipo lápiz". No es que la planta no quiera tuberizar; es que el tejido perdió la capacidad anatómica de hacerlo.

Rendimiento comparativo

La calidad del material de plantación es el factor que determina el techo productivo del cultivo. Mientras las secciones apical y pre-apical (que contienen la zona de oro de nudos 8-12) alcanzan rendimientos comerciales que oscilan entre 38-42 t/ha, las secciones media y basal apenas logran producir entre 4-13 t/ha, y mayoritariamente de raíces no comerciales.

Esta diferencia de hasta 10 veces entre la mejor y la peor sección no es casualidad, es la expresión directa de la fisiología nodal que hemos explicado a lo largo de esta ley. Los nudos de la punta y la pre-punta poseen la combinación perfecta de madurez tisular, capacidad fotosintética y densidad de primordios radicales. La implicación es contundente: usar todo el tallo disponible como material de plantación no es aprovechamiento, es desperdicio. **Cada esqueje de sección media o basal que se planta representa una pérdida del 70% al 90% del rendimiento potencial** que podría obtenerse usando material de calidad. En términos prácticos, sembrar 10 hectáreas con material de sección media equivale, en rendimiento, a sembrar solo tres hectáreas con punta o pre-punta. El resto es tierra, agua, fertilizante y esfuerzo invertidos en una cosecha que nunca llegará.

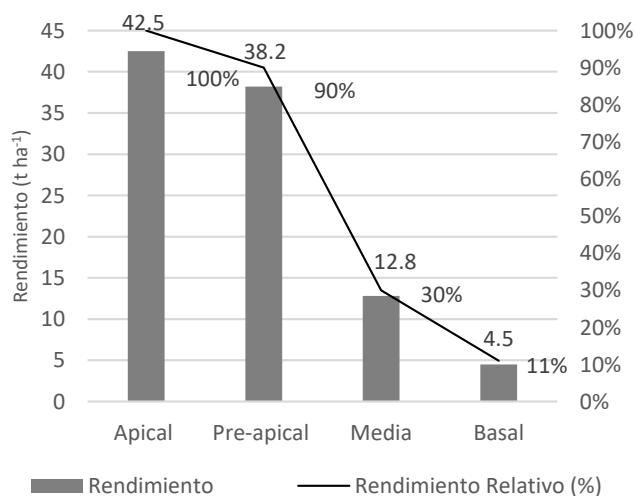


Figura 8.11. Rendimiento comparativo de las cuatro secciones del tallo.



Figura 8.12. Resultado final de la cosecha según la sección del tallo utilizada como semilla.

LEY 9

DEL CRECIMIENTO LIBRE



*La mala práctica que se
disfraza de tecnología*

Un esqueje no es una planta de maceta. Sus raíces no están hechas para vivir encerradas, sino para conquistar el suelo.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha surgido en algunos países de Centroamérica y en ciertos círculos académicos una práctica que se presenta como "moderna" y "eficiente": la producción de cepellones de boniato en bandejas de germinación. Se toman esquejes pequeños (a menudo de un solo nudo), se colocan en celdas individuales con sustrato, se les deja enraizar durante 10-15 días, y luego se trasplantan al campo formando un cepellón (*plug transplant*).

Esta técnica, importada del cultivo de hortalizas como tomate o pimiento, se vende como una solución para "acelerar" el cultivo y "mejorar" el prendimiento. Incluso algunos manuales la promueven como una práctica recomendable.

Pero hay una verdad que los promotores de esta técnica callan o ignoran, el boniato no es un tomate. Y lo que funciona para una planta de trasplante que vive 90 días en un surco no funciona para un cultivo de raíces que necesita libertad para expandirse desde el primer día.

En Cuba, donde la tradición de cultivo del boniato viene de los indios taínos y se ha perfeccionado durante siglos, esta práctica es vista con el escepticismo que merece. Y hoy, con la ciencia en la mano, vamos a demostrar por qué el cepellón es una práctica inadecuada que debe ser evitada.



Figura 9.1. Proceso de producción de cepellones en boniato y sus limitaciones. A: Esquejes sin hojas colocados en bandejas de germinación, una práctica que elimina la fuente de energía de la planta; B y C: Plántulas a los 15 días en la bandeja listas para trasplante; D: Detalle del fondo de la bandeja: las raíces fibrosas atraviesan los orificios de drenaje, se parten durante la manipulación y quedan comprimidas y deformadas por el confinamiento, comprometiendo su capacidad de explorar el suelo.

CEPELLÓN VS. SIEMBRA DIRECTA HORIZONTAL

Para evaluar el impacto real de esta técnica, comparamos el rendimiento de esquejes plantados en cepellón (mantenidos en bandeja durante 15 días y luego trasplantados) con el método tradicional: esquejes de 30 cm plantados directamente en campo en posición horizontal.

En la siembra directa horizontal, 4-5 nudos quedan enterrados, de los cuales al menos tres pertenecen a la zona de oro (nudos 8-12), activando múltiples yemas. En el cepellón, apenas 1-2 nudos se entierran en la celda de 3-5 cm de profundidad, desperdiciando más del 70% del potencial del esqueje. La diferencia es abismal, **20.5 toneladas por hectárea menos cuando se usa el método de cepellón**. Es la brecha entre una cosecha de alta productividad y un cultivo mediocre.

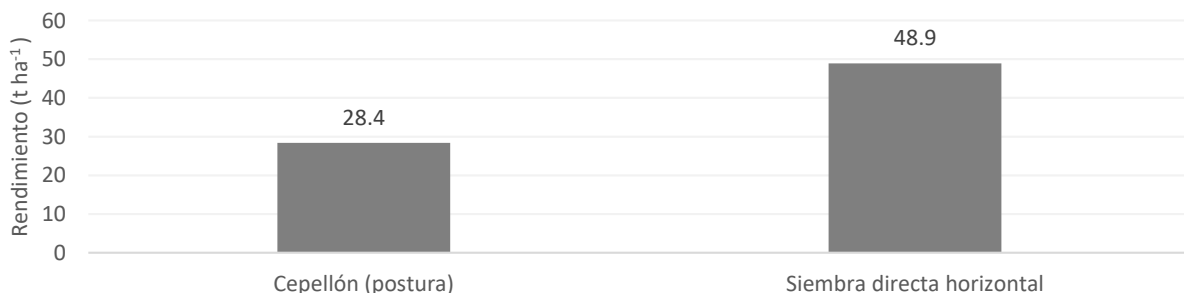


Figura 9.2. Rendimiento comparativo entre plantación directa horizontal y producción de cepellones en boniato.



Figura 9.3. Comparación del rendimiento y número de raíces tuberosas por planta según el método de plantación. A: Planta proveniente de cepellón; B: Planta proveniente de esqueje plantado directamente en posición horizontal.

LA REALIDAD QUE LOS PROMOTORES DEL CEPELLÓN OMITEN

El cepellón comprime las raíces en la fase más crítica de su desarrollo

Nuestras investigaciones sobre la producción de posturas de boniato en contenedores revelan un problema fundamental: las raíces, al crecer confinadas en una celda, desarrollan patrones anormales que comprometen para siempre su potencial productivo. Los esquejes producidos en contenedores presentan raíces en espiral y deformación radical cuando se mantienen en cepellones por más de cuatro semanas. Las raíces, al alcanzar las paredes de la celda, cambian su dirección de crecimiento, se enrollan y se comprimen, formando masas enmarañadas que luego, al trasplantarse al campo, no logran recuperar su arquitectura natural.

¿Por qué esto es catastrófico para el boniato? **Porque el número de raíces tuberosas se define en los primeros siete días después de la plantación (Ley 1)**. Si durante esa ventana crítica las raíces están comprimidas, deformadas y estresadas, la planta no podrá iniciar el proceso de tuberización con la eficiencia que requiere un alto rendimiento.

El cepellón limita drásticamente el número de nudos productivos enterrados

Un esqueje de boniato de calidad, como hemos establecido en la Ley 8, debe tener 5-7 nudos enterrados en posición horizontal, de los cuales 3-4 pertenecen a la Zona de Oro (nudos 8-12). Esto permite que múltiples yemas se activen simultáneamente, dando lugar (en promedio) a 3-5 raíces tuberosas por esqueje.

En un cepellón, por el contrario, solo se entierra un nudo (a veces dos) en una celda de 3-5 cm de profundidad. El resto del esqueje queda sobre la superficie. Esto significa que, de entrada, **el potencial productivo del esqueje se reduce a un tercio o una cuarta parte de lo que podría dar si se plantara directamente en campo con el método horizontal**.

El cepellón retrasa el desarrollo y condiciona las raíces a vivir confinadas

Los propios defensores de esta técnica reconocen que el período óptimo para trasplantar un cepellón de boniato es máximo tres semanas después de la siembra en bandeja. Pasado ese tiempo, las raíces se enrollan irreversiblemente y la calidad del trasplante se degrada. Pero incluso dentro de esa ventana, el daño ya está hecho, las raíces han crecido en un espacio artificial, con sustrato liviano y sin la resistencia mecánica que el suelo real ofrece.

Pero hay un factor aún más crítico: **el tiempo perdido**. Cuando plantamos por esquejes directamente en campo, a los 30 días el cultivo ya ha iniciado la tuberización, las raíces están explorando el suelo y el follaje comienza a cerrar el surco. Con los cepellones, en cambio, recién a los 30 días se están estableciendo. Esos 15 días de ventaja que tiene el esqueje convencional son irrecuperables. Mientras la planta en cepellón sufre el *shock* del trasplante y lucha por establecerse, **el esqueje sembrado directamente ya está construyendo su fábrica fotosintética y definiendo el número de raíces tuberosas**.

Al llegar al campo, las plantas en cepellón enfrentan un doble retraso: el confinamiento radical que ya sufrieron y la pérdida de la ventana de crecimiento inicial. El resultado es un cultivo que nunca alcanza a las plantas sembradas directamente, con menor vigor, menor potencial de rendimiento, menor cobertura y, al final, menor producción.



Figura 9.4. Raíces de boniato comprimidas por el confinamiento en cepellón. Se observa la formación de espirales, resultado del crecimiento forzado en un espacio reducido, condición que limita irreversiblemente el potencial productivo de la planta.

¿POR QUÉ ENTONCES SE PROMUEVE EL CEPELLÓN?

La respuesta tiene que ver con el contexto. En países donde el cultivo del boniato no tiene una tradición tan arraigada, a veces se adaptan técnicas de otras plantas, como las hortalizas, sin considerar que el boniato tiene necesidades muy distintas. En Cuba, donde llevamos más de 500 años cultivándolo, la experiencia nos ha enseñado que el esqueje plantado directamente en el suelo, en posición horizontal y a la profundidad justa, es lo que mejor resultado da. No quiere decir que sea la única forma, pero sí la que ha demostrado funcionar mejor en nuestras condiciones.

Una alternativa para quienes buscan eficiencia

Si el argumento para usar cepellones es ganar tiempo o facilitar la mecanización en grandes áreas, existe una respuesta mucho mejor que comprometer la fisiología del cultivo. La tecnología existe para plantar esquejes largos en posición horizontal, de forma mecanizada, sin necesidad de encerrar las raíces en un cepellón.

En China, donde la mecanización del boniato ha avanzado significativamente, se utilizan trasplantadoras horizontales que depositan los esquejes de 25-30 cm a la profundidad correcta, en posición horizontal, con una sola pasada. Estas máquinas realizan en un movimiento lo que tradicionalmente se hacía a mano: abren el surco, colocan el esqueje, lo entierran y compactan el suelo a su alrededor.



Figura 9.5. Trasplantadora horizontal de esquejes de boniato utilizada en China. Es la demostración de que se puede ser eficiente sin condenar al cultivo a crecer en un cepellón.

La Ley del Crecimiento Libre establece que el boniato no se beneficia de los cepellones ni de las posturas en bandeja. Esta práctica, importada de otros cultivos sin entender la fisiología única del boniato, limita el potencial productivo, deforma las raíces y reduce la eficiencia del cultivo.

En Cuba, donde la tradición y la ciencia se han unido para perfeccionar el manejo del boniato, sabemos que el camino es otro: esquejes largos, plantación horizontal, profundidad justa, y dejar que las raíces crezcan libres desde el primer día. No hay atajos. No hay sustitutos. Y no hay necesidad de complicar lo que la naturaleza, con siglos de sabiduría campesina y décadas de investigación científica, ya ha resuelto.

LEY 10

DEL MOMENTO OPORTUNO



La calidad del esqueje no es eterna; el reloj fisiológico del campo marca el límite de su potencial.

INTRODUCCIÓN

La productividad del boniato no depende solo de qué se siembra (la calidad del esqueje), sino también de cuándo se toma ese material para sembrar. Esta ley desentraña una interacción fundamental que todo productor debe conocer, la calidad fisiológica de los esquejes de punta tiene una ventana óptima de aprovechamiento, y fuera de ella, incluso el mejor material ve comprometido su potencial.

Los resultados de nuestras investigaciones con esquejes de punta demuestran que la edad del campo para producir semilla (al momento del corte) es una variable crítica que determina el éxito de la plantación. No es lo mismo cortar esquejes de una planta joven y vigorosa que de una planta que ya está destinando todas sus energías al llenado de sus propias raíces.

LOS TRES MOMENTOS CRÍTICOS DEL CORTE

Cuando evaluamos la respuesta de esquejes de punta cortados a diferentes edades del banco de semilla, encontramos un patrón claro que define tres momentos críticos:

A los 60-70 días. El punto óptimo de máximo vigor. Los esquejes cortados a los 60-70 días después de la plantación del banco de semilla alcanzan el máximo rendimiento (39.5 t/ha). A esta edad, la planta madre se encuentra en su punto de equilibrio fisiológico ideal.

- Máximas reservas de carbohidratos acumuladas en los tallos durante la fase de crecimiento activo.
- Alta concentración de hormonas de crecimiento juvenil (auxinas, citoquininas) que promueven un enraizamiento rápido y vigoroso.
- Meristemos apicales plenamente activos, listos para continuar su desarrollo al ser trasplantados.
- Hojas completamente funcionales en cada nudo, capaces de sostener la demanda energética del establecimiento.

Al ser cortados y plantados en este momento, los esquejes utilizan sus abundantes reservas y su potente señal hormonal para un enraizamiento agresivo y un establecimiento acelerado, capturando recursos y desarrollando un sistema foliar robusto antes de iniciar la tuberización.

A los 90-100 días. Inicio de la transición. A los 90-100 días, los esquejes de punta mantienen un buen rendimiento (37.1 t/ha), aunque comienza a observarse una leve disminución. La planta madre ha iniciado la fase de llenado de sus propias raíces tuberosas y comienza a redirigir recursos desde los tallos hacia los órganos de reserva. Los ápices (los centros de crecimiento activo) aún mantienen suficiente vigor, pero las reservas de carbohidratos en los tallos ya no son las máximas.

A los 120 días. El declive se acelera. A los 120 días, los esquejes de punta muestran una reducción más pronunciada del rendimiento (aproximadamente 35.5 t/ha), significativamente inferior al máximo de los 70 días. La planta madre está próxima a la madurez de cosecha y ha movilizado la mayor parte de sus recursos hacia las raíces. Los tallos han perdido una proporción importante de sus reservas, y los meristemos apicales han reducido su actividad. Cortar en este momento significa obtener esquejes agotados, con menor capacidad de enraizamiento y establecimiento.

La ventana de oportunidad, aunque amplia, tiene un límite claro, más allá de los 100 días, la calidad del material comienza su declive irreversible.

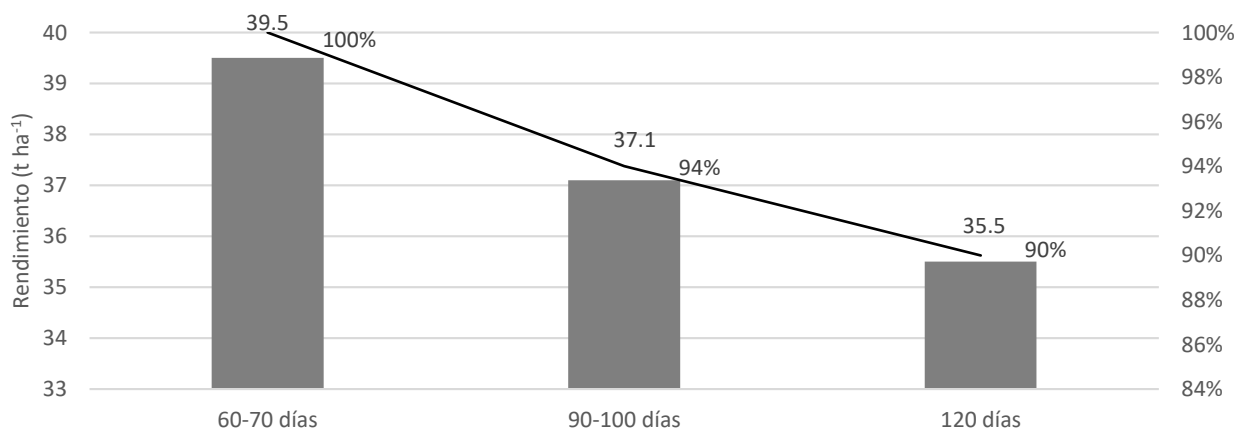


Figura 10.1. Ventana óptima de corte para esquejes de punta.

La edad del banco de semilla es un indicador fisiológico del estado de las reservas en los tallos y del potencial de los esquejes. Nuestros estudios demuestran que los esquejes de punta alcanzan su máximo rendimiento cuando se cortan entre los 60-70 días después de la plantación, y mantienen una calidad aceptable hasta los 100 días. Pasado este punto, el declive es inevitable.

Conocer y respetar este reloj fisiológico es la diferencia entre sembrar con material en su máximo esplendor o hacerlo con esquejes que ya han pasado su mejor momento. Y en agricultura, como en la vida, el momento oportuno lo es todo.



LEY 11

DE LA DEGENERACIÓN CLONAL

La semilla propia no es gratis, cada ciclo sin renovación es una cuota de la deuda genética que se paga en la cosecha.

INTRODUCCIÓN

La posibilidad de usar los propios esquejes de una cosecha para sembrar la siguiente es una de las ventajas aparentes del boniato. Parece lógico, económico y autosuficiente: **la semilla es gratuita**. Sin embargo, los datos de nuestra investigación revelan la dura realidad detrás de esta práctica, lo que se ahorra en dinero al no renovar la semilla, se paga multiplicado en toneladas perdidas en el campo. Esta es la paradoja.

En la práctica cotidiana, los productores cortan y vuelven a cortar, generación tras generación, sin llevar registro de cuántas veces se ha multiplicado ese material. Un campo puede tener 5, 8, 12 o más generaciones de multiplicación vegetativa continua, y nadie sabe realmente el número exacto de ciclos que lleva esa semilla. Lo que parece un ahorro se convierte en una deuda invisible que crece silenciosamente.

Cada ciclo de multiplicación vegetativa sin un reseteo científico no es un nuevo comienzo, sino la acumulación de una deuda genética y patológica que, ciclo tras ciclo, cobra un interés cada vez más alto en forma de menor vigor, retraso en el desarrollo y, finalmente, un colapso del rendimiento.

Los números de nuestras evaluaciones a lo largo de diez generaciones sucesivas de multiplicación vegetativa cuentan una historia clara y alarmante:

Generaciones 1 a 4. La falsa estabilidad

En las primeras generaciones, el sistema mantiene cierta apariencia de estabilidad. El inicio de la tuberización oscila entre los 36-41 días, y el rendimiento se mantiene por encima de las 40 toneladas por hectárea. La planta aún conserva gran parte del vigor original. El productor observa su campo y cree que todo marcha bien. Pero bajo la superficie, el deterioro ya ha comenzado.

Generaciones 5 a 8: La decadencia acelerada

A partir de la quinta generación, comienza la fase de decadencia acelerada. El inicio de la tuberización se retrasa progresivamente (de 44 a 47 días), indicando que los mecanismos fisiológicos que disparan el engrosamiento de la raíz están fallando. El rendimiento cae en picada, desde 37.8 t/ha hasta 33.1 t/ha. La deuda comienza a cobrarse de manera evidente, aunque muchos productores aún no relacionan la caída con la edad de su semilla.

Generaciones 9 y 10: El colapso productivo

Es la fase de colapso. La planta tarda 54-60 días en iniciar la tuberización, perdiendo casi un mes crucial de crecimiento eficiente. El rendimiento se desploma a 26.5 y 21.4 t/ha, respectivamente. Esto representa una pérdida de más del 50% del potencial productivo original. Lo que era un cultivo de alto rendimiento se ha convertido, por pura degeneración, en un cultivo mediocre. El campo que antes producía 45 toneladas apenas alcanza ahora 20.



LA LÍNEA DE RESCATE

Frente a esta caída inexorable, **la semilla mejorada** (regenerada a partir de raíces tuberosas seleccionadas según la metodología que explicaremos en la siguiente ley) marca un punto de inflexión. Con un inicio de tuberización de 45 días y un rendimiento de 36.6 t/ha, no vuelve al punto de partida original (45 t/ha), pero detiene y revierte drásticamente el declive, superando en un **71% a la semilla degenerada de la generación 10** (21.4 t/ha).

Esto prueba algo fundamental. la degeneración no es un destino inevitable, sino un proceso que puede y debe ser interrumpido. La naturaleza nos da una oportunidad de resetear el reloj, y es nuestra responsabilidad aprovecharla.

El gráfico muestra cómo el rendimiento se mantiene en niveles altos durante las primeras 4 generaciones, comienza un declive acelerado a partir de la generación 5 y colapsa en las generaciones 9-10. Paralelamente, el inicio de la tuberización se retrasa progresivamente, evidenciando el deterioro fisiológico.

La lección es clara, **la semilla original** (45 t/ha) degenera hasta 21 t/ha después de 10 generaciones sin renovación. La renovación mediante raíces tuberosas (semilla mejorada) alcanza 36 t/ha, **recuperando el 80% del potencial original** y demostrando que el conocimiento aplicado vale más que cualquier insumo costoso.

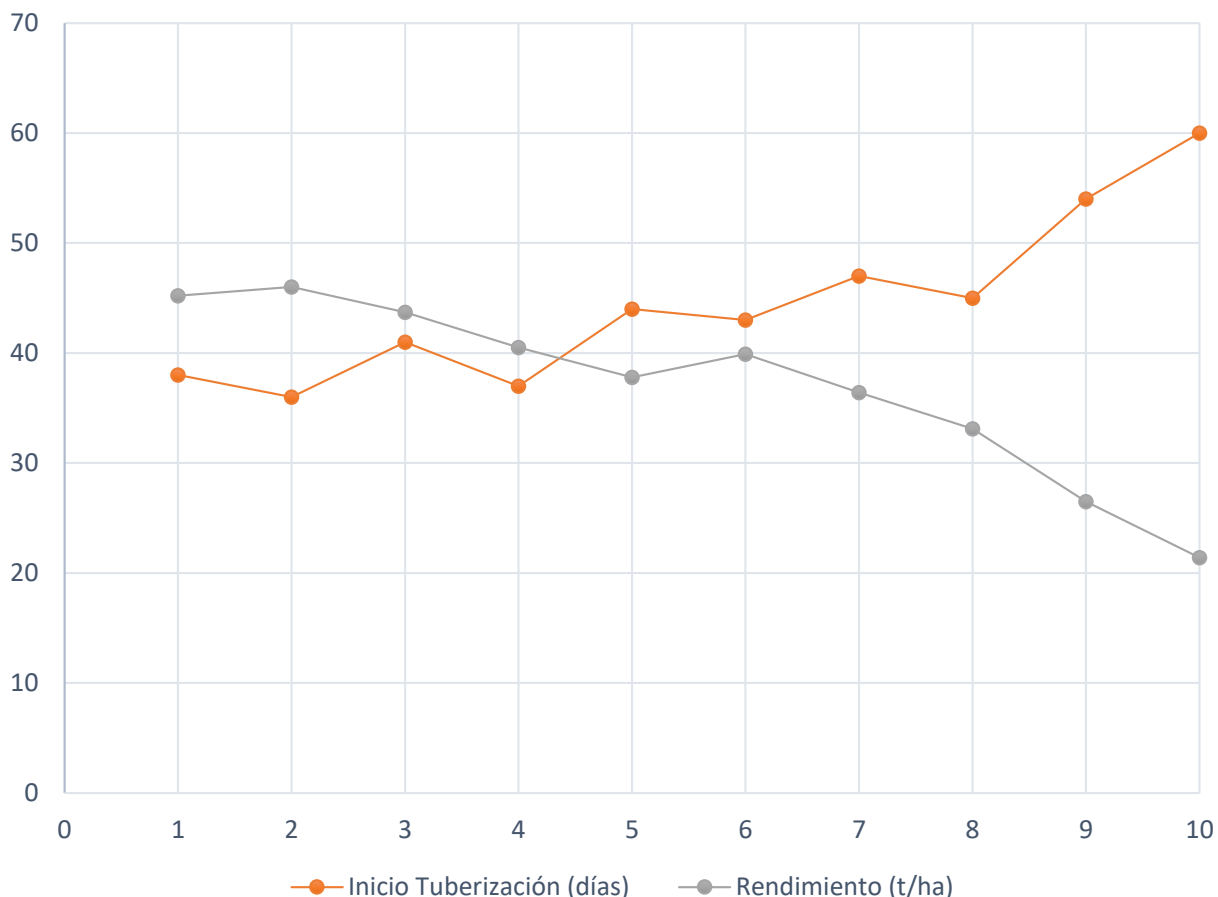


Figura 11.1. La deuda oculta de la semilla propia. Relación inversa entre el número de generaciones de multiplicación vegetativa, el rendimiento y el inicio de la tuberización.

LA RAÍZ FISIOLÓGICA DEL PROBLEMA

La causa de este declive no es una sola, sino un fenómeno multifactorial donde la acumulación de patógenos es solo una parte, aunque crucial, del problema.

DEGENERACIÓN PATOLÓGICA. LA CARGA VIRAL SILENCIOSA

Es el factor más conocido y, en condiciones tropicales, el de consecuencias más devastadoras. En Cuba y regiones vecinas, los virus que afectan al boniato son múltiples y actúan con frecuencia en sinergia, potenciando sus efectos destructivos.

Los virus más comunes en Cuba y el Caribe

En nuestras condiciones tropicales, los virus que afectan al boniato son múltiples y actúan con frecuencia en sinergia, potenciando sus efectos destructivos. Los más importantes son:

Sweepoviruses (Begomovirus). Transmitidos por mosca blanca, estos virus están ampliamente distribuidos en cultivares comerciales y variedades locales. Dos especies resultan particularmente relevantes: el *Sweet potato leaf curl virus* (SPLCV) y el *Sweet potato golden vein associated virus* (SPGVAV), este último un virus recombinante de comportamiento especialmente agresivo. Lo más preocupante de estos virus es que pueden infectar la planta sin manifestar síntomas visibles. **Hemos confirmado la presencia del virus en plantas de aspecto completamente normal, lo que significa que el patógeno puede estar acumulándose silenciosamente en el campo**, multiplicándose generación tras generación a través de los esquejes, mientras el productor cree que su semilla está sana.

Sweet potato chlorotic stunt virus (SPCSV). Transmitido por mosca blanca, este virus actúa como un verdadero facilitador o cómplice de otros virus. Por sí solo causa daños moderados, pero cuando coinfecta con otros virus (especialmente con el SPFMV) la concentración viral se multiplica y los síntomas se agravan dramáticamente, dando lugar al complejo viral más destructivo que conocemos.

Sweet potato feathery mottle virus (SPFMV). Es el virus de distribución más amplia en nuestra región. Presenta diferentes cepas (O, RC, EA) que producen síntomas variables según el cultivar y las condiciones. En las hojas puede causar desde manchas amarillas difusas, anillos púrpuras, hasta un característico patrón plumoso a lo largo de las nervaduras. Pero el daño más grave ocurre en las raíces, la cepa RC produce la llamada corchosis interna (*internal cork*), pequeñas manchas marrones o negras que aparecen en la pulpa, visibles después de la cosecha y durante el almacenamiento. Además, causa grietas externas en anillos alrededor de las raíces tuberosas.



Figura 11.2. Síntomas característicos de infección por la cepa RC del *Sweet potato feathery mottle virus* (SPFMV) en raíces de boniato. Se observan anillos concéntricos y grietas necróticas (agrietamiento pardo o *russet crack*) que recorren la superficie de la raíz.

EL EFECTO SINÉRGICO, CUANDO LOS VIRUS SE COMBINAN

El verdadero peligro no reside en infecciones individuales, sino en las infecciones múltiples. Cuando el SPFMV ocurre en combinación con el SPCSV (complejo conocido como SPVD, *Sweet Potato Virus Disease*), la concentración del virus se multiplica exponencialmente y los síntomas se agravan, aparece enanismo severo, clorosis generalizada y deformación foliar. Las plantas afectadas por este complejo viral prácticamente detienen su crecimiento.



Figura 11.3. Síntomas de infección viral severa en plantas de boniato: clorosis generalizada, enanismo, deformación foliar y mosaico.

Los vectores

Estos virus no viajan solos. Cuentan con vectores eficientes que los diseminan de planta a planta y de campo a campo:

- **Áfidos:** Transmiten el SPFMV de manera no persistente. Basta con que el insecto se alimente brevemente de una planta infectada para adquirir el virus y transmitirlo a la siguiente planta sana en cuestión de minutos.
- **Moscas blancas (*Bemisia tabaci*):** Son los vectores del SPCSV y de los *sweepoviruses* (SPLCV). A diferencia de los áfidos, estos virus son persistentes y circulativos, el insecto los adquiere, los retiene por más tiempo y puede seguir transmitiéndolos mientras se alimenta.

BARRERAS FÍSICAS Y AISLAMIENTO ESPACIAL

Una vez que los vectores (áfidos y moscas blancas) adquieren los virus de fuentes externas o de cultivos viejos, el viento facilita su desplazamiento hacia las plantaciones nuevas. Para interrumpir este viaje, la implementación de barreras físicas es una estrategia altamente efectiva y económica.

Las barreras vegetales (maíz, plátano, sorgo) funcionan como un filtro. Los insectos vectores, al volar, tienden a detenerse en estas plantas altas antes de alcanzar el cultivo. Al posarse sobre hojas de maíz o plátano (especies no hospedantes de los virus del boniato), los áfidos pierden o inactivan el virus en sus estiletes, reduciendo su capacidad de transmitir la enfermedad.

En ensayos de campo en el INIVIT, la combinación de semilla libre de virus con una barrera perimetral de plátano redujo la incidencia viral del 65% al 12% e incrementó el rendimiento en un 54% en comparación con la semilla tradicional sin barrera.

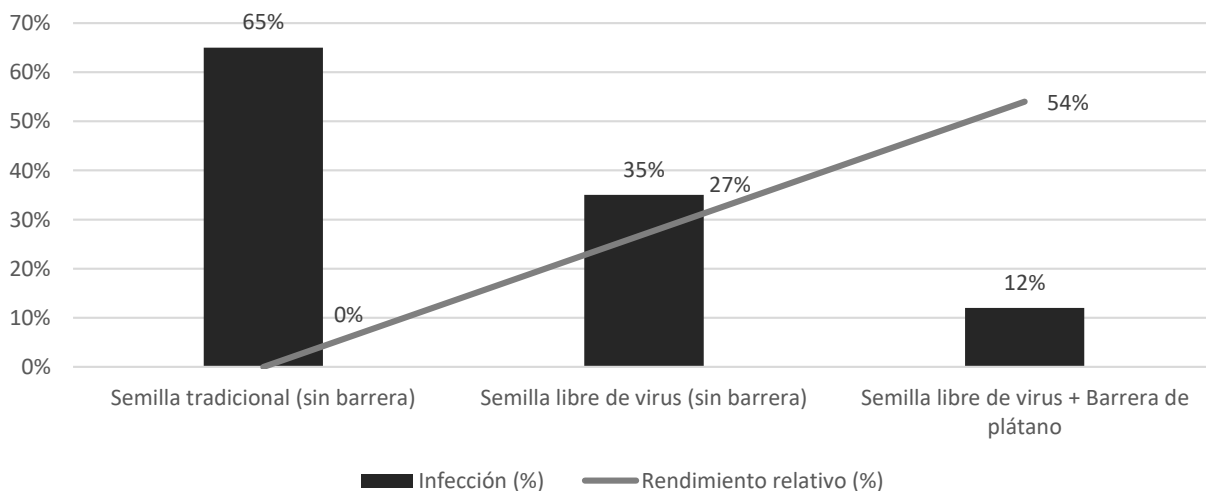


Figura 11.4. Efecto de la calidad de la semilla y de las barreras vivas sobre la infección viral y el rendimiento del boniato.

Esta técnica es particularmente valiosa para la producción de semilla básica o certificada. Los bancos de semilla deben establecerse rodeados de barreras de maíz o plátano y aislados a más de 15 metros de cualquier cultivo comercial de boniato. De esta forma, se protege el material genético de alta calidad que luego se multiplicará en los sistemas de producción de semilla (Métodos 1, 2 y 3 de la Ley 12), asegurando que el proceso de rejuvenecimiento no sea anulado por una reinfección viral temprana.

A diferencia del maíz (ciclo corto), el plátano es una barrera perenne que, una vez establecida, ofrece protección durante varios ciclos de cultivo sin necesidad de sembrarse.



Figura 11.5. Implementación de barreras físicas en el cultivo de boniato.

LA VÍA MÁS PELIGROSA. LA TRANSMISIÓN POR ESQUEJES

Pero el mecanismo de propagación más relevante para entender la degeneración clonal es otro, la transmisión por esquejes. Cuando un productor toma material de siembra de un campo infectado (aunque las plantas madre no muestren síntomas evidentes), está cortando y plantando el virus junto con el esqueje. Cada nueva generación multiplica no solo la planta, sino también la carga viral acumulada. Esta es la razón por la que la degeneración es progresiva e inevitable si no se interviene.

A medida que la calidad del esqueje disminuye (de punta a basal), la incidencia de síntomas virales aumenta progresivamente. Las plantas provenientes de segmentos basales (los más viejos del tallo) alcanzan el mayor porcentaje de enanismo (28.3%) y clorosis (26.3%). Por el contrario, las plantas procedentes de puntas, que contienen los nudos más jóvenes y fisiológicamente activos, presentan la menor sintomatología. Esto confirma que la degeneración viral no es aleatoria, se acumula en los tejidos más viejos y se transmite por el material de plantación de menor calidad. La recomendación es clara: para reducir la presión viral, deben emplearse exclusivamente esquejes apicales (punta y pre-punta), que son los que presentan menor incidencia de síntomas.

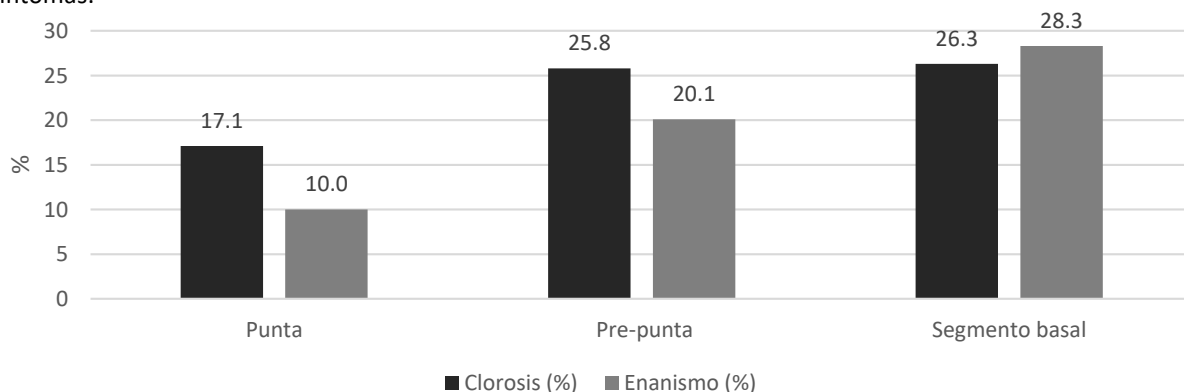


Figura 11.16. Incidencia de síntomas virales (clorosis y enanismo) según el tipo de semilla utilizada (punta, pre-punta o segmento basal). Estos resultados del INIVIT evidencian la importancia de seleccionar esquejes de la zona apical para reducir la presión viral en el cultivo.

Además de la calidad de la semilla, se ha identificado que cuatro especies de arvenses presentes en los campos de boniato actúan como hospedantes de potyvirus: *Amaranthus hybridus*, *Amaranthus spinosus*, *Euphorbia heterophylla* y *Digitaria adscendens*. Su eliminación durante la preparación del suelo y el manejo del cultivo reduce la presión de inóculo viral sobre la plantación (especialmente en bordes de campos y áreas aledañas).

¿Qué ocurre dentro de la planta?

Los virus secuestran la maquinaria celular de la planta. Desvían recursos (aminoácidos, nucleótidos, energía) que deberían destinarse al crecimiento y al almacenamiento en la raíz, y los redirigen hacia su propia replicación. El resultado es un metabolismo desbalanceado:

- Reducción del área foliar: Menos hojas funcionales significa menos capacidad fotosintética.
- Clorosis: La pérdida de clorofila reduce aún más la captura de energía lumínica.
- Alteración del floema: Especialmente en infecciones por SPCSV, el tejido vascular se daña, interrumpiendo el flujo de fotoasimilados desde las hojas (fuente) hacia las raíces (sumidero).

La planta afectada dedica su energía a sobrevivir, no a producir. Y lo más peligroso es que este deterioro es silencioso y progresivo. Durante las primeras generaciones de multiplicación vegetativa, los síntomas pueden ser imperceptibles (hojas ligeramente más pequeñas, un tono verde menos intenso, un retraso mínimo en el desarrollo) pero la carga viral ya está acumulándose, la deuda está creciendo. Cuando el productor finalmente observa plantas enanas, cloróticas y deformes, el colapso ya es evidente y las pérdidas, irreversibles para ese ciclo.

DEGENERACIÓN GENÉTICO-FISIOLÓGICA

Este es un aspecto igualmente crítico y menos visible, pero de consecuencias profundas:

- **Acumulación de mutaciones somáticas.** En cada división celular que ocurre durante el crecimiento de una planta, pueden ocurrir pequeños errores (mutaciones). En la propagación sexual (por semilla botánica), estos errores se diluyen y recombinan en la siguiente generación, minimizando su impacto. Pero en la propagación vegetativa (donde cada nueva planta es un clon de la anterior), las mutaciones se acumulan y se clonan generación tras generación. Con el tiempo, estas mutaciones en tejidos somáticos pueden afectar genes relacionados con el vigor, la eficiencia fotosintética o la señalización hormonal para la tuberización.



Figura 11.17. Mutaciones somáticas espontáneas en la piel de raíces tuberosas de boniato. A, B: Raíces de un genotipo de piel roja que presentan sectores con piel amarilla, evidenciando inestabilidad genética en células del meristemo responsable de la pigmentación; C: Planta en campo de un genotipo de piel roja, mostrando en la misma planta raíces con el fenotipo rojo típico junto a una raíz completamente amarilla, resultado de una mutación somática que afectó la piel de toda la raíz tuberosa.

- **Pérdida del vigor híbrido (heterosis).** Las variedades modernas de boniato son híbridas y expresan su máximo potencial gracias a la interacción compleja de sus genomas parentales (heterosis). Con la multiplicación vegetativa continua, esta interacción óptima se puede desestabilizar epigenéticamente (cambios en la expresión de los genes sin alterar su secuencia), llevando a una pérdida gradual de ese vigor inicial que hizo exitosa a la variedad.
- **Alteración del balance hormonal endógeno.** La capacidad de una yema para enraizar y luego iniciar una raíz tuberosa depende de una coreografía precisa de auxinas, citoquininas, giberelinas y ácido abscísico. La carga viral acumulada y el estrés fisiológico continuo alteran la producción y sensibilidad a estas hormonas. Esto explica directamente el retraso progresivo en el inicio de la tuberización observado en los datos, la señal hormonal para comenzar a engrosar llega tarde y débil, y cuando llega, la planta ya ha perdido un tiempo precioso.



DEGENERACIÓN POR CONTAMINACIÓN GENÉTICA

Existe una tercera forma de degeneración, menos conocida pero igualmente devastadora, la contaminación genética por semilla botánica. El boniato es un cultivo que se propaga por esquejes, pero es una especie sexualmente funcional. En el Caribe, el fotoperiodo corto y las temperaturas frescas de noviembre a abril inducen la floración en muchas variedades. De esas flores se forman cápsulas que contienen de 1-4 semillas verdaderas.

El problema no es la abundancia de semillas, sino su consecuencia. Aunque la semilla botánica tiene una testa dura y solo un pequeño porcentaje germina de forma natural, en un campo de miles de plantas ese pequeño porcentaje puede significar cientos de plántulas voluntarias (*seedlings*) mezcladas con el cultivo.

El engaño morfológico. Estos *seedlings* son prácticamente indistinguibles de la planta madre en sus primeras etapas: pueden tener la misma forma de hoja, color de tallo y hábito de crecimiento. Durante las labores de corte de esquejes, pasan desapercibidos.

El engaño fisiológico. Mientras una planta proveniente de esqueje (clonal) desarrolla raíces adventicias que rápidamente se engrosan, un *seedling* desarrolla una raíz principal de origen seminal, que no es la que produce boniatos comerciales; las raíces tuberosas que eventualmente forma son de menor calibre, irregulares y tardíos. Sin embargo, los tallos que brotan de esta planta son perfectamente viables para usarse como esquejes.

La contaminación clonal. Al realizar el corte masivo para la próxima plantación, los esquejes de estos *seedlings* se mezclan indiscriminadamente con los del clon puro y productivo. Al sembrarse, estos esquejes contaminados darán plantas que expresarán una combinación genética nueva, impredecible y casi siempre inferior: menor rendimiento, forma irregular de la raíz, distinta madurez y mayor susceptibilidad a plagas. **En pocos ciclos, el campo deja de ser un cultivo uniforme para convertirse en una población variable y degenerada.**

Esta amenaza se previene con tres acciones simples pero esenciales:

- Cosechar antes de que madure la semilla. En siembras que coincidan con el período de floración (finales de verano), planificar la cosecha a los 90-100 días, antes de que las semillas viables se dispersen.
- Elegir cultivares con baja floración. Clones como el 'INIVIT B-50' presentan flores estériles o con alta tasa de caída, reduciendo drásticamente el riesgo.
- Eliminación selectiva. Antes de cortar esquejes, inspeccionar el campo y eliminar cualquier planta sospechosa de ser *seedling*. Un indicador clave en etapas avanzadas es la ausencia de tuberización o una forma de raíz atípica.





Figura 11.18. Ciclo de contaminación genética por semilla botánica (*seedlings*) en boniato. A: Campo de boniato en floración (noviembre-abril); B: Cápsula dehiscente con semillas en su interior; C: Semillas botánicas con testa dura; D: *Seedling* a los cuatro días después de la germinación; E: *Seedling* a los 12 días, mostrando desarrollo de raíz principal; F: *Seedlings* cosechados: se observa la raíz principal engrosada de origen seminal; G: Productor cortando y preparando un mazo de esquejes, donde los *seedlings* pasan desapercibidos y se mezclan con el material puro, perpetuando la contaminación genética; H: Planta adulta de la variedad comercial junto a un *seedling* camuflado de pocos días.

CONSECUENCIA INTEGRADA

Una planta debilitada por virus y por alteraciones genético-fisiológicas es más susceptible al estrés ambiental: sequía, altas temperaturas, baja fertilidad. Este estrés, a su vez, genera radicales libres que causan más daño celular, acelerando aún más el proceso degenerativo.

Además, una planta de follaje reducido y raíces menos eficientes es un blanco más fácil para plagas como el tetuán, que encuentra en estos cultivos débiles un hábitat ideal para establecerse y multiplicarse. Se cierra así un círculo vicioso de deterioro: la planta degenerada atrae más plagas, el daño de las plagas acelera la degeneración, y el ciclo se repite cosecha tras cosecha.

La semilla mejorada (con un rendimiento de 36.6 t/ha) demuestra que recuperar 15 de esas 24 toneladas perdidas es posible con una práctica simple y al alcance de cualquier productor: seleccionar raíces tuberosas de 70-100 gramos de los mejores campos y usarlos para regenerar el material de siembra cada 3-4 ciclos. Esta técnica de renovación de la semilla a partir de raíces tuberosas, que explicaremos en detalle en la LEY 12: DE LA REGENERACIÓN TUBEROSA, permite resetear el reloj degenerativo, eliminar gran parte de la carga viral acumulada y recuperar el vigor perdido sin depender de costosos sistemas de laboratorio.

En el boniato, como en las finanzas, la deuda mal administrada crece con el tiempo. Y como en las finanzas, la mejor estrategia es no dejar que la deuda se acumule. Renovar la semilla, ya sea mediante el método de raíces tuberosas seleccionadas o, idealmente, con material certificado de origen *in vitro*, es la inversión más rentable que puede hacer un productor.

En el boniato, la semilla barata es la más cara.



FASCIEACIÓN

La fasciación (del latín fascis, "hazo" o "manejo") es una malformación del crecimiento vegetal que se caracteriza por un aplanamiento y ensanchamiento anormal del tallo. En lugar de crecer con una forma cilíndrica típica, el órgano afectado se expande lateralmente, adoptando una apariencia de cinta.

Causas

Hasta la fecha, la literatura agronómica y botánica no ha identificado una causa única y concluyente para la fasciación en el boniato. La mayoría de los manuales de cultivo y guías técnicas reconocen el fenómeno, pero señalan que sus causas no están completamente dilucidadas.

Un hallazgo experimental decisivo del INIVIT, es que la fasciación no es un carácter genético estable. Cuando se toman esquejes de tallos fasciculados y se siembran, las plantas resultantes son completamente normales. Si la causa fuera genética o una mutación estable, la anomalía se perpetuaría en los esquejes. El hecho de que no ocurra así confirma que la fasciación **es una malformación fisiológica transitoria**, inducida por condiciones de estrés durante el desarrollo del meristemo, pero que no se transmite a las siguientes generaciones vegetativas.

La hipótesis más sólida sugiere que la fasciación es el resultado de un desequilibrio en la concentración o distribución de las **hormonas vegetales**, principalmente las **auxinas y las citoquininas**. El meristemo apical de una planta normal mantiene un patrón de división celular ordenado. Un exceso localizado de auxinas o una distribución anómala de estas hormonas puede provocar que el meristemo se ensanche en lugar de mantener su forma puntiaguda característica. En lugar de dividirse en un solo punto de crecimiento, el meristemo se alarga lateralmente, produciendo un tallo o una raíz aplanada con múltiples puntos de crecimiento en una misma superficie.



LEY 12

DE LA REGENERACIÓN TUBEROSA



Cuando la semilla se degenera, la raíz tuberosa guarda la clave para reiniciar el ciclo.

INTRODUCCIÓN

La producción de boniato en Cuba enfrentó, y en gran medida aún enfrenta, un desafío estructural a partir de la década de 1990, el colapso del sistema nacional de certificación de semilla agámica. Al interrumpirse la producción oficial de material original o básico, los productores quedaron atrapados en un ciclo vicioso de multiplicación degenerativa clonal. Esta práctica de multiplicar la propia semilla sin certificación, extendida por necesidad, tuvo consecuencias catastróficas y medibles:

- Acumulación patogénica: Propagación sistémica de virus (como el complejo del achaparramiento, SPVD) que debilitan la planta de forma crónica.
- Degradación genético-fisiológica: Acumulación de mutaciones somáticas negativas que reducen el vigor, la capacidad de enraizamiento y la eficiencia fotosintética.
- Caída dramática del rendimiento: Se estima que el potencial productivo nacional disminuyó aproximadamente en un 40% debido a la combinación de estos factores, además del aumento de la vulnerabilidad a plagas como el tetuán.

Frente a esta emergencia, desde el INIVIT se asumió la responsabilidad de producir semilla original y básica, llegando a generalizarse tecnologías que produjeron millones de esquejes. Además, se desarrollaron y validaron diversas metodologías de rescate tecnológico. Estas soluciones no pretenden sustituir un sistema formal de certificación, sino ofrecer herramientas prácticas para que cualquier productor pueda romper el ciclo de degeneración y regenerar su propio material de plantación con calidad mejorada.

El principio biológico que subyace a todas ellas es sólido, la raíz tuberosa es una unidad de propagación agámica natural y, crucialmente, **un punto de reinicio sanitario y fisiológico**. Mientras que un esqueje de tallo arrastra la historia de degeneración de la planta madre (con toda la carga viral acumulada durante generaciones de multiplicación), la raíz tuberosa ofrece un tejido comparativamente más protegido.



¿POR QUÉ OCURRE ESTE REJUVENECIMIENTO?

Durante la formación de la raíz tuberosa, la mayoría de los virus sistémicos no logran trasladarse eficientemente a las células del parénquima de reserva o lo hacen en concentraciones mucho más bajas que en los tejidos vegetativos. Al plantar una raíz tuberosa, se parte de una carga viral inicial drásticamente reducida, lo que equivale a un reseteo sanitario.

Además, la raíz tuberosa es un órgano de reserva cargado de carbohidratos, proteínas y reguladores del crecimiento. Cuando las yemas se activan, disponen de una fuente de energía inmediata y abundante para lanzar un crecimiento explosivo, a diferencia del esqueje de tallo que depende de las reservas limitadas de su tejido en el momento del corte.

Estudios del INIVIT han cuantificado este efecto, la semilla regenerada por raíz tuberosa incrementa los rendimientos hasta en un 71% respecto al material altamente degenerado, recuperando más del 80% del potencial original de la variedad.



Figura 12.1. Raíz tuberosa de boniato utilizado como unidad de regeneración.

A continuación, presentamos cuatro métodos para regenerar y multiplicar material de plantación de calidad, ordenados de menor a mayor complejidad técnica.

MÉTODO 1. REGENERACIÓN EN CAMPO CON RAÍCES TUBEROSAS

Este es el método base, desarrollado y validado por el INIVIT, accesible para cualquier productor. La ventaja decisiva de este método es que permite al productor partir de sus propias raíces tuberosas y, mediante selección rigurosa y manejo específico, generar una nueva generación de plantas con un reseteo parcial de su calidad.

Pasos clave

1. Selección de las raíces tuberosas semilla

Origen: Seleccionar exclusivamente de los campos de mayor rendimiento y sanidad aparente de la finca.

Peso Óptimo: Usar raíces de 70-100 gramos. Estas producen un promedio de 15 tallos por planta a los 60-70 días después de la plantación (ddp) y una calidad de guía (grosor del tallo de 10 mm) estadísticamente igual a la de raíces de más de 500 g.

Características: Raíces típicas de la variedad, libres de daños mecánicos, síntomas de enfermedad o ataque de tetuán.

2. Establecimiento del banco de semilla

Plantación: Plantar las raíces enteras sobre el cantero, cubiertas con 3-5 cm de tierra suelta. Distancia: 30 cm entre plantas y 90 cm entre surcos.

Manejo: Riego oportuno, fertilización balanceada y control estricto de malezas y plagas. El objetivo es maximizar la producción de guías de alta calidad.



Figura 12.2. Establecimiento del banco de semilla de boniato a partir de raíces tuberosas. Plantación de raíces tuberosas (70-100 g) en cantero a 30 cm entre plantas.



Figura 12.3. Brotación de una raíz tuberosa a los 10 ddp, mostrando múltiples guías emergiendo.

3. Época de corte y multiplicación

Primer corte (óptimo). Realizarlo entre los 60-100 ddp. Los bancos de semilla producen un promedio de 15 esquejes por planta (rango de 12-18). Cortar únicamente puntas y pre-puntas de 25-30 cm de longitud (5-7 nudos).



Figura 12.4. Etapas de la producción de semilla en banco de regeneración. A: Banco de semilla a los 35 días después de la plantación, mostrando el desarrollo inicial de los brotes; B: Banco de semilla a los 60 días, listo para el primer corte; C: Mazo de esquejes cortados uniformemente (solo puntas) de 30 cm de longitud; D: Mazo de 100 esquejes amarrado y una productora trasladándolo al campo para la plantación.

Segundo corte. Posible entre 50-60 días después del primero, aprovechando el rebrote. Aplicar riego ligero y fertilización nitrogenada post-corte.



Figura 12.5. A y B: Banco de semilla a los 10 días después del primer corte, con rebrote de yemas axilares por eliminación de dominancia apical; C: Banco de semilla a los 50 días después del primer corte (110 ddp), con las plantas completamente rebrotadas y listas para un segundo corte de semilla.

4. Rentabilidad y escalabilidad del sistema

Un quintal (100 lb \approx 45.4 kg) de raíces tuberosas de 70-100 g contiene entre 500 y 600 boniatos (promedio 85 g/unidad). Con una producción promedio de 12 esquejes por planta en el primer corte, se obtienen entre 6,000 y 7,200 esquejes por quintal.

Con una densidad de plantación de 30 cm entre plantas y 90 cm entre surcos (0.27 m² por planta), se requieren aproximadamente 37,000 esquejes para sembrar una hectárea. Por lo tanto, se necesitan entre 5-6 quintales de raíces tuberosas para producir los esquejes suficientes y establecer una hectárea de boniato en un solo corte.

MÉTODO 2. TECNOLOGÍA CHINA O DE ALTA DENSIDAD EN ESPACIO REDUCIDO

Esta técnica, empleada en países de clima templado como China y adaptada en Cuba, permite producir una gran cantidad de plántulas (esquejes jóvenes) en espacios pequeños, partiendo también de raíces tuberosas. Es ideal para productores que disponen de áreas limitadas para semillero o que desean acelerar el proceso de multiplicación.

En regiones con inviernos fríos (China, Japón), no es posible mantener plantas de boniato en el campo todo el año. Por ello, almacenan las raíces tuberosas durante el invierno y las siembran en cámaras de CRAS o canteros protegidos cuando las temperaturas superan los 15°C (empezando en el mes de marzo). En Cuba, aunque no tenemos ese problema de heladas, esta técnica resulta valiosísima para producir semilla de alta calidad en poco espacio y con alta eficiencia.

Procedimiento

1. Se utilizan raíces tuberosas sanas, enteras (sin picar), con un peso entre 80-120 gramos.
2. Se construyen canteros de 1.0-1.20 m de ancho (el largo depende del área disponible).
3. Las raíces tuberosas se colocan acostadas, a razón de 15-20 kg por metro cuadrado. Se tapan con una capa de sustrato de 3-5 cm. El sustrato debe ser una mezcla de tierra y materia orgánica en proporción 1:1.
4. Los esquejes se cortan individualmente con tijera o cuchilla afilada cuando alcanzan unos 30 cm de longitud y tienen de 6-8 hojas desarrolladas. Es importante no cortar a ras del suelo, debe dejarse al menos un nudo por encima de la superficie, pues de ahí brotará el nuevo tallo. Si se corta al ras, ese nudo se pierde y la planta madre no rebrota.
5. De un mismo banco se pueden realizar varios cortes sucesivos. Los primeros cortes provienen de los brotes de las raíces; los siguientes, de las yemas de las bases de los tallos que quedaron de cortes anteriores.





Figura 12.6. Etapas del proceso de producción intensiva de esquejes mediante la tecnología de alta densidad en espacio reducido. A: Raíces tuberosas sanas (80-120 g) colocadas en el cantero, aún sin cubrir con sustrato; B: Brotes emergiendo a los 15 ddp; C: Brotes a los 30 ddp, con aproximadamente 30 cm de longitud y 6-8 hojas desarrolladas, listos para el primer corte; D: Primer corte realizado; se aprecian manojos de 100 esquejes listos para su traslado al campo; E: Detalle del corte correcto: se deja al menos un nudo por encima del suelo (flechas) para garantizar el rebrote; nótese que no se corta a ras del suelo.

Dinámica de producción de esquejes

Los primeros brotes están listos para corte a los 22 días después de la plantación, cuando los plantines alcanzan 25-30 cm de longitud y presentan de 6 a 8 hojas desarrolladas. Los cortes sucesivos se realizan cada 7-10 días, dejando aproximadamente 3 cm de tallo por encima del suelo para permitir el rebrote.

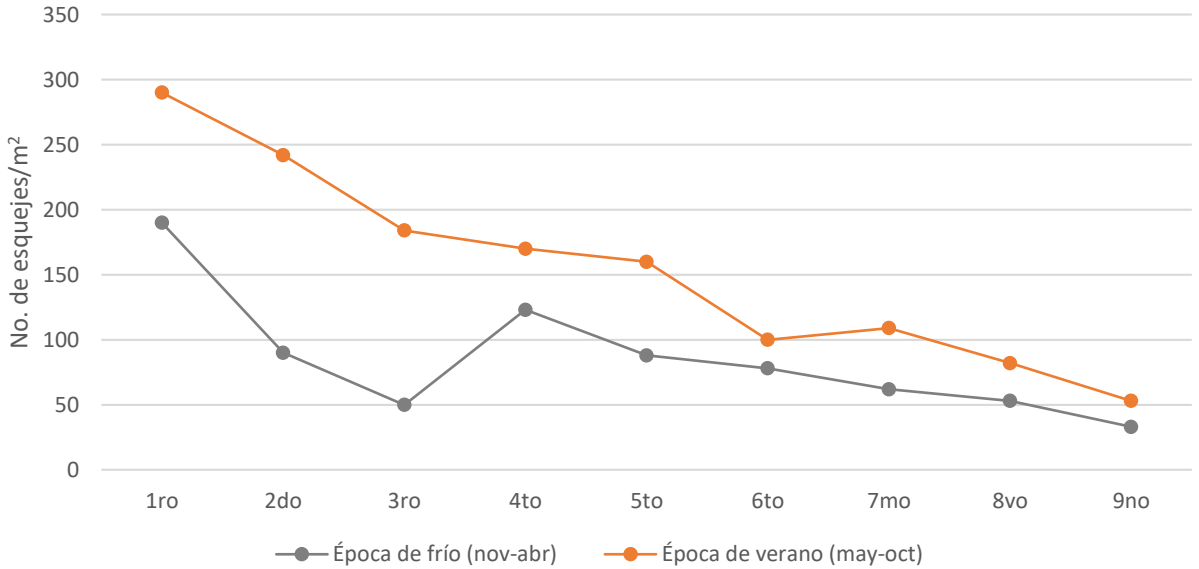


Figura 12.7. Dinámica de producción de esquejes durante 9 cortes sucesivos. A: Época de frío: 764 esquejes/m² en 93 días; B: Época de verano: 1390 esquejes/m² en 90 días. La producción en primavera supera en 82% a la de frío debido a temperaturas más favorables.



Fraccionamiento de raíces

Una innovación adicional, validada en estudios del INIVIT, consiste en el fraccionamiento de raíces tuberosas para aumentar la eficiencia de multiplicación. **Esta técnica parte de la hipótesis de que los virus se translocan más lentamente en las raíces y tienden a acumularse en la región apical, dejando las secciones basales con menor carga viral.**

Los resultados del fraccionamiento mostraron que la sección apical (T3) y la sección basal (T5) son las más productivas, con 930 y 855 esquejes respectivamente, seguidas por raíces enteras de calibre pequeño (T2) con 861 esquejes. Las raíces de gran calibre (T1) solo alcanzaron 811 esquejes, **mientras que la sección central (T4) fue muy inferior (227 esquejes), quedando descartada.**

Los picos de producción se alcanzaron entre los 41 y 50 días, destacando la sección apical con 221 esquejes a los 50 ddp. La sección central, además de baja producción, mostró retraso en la brotación sin esquejes en el primer corte.

No se justifica usar raíces grandes, su producción es menor y la dominancia apical inhibe las yemas basales. En cambio, corona y basal son excelentes. La ventaja adicional es sanitaria, **los virus se translocan preferentemente a la región apical, por lo que usar la sección basal permite obtener material con menor carga viral.** El fraccionamiento iguala o supera la productividad del método tradicional, optimizando el material y reduciendo riesgos.

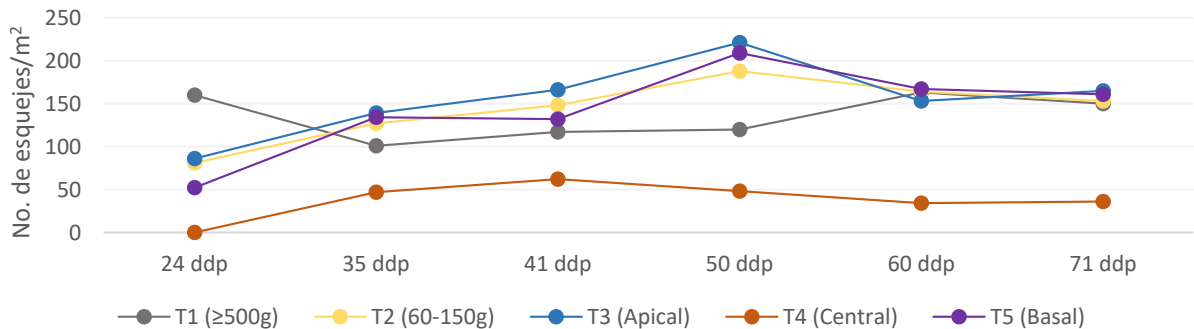


Figura 12.8. Producción total de esquejes por tratamiento de fraccionamiento a los 71 días después de la plantación.

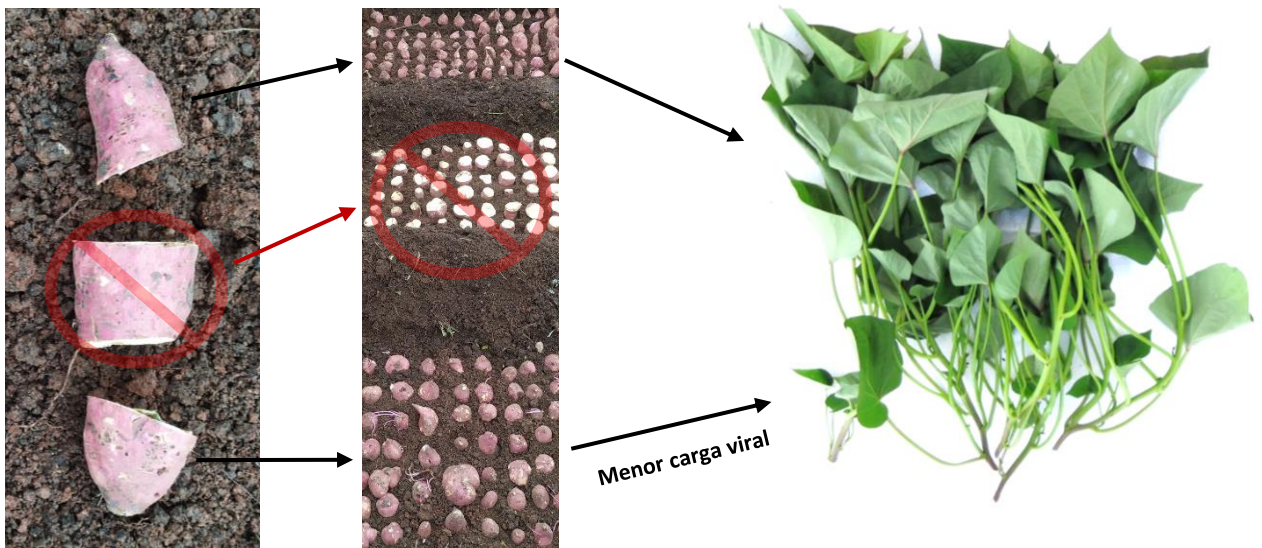


Figura 12.9. Fraccionamiento de raíces tuberosas de boniato para la producción de semilla. La raíz se divide en tres secciones: apical, central y basal. Los estudios del INIVIT demuestran que las secciones apical y basal son las más productivas para la emisión de brotes, mientras que la sección central muestra muy baja brotación y no se recomienda para propagación.

MÉTODO 3. PROPAGACIÓN ACELERADA CON ESQUEJES EN SEMILLERO DE ALTA DENSIDAD

Este método parte de los brotes apicales obtenidos en los métodos anteriores (ya sea del banco de campo o de la tecnología china) y busca multiplicar exponencialmente el material de siembra en un espacio mínimo, utilizando esquejes de puntas y sembrándolos a muy alta densidad.

Procedimiento

1. Obtención de esquejes iniciales y preparación de mazos

Se cortan puntas de los brotes obtenidos de las raíces tuberosas plantadas en los bancos de regeneración (Método 1 o 2). Los esquejes deben tener una longitud de 15-20 cm, con 3-4 nudos bien desarrollados.

Un detalle crucial en esta etapa es la organización de los mazos. Antes de atar los esquejes en manojos, deben orientarse todos en el mismo sentido, de forma que todos los ápices (puntas) queden alineados en un extremo y las bases en el opuesto. Una vez amarrado el manajo, se realiza un corte limpio con machete en el extremo donde quedaron alineadas todas las puntas. Este corte, conocido como **decapitado de mazos**, tiene un efecto fisiológico fundamental. Al eliminar el ápice de cada esqueje, se rompe la dominancia apical y se estimula la activación de varias yemas axilares a lo largo del tallo. Como resultado, cada esqueje producirá múltiples brotes en lugar de uno solo, incrementando significativamente la eficiencia del semillero.

2. Preparación del semillero de alta densidad

Se prepara un cantero de un metro de ancho (el largo dependerá del área disponible y la cantidad de semilla requerida). El sustrato debe ser suelto, fértil y bien drenado, idealmente una mezcla de tierra y materia orgánica en proporción 2:1.

La densidad de plantación es de 10 cm x 10 cm entre plantas, lo que equivale a 100 esquejes por metro cuadrado. Esta alta densidad obliga a las plantas a crecer verticalmente, maximizando el uso del espacio y facilitando las labores de corte.

3. Plantación

Los esquejes se plantan en posición vertical, asegurando que al menos un nudo quede enterrado (preferiblemente dos). El sustrato debe presionarse ligeramente alrededor del esqueje para eliminar bolsas de aire y garantizar un buen contacto con la humedad.

4. Corte y multiplicación

A los 20-25 días después de la plantación, las plantas han desarrollado guías suficientes para un primer corte. En este momento, se obtiene una cantidad de esquejes al menos igual a la sembrada inicialmente, y frecuentemente 1.5 veces superior, gracias a la activación de múltiples yemas en cada planta.

Para este primer corte, se cosechan las puntas de las guías, pero ahora con una longitud de 25-30 cm, ya que estos esquejes estarán destinados directamente a la plantación en campo comercial. El proceso puede repetirse en ciclos sucesivos, multiplicando exponencialmente el material disponible.





Figura 12.10. Etapas del método de propagación acelerada. A: Mazos de esquejes organizados con todas las puntas en el mismo sentido, listos para el decapitado que estimulará la brotación múltiple; B: Plantación de esquejes a densidad 10x10 cm en canteros preparados; C: Vista general de los canteros de 1 metro de ancho con la plantación establecida; D: Esquejes desarrollados a los 20 ddp, listos para realizar el primer corte y llevar el material de plantación a condiciones de campo; E: Especialistas evaluando la calidad fitosanitaria y fisiológica de los esquejes en el semillero.



MÉTODO 4: REJUVENECIMIENTO POR BIOTECNOLOGÍA

Los métodos anteriores (regeneración por raíces tuberosas, tecnología china, propagación acelerada) son poderosos y accesibles, pero tienen un límite: no eliminan por completo los virus sistémicos que se acumulan en los tejidos vegetativos. La única forma de resetear completamente el estado sanitario de un cultivar es mediante el cultivo de meristemos *in vitro*, una tecnología que extrae la parte más joven y sana de la planta (el meristemo apical) y la regenera en condiciones estériles, obteniendo un individuo genéticamente idéntico al original, pero libre de patógenos.

Este método es la fuente de material original o básico que alimenta a todos los demás sistemas de multiplicación. No está al alcance de cualquier productor, pero es la base sobre la cual se construyen los bancos de semilla de máxima calidad.

Fundamentos científicos

Los meristemos foliares son el tejido de crecimiento activo ubicado en la punta y axilas de cada tallo. Sus células se dividen constantemente y, por razones fisiológicas aún no del todo esclarecidas, los virus sistémicos no logran colonizarlas eficientemente. Se cree que la alta tasa de división celular supera la capacidad de replicación viral, y que las conexiones vasculares inmaduras impiden la entrada de partículas virales. Por eso, un meristemo de 0.3-0.5 mm puede estar libre de virus incluso cuando la planta madre está infectada. Nuestros estudios han demostrado que el cultivo de meristemos puede eliminar el 100% de los virus en variedades como 'INIVIT BS-16' e 'INIVIT B-23'.

Las cinco fases del proceso *in vitro*

FASE 0: SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL MATERIAL DE PARTIDA

Todo comienza en el campo. Se seleccionan raíces tuberosas de plantas con buen estado fitosanitario y las características fenotípicas deseadas del cultivar. Se lavan con agua corriente y se colocan en frascos con agua, sumergidos aproximadamente 1/3 de su volumen, en condiciones de invernadero. A los 15-25 días, los brotes alcanzan 10-20 cm de longitud, listos para la toma de explantes.



Figura 12.11. Fase 0. Selección y brotación de las raíces tuberosas. A: Raíces tuberosas seleccionadas en campo y colocadas en frascos con agua en invernadero; B: Brotes emitidos a los 25 días, listos para la extracción de meristemos.

FASE 1: ESTABLECIMIENTO *IN VITRO*

Es la fase más delicada. Los brotes se cortan, se les eliminan las hojas y se desinfectan con hipoclorito de sodio al 2.5% durante 10 minutos. Bajo una cabina de flujo laminar, con la ayuda de un estéreo microscopio, se extraen los meristemas (0.1-0.5 mm de diámetro) y se colocan en un medio de cultivo con sales MS, vitaminas, sacarosa, y reguladores de crecimiento como 6-BAP (3.0 mg/L) para inducir la brotación.

Los explantes se incuban a $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ con 16 horas de luz ($42\text{-}48\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). Aproximadamente a los 20-30 días, los meristemas que sobreviven y brotan están listos para la siguiente fase.

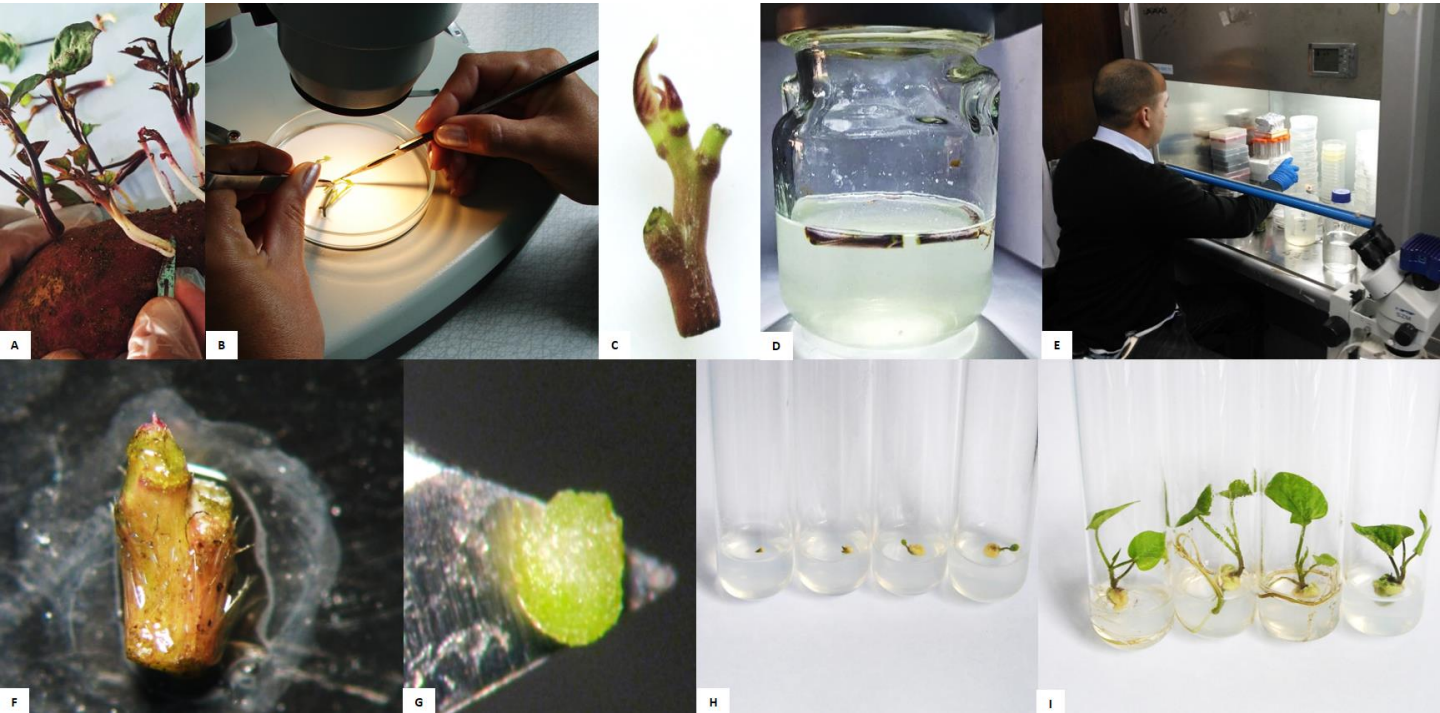


Figura 12.12. Fase 1. Establecimiento *in vitro*. A: Selección de brotes directos del boniato brotado en invernadero; B: Eliminación de hojas y fraccionamiento de los brotes en secciones nodales; C: Sección del ápice terminal sin hojas, lista para desinfección; D: Ápices y secciones nodales en solución de hipoclorito de sodio para desinfección; E: Proceso de extracción de meristemas en cabina de flujo laminar bajo estéreo microscopio; F: Secciones ya desinfectadas, listas para la extracción del meristemo; G: Meristemo extraído, visible en la punta del bisturí; H: Meristemas colocados en medio de cultivo; I: Meristemas en el mismo medio de cultivo después del tiempo requerido, con brotes desarrollados y listos para la siguiente fase.

Figura 12.13. Fase 1. Incubación y desarrollo de meristemas. A: Cámara de crecimiento con control de temperatura e iluminación artificial, donde los meristemas se desarrollan en condiciones controladas; B: Incubador de cultivos *in vitro*, donde se mantienen los frascos durante el período de desarrollo hasta la formación de brotes listos para la siguiente fase.



FASE 2: MULTIPLICACIÓN *IN VITRO*

Una vez establecidas las plantas *in vitro* libres de virus, se multiplican para obtener la cantidad necesaria de material para la aclimatización y posterior establecimiento en campo.

Método convencional (medio semisólido)

La multiplicación se realiza mediante cultivo de segmentos nodales (secciones de tallo con 1-2 yemas) en medio semisólido. El medio de multiplicación está compuesto por las sales y vitaminas de MS, suplementado con sacarosa (30 g/L), mioinositol (100 mg/L) y tiamina (2 mg/L). Se utiliza gelrite (2 g/L) como agente solidificante y el pH se ajusta a 5.7. En esta fase se prescinde de los reguladores de crecimiento (BAP y ANA) para evitar la formación de callos y promover el crecimiento ordenado de brotes.

Los subcultivos se realizan cada 30-35 días. En cada ciclo, una planta puede generar de 5-10 nuevos brotes, dependiendo del genotipo y las condiciones de cultivo. Este método es fiable, accesible y ha sido ampliamente validado en el INIVIT para la producción de semilla básica.



Figura 12.14. Fase 2. Multiplicación *in vitro* en medio semisólido. A: Seccionamiento de las plántulas en segmentos nodales para la multiplicación; B: Segmentos nodales individuales listos para el cultivo; C: Colocación de los segmentos nodales en el medio de cultivo; D: Plantas multiplicadas listas para enraizamiento a los 35 días.



Figura 12.15. Multiplicación *in vitro* a escala comercial en medio semisólido. Vista general de la sala de crecimiento con estantes que albergan cientos de frascos de cultivo, cada uno conteniendo secciones nodales en desarrollo.

Método avanzado. Sistema de Inmersión Temporal (SIT) (opcional)

Para acelerar el proceso de multiplicación, se puede utilizar el Sistema de Inmersión Temporal (SIT), una tecnología de vanguardia que sumerge los explantes en medio líquido de forma cíclica (2 minutos cada 6 horas), mejorando la aireación y el contacto con nutrientes, lo que multiplica la eficiencia.

En el SIT, con 25 explantes iniciales en un botellón de 4000 ml, se pueden obtener 380 yemas en 18 días, suficientes para producir 120 plantas listas para aclimatización. Este sistema puede reducir los ciclos de multiplicación en 1.5-2.5 veces en comparación con medios semisólidos.



Figura 12.16. Fase 2. Multiplicación *in vitro* en Sistema de Inmersión Temporal (SIT). A: Temporizador programable que controla la frecuencia y duración de las inmersiones; B y C: Frascos con filtros hidrófobos que permiten el intercambio gaseoso sin riesgo de contaminación, con plantas en desarrollo en su interior; D: Plantas multiplicadas en SIT listas para enraizamiento, mostrando el alto coeficiente de multiplicación alcanzado.

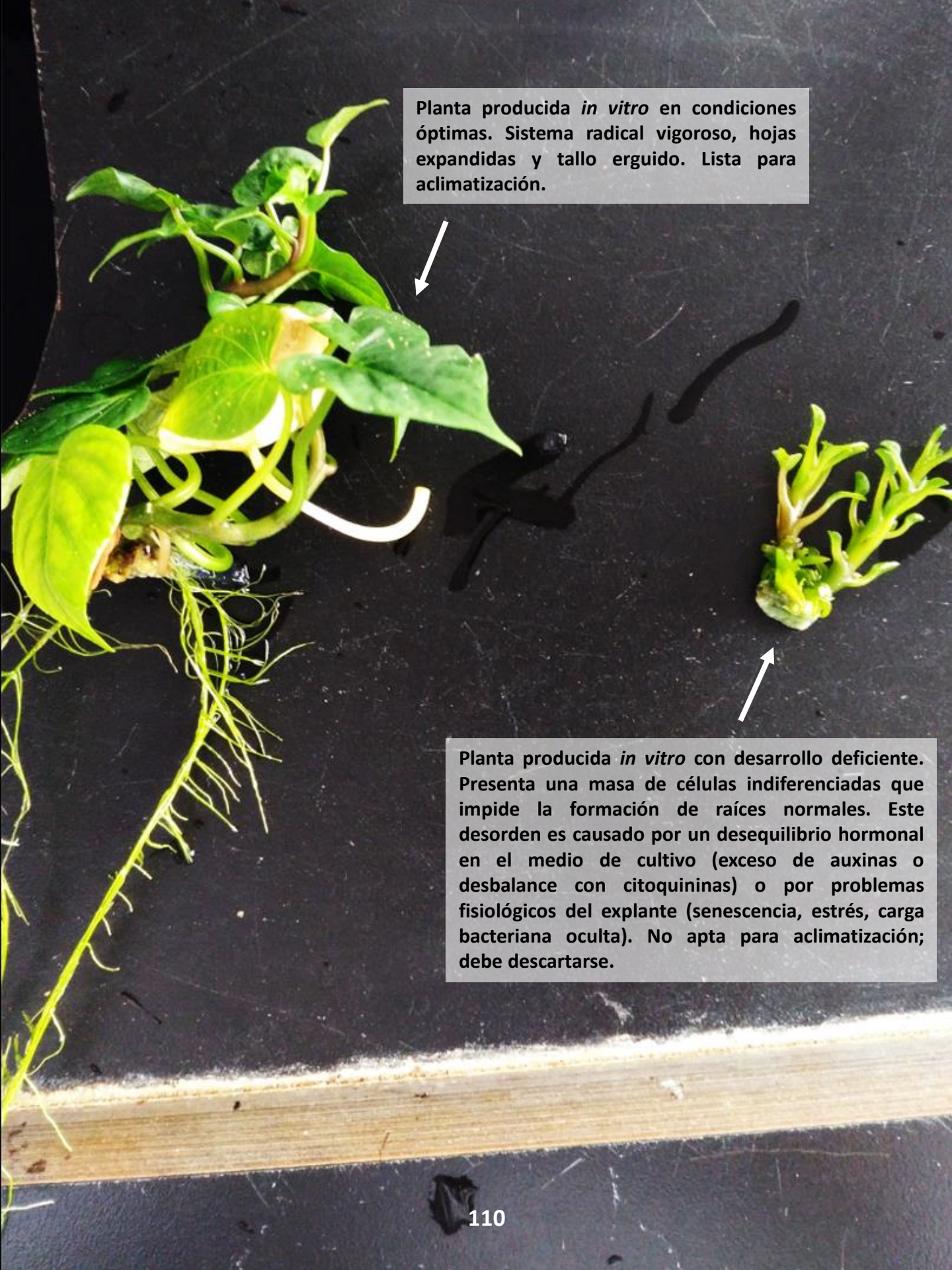
FASE 3: ENRAIZAMIENTO *IN VITRO*

Las plantas individuales de aproximadamente 2 cm de altura se transfieren a un medio de enraizamiento, que es idéntico al de multiplicación (sales MS, sacarosa 30 g/L, mioinositol, tiamina, gelrite, pH 5.7), pero sin reguladores de crecimiento. El objetivo es inducir la formación de raíces adventicias en condiciones estériles, permitiendo que la planta desarrolle su sistema radical de forma natural.

A los 35 días, las plantas han desarrollado un sistema radical suficiente y están listas para ser transferidas a la fase de aclimatación.



Figura 12.17. Fase 3. Enraizamiento *in vitro*. A: Plantas en fase de multiplicación con tamaño óptimo (2-3 cm de altura, hojas bien definidas), listas para ser transferidas al medio de enraizamiento; B: Plantas enraizadas en frascos de cultivo, mostrando desarrollo radical vigoroso; C: Sala de crecimiento a escala comercial con frascos de vidrio conteniendo plantas enraizadas listas para la siguiente fase; D: Detalle de plantas enraizadas listas para aclimatación.



Planta producida *in vitro* en condiciones óptimas. Sistema radical vigoroso, hojas expandidas y tallo erguido. Lista para aclimatización.

Planta producida *in vitro* con desarrollo deficiente. Presenta una masa de células indiferenciadas que impide la formación de raíces normales. Este desorden es causado por un desequilibrio hormonal en el medio de cultivo (exceso de auxinas o desbalance con citoquininas) o por problemas fisiológicos del explante (senescencia, estrés, carga bacteriana oculta). No apta para aclimatización; debe descartarse.

FASE 4: ACLIMATIZACIÓN (ENDURECIMIENTO)

Las plantas *in vitro* están adaptadas a un ambiente de alta humedad (100%) y baja luz, con una nutrición heterótrofa que depende de los azúcares del medio de cultivo. Al sacarlas del frasco, enfrentan un *shock* de transición que puede matarlas si no se maneja con cuidado. La fase de aclimatización es crítica para lograr plantas vigorosas y es la transición entre el laboratorio y el campo.

Antes del trasplante, las plantas se extraen cuidadosamente de los frascos o bolsas de cultivo y se lavan con agua corriente para eliminar los restos de *gelrite* (agar solidificado) que quedan adheridos a las raíces. Este paso es esencial para evitar la proliferación de hongos en el sustrato.

Posteriormente, se trasplantan a bandejas o contenedores con el sustrato adecuado. Durante los primeros días, se mantienen en condiciones de alta humedad (cámaras de aclimatización con nylon o plástico transparente) para evitar la deshidratación.

Procedimiento óptimo según estudios del INIVIT:

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|---|
| Sustrato | Compost + zeolita (3:1) o cachaza descompuesta (70%) + capa vegetal (30%) |
| Contenedor | Bandejas de polietileno (100 cc, 50 orificios) |
| Humedad relativa inicial | >90% |
| Temperatura | 25±2°C |
| Iluminación | 0-15 días: 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$; 15-30 días: 325; 30-45 días: 443 |

Con esta combinación, se logra una **supervivencia superior al 98%** y un excelente desarrollo de las plantas. El uso de hongos micorrízicos durante la aclimatización puede acelerar el proceso y reducir el período de adaptación en 15-20 días.

Resultados con la aplicación de Fitomas-E® (bioestimulante):

| Parámetro | Valor alcanzado |
|---------------------|--------------------|
| Supervivencia | >98% |
| Longitud de la guía | 55.9 cm |
| Número de hojas | 13.6 |
| Área foliar | 47.2 cm^2 |
| Grosor del tallo | 3.1 mm |



Figura 12.18. Fase 4. Aclimatización. Plantas *in vitro* trasplantadas a bandejas con sustrato y cubiertas con nylon para mantener alta humedad durante los primeros días de adaptación.

FASE 4: ACLIMATIZACIÓN MULTIPLICACIÓN ACELERADA A PARTIR DE MICROESQUEJES

Una vez aclimatizadas, las plantas pueden multiplicarse rápidamente. A los 21 días de aclimatización, se cortan pequeños esquejes de dos nudos con hojas completas. Los resultados son excelentes:

Supervivencia: 100% en esquejes de dos nudos con hojas

Tiempo de enraizamiento: 15 días

Altura alcanzada: 11-15 cm en tres semanas

Factor de multiplicación: 1:5 (de cada planta madre se obtienen de 3 a 6 microesquejes)

Los microesquejes de dos nudos con hojas completas son los que mejor resultado dan. Una vez enraizados, estas plantas pueden trasplantarse directamente a casas de cultivo o al campo, donde se desarrollan hasta alcanzar el tamaño adecuado para producir esquejes de alta calidad fitosanitaria. De esta forma, se acelera la multiplicación del material saneado y se obtiene semilla básica en menor tiempo.



Figura 12.19. Proceso de multiplicación acelerada mediante microesquejes. A: Microesquejes de dos nudos recién cortados de plantas aclimatizadas; B: Microesquejes plantados en bandejas con sustrato; C: Microesquejes a los 15 días, con desarrollo radical y foliar. D: Plantas ya establecidas en casa de cultivo, listas para producir esquejes comerciales de alta calidad.

LA SEMILLA MEJORADA VS. LA REALIDAD ACTUAL

Los datos presentados a lo largo de esta ley demuestran de manera incontrovertible que la calidad del material de partida determina el techo productivo del cultivo. No hay práctica agronómica (fertilización, riego, control de plagas) que pueda compensar una semilla degenerada.

La semilla degenerada (10 o más generaciones de multiplicación vegetativa sin control) representa el punto más bajo de la curva productiva. Tras años de cortar y resemar el mismo material sin renovación, el rendimiento apenas alcanza las 21.4 toneladas por hectárea. Es una pérdida de más del 50% del potencial original de la variedad. Lamentablemente, esta es la realidad de una gran parte de la producción campesina.

La semilla regenerada por raíz tuberosa (Método 1) demuestra que no se necesita tecnología de punta para recuperar gran parte de ese potencial perdido. Con una práctica tan simple como seleccionar raíces de 70-100 gramos de los mejores campos y usarlas para reiniciar el ciclo, el rendimiento se eleva a 36.6 t/ha. Se recuperan 15 de las 24 toneladas perdidas, un salto del 71% que se logra únicamente con selección consciente y manejo adecuado.

La semilla de origen biotecnológico (Método 4) representa el estado del arte. Las plantas obtenidas por cultivo de meristemos están libres de los virus más comunes y muestran un vigor excepcional. En los estudios del INIVIT, alcanzó 45.4 t/ha, superando significativamente a la semilla degenerada (21.4 t/ha) con un incremento del 112%, y a la semilla regenerada por raíz tuberosa (36.6 t/ha) con un incremento del 24%. Estos resultados confirman que el material libre de virus puede acercarse al potencial genético original de la variedad.

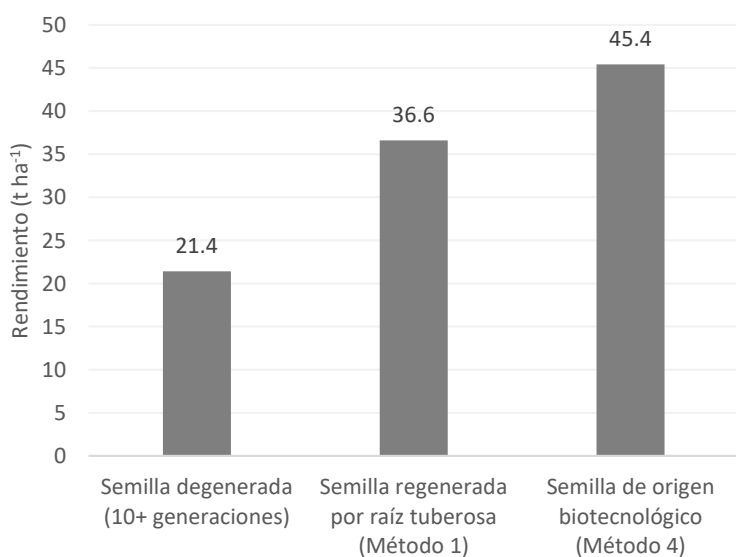


Figura 12.20. Comparación del rendimiento según el origen de la semilla.



LA ESTRATEGIA DE REFRESCAMIENTO

La evidencia científica sobre degeneración viral en campo y nuestros propios datos de la Ley 11 (caída del rendimiento a partir de la 5ª generación) permiten establecer una recomendación práctica de manejo:

1. El material de origen biotecnológico debe utilizarse para establecer bancos de semilla básica, los cuales alimentarán los sistemas de multiplicación (Métodos 1, 2 y 3).
2. Se recomienda refrescar la semilla base con nuevo material biotecnológico cada 2 años, o lo que es equivalente, cada 4 generaciones de multiplicación vegetativa en campo.
3. Esta frecuencia asegura que nunca se supere el umbral de degeneración acelerada (5ª generación), manteniendo el rendimiento consistentemente por encima de las 40 t/ha.

La elección del método

La tecnología de producción de semilla agámica no es solo una alternativa; es, en el contexto cubano actual, una práctica de supervivencia y racionalidad productiva. Constituye la Ley Fundamental del sistema, sin material de siembra de calidad mínima, ninguna otra práctica agronómica tendrá efecto pleno.

La elección del método dependerá de los recursos y necesidades de cada cual:

| Método | Accesibilidad | Ideal para... |
|---------------------------------|-----------------------------|---|
| Método 1: Raíz tuberosa | Alta (cualquier productor) | Recuperar vigor sin tecnología compleja |
| Método 2: Tecnología china | Media | Producción intensiva en espacio reducido |
| Método 3: Propagación acelerada | Alta | Multiplicar rápidamente material valioso |
| Método 4: Biotecnología | Baja (requiere laboratorio) | Obtener material original de máxima calidad |

El productor que implementa estos sistemas está invirtiendo en el activo más valioso de su finca: la calidad genética y fisiológica de su propia semilla. Es el primer e indispensable paso para escalar hacia los altos rendimientos, sentando las bases para que luego las demás leyes (nutrición, riego, manejo integrado) puedan expresar todo su potencial.

Renovar la semilla es renovar la esperanza de la cosecha. Y en el boniato, la semilla barata, la que nunca se renueva, termina siendo la más cara de todas.





LEY 13

DEL ESPACIO VITAL



Más plantas no es igual a más cosecha, el rendimiento total es la suma de lo que cada individuo puede expresar, no del número de individuos que se amontonan.

INTRODUCCIÓN

En la búsqueda del rendimiento máximo, existe una tentación poderosa: sembrar más plantas por hectárea para cosechar más producto. Parece lógico, a más plantas, más raíces. Sin embargo, en el boniato, esta lógica aparentemente irrefutable choca contra un muro fisiológico infranqueable. La Ley del Espacio Vital establece que el rendimiento final no es una simple suma aritmética del número de plantas, sino el resultado de un equilibrio dinámico y crítico entre la población y el espacio que cada individuo necesita para expresar su potencial genético completo. Ignorar esta ley conduce a una competencia feroz que estrangula, literalmente, la tuberización.

En la práctica cubana, existe la costumbre de aumentar la densidad de plantación con la esperanza de obtener mayores rendimientos. Se argumenta que más bejucos por metro lineal significan más plantas y, por tanto, más producción. Nuestros estudios, realizados durante más de dos décadas, demuestran que esta creencia es errónea y contraproducente.



Figura 13.1. Contraste visual entre tres densidades de plantación de boniato. A: Alta densidad: 0.9×0.10 m (111,111 plantas/ha); B: Densidad intermedia: 0.9×0.15 m (74,000 plantas/ha); C: Densidad óptima: 0.9×0.30 m (37,037 plantas/ha), espacio vital suficiente para que cada planta exprese su máximo potencial productivo.

Cuando entregamos a cada planta el espacio que necesita (37,037 plantas por hectárea, equivalente a 0.27 m² por individuo) el cultivo responde con todo su potencial. En estas condiciones, cada planta desarrolla un sistema radical extenso que explora el suelo en busca de agua y nutrientes sin restricciones. Expresa su potencial genético produciendo de 2 a 3 raíces tuberosas por planta, con pesos individuales que superan los 480 gramos. La competencia existe, pero es la justa, las vecinas se estimulan sin llegarse a estresar.

Pero cuando cedemos a la tentación de sembrar más denso, los números cambian drásticamente. Al aumentar la densidad a 111,111 plantas por hectárea, el espacio vital se reduce a apenas 0.09 m² por planta, una disminución del 67%. En este hacinamiento, el sistema radical se vuelve superficial y restringido, incapaz de explorar el volumen de suelo necesario. El número de raíces por planta cae de 2.4 a 1.3, y el peso individual de las raíces se desploma de 484 gramos a solo 320 gramos. El resultado final es una pérdida de casi 10 toneladas por hectárea respecto a la densidad óptima.

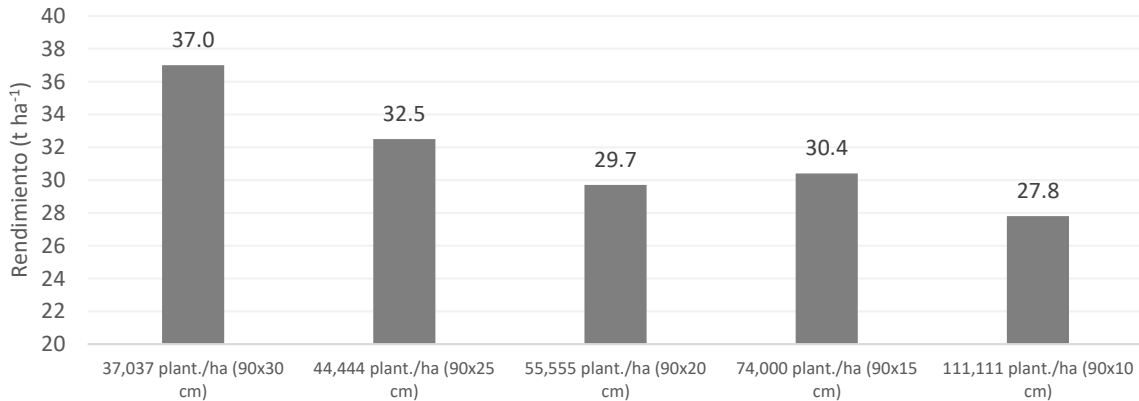


Figura 13.2. Rendimiento de boniato en función de la densidad de plantación.

Los números son claros y no admiten discusión. Perder casi 10 toneladas por hectárea es el precio de ignorar la Ley del Espacio Vital. Esas 10 toneladas no se pierden por mal clima, por falta de fertilizante o por plagas; se pierden exclusivamente por una decisión de manejo, sembrar demasiado junto.



Figura 13.3. Contraste visual de la producción entre dos densidades de plantación de boniato. A: Densidad óptima (0.30 x 0.90 m); B: Densidad ultra-alta (0.10 x 0.90 m).

LA RAZÓN FISIOLÓGICA EL "AHOGO" QUE ESTRANGULA LA TUBERIZACIÓN

Cuando ignoramos el espacio vital y sembramos demasiado denso, desencadenamos un proceso de estrés múltiple que afecta a la planta en tres frentes simultáneos. No es un solo problema, es una cascada de limitaciones que terminan por ahogar el potencial productivo.

1. Competencia por la luz. El colapso de la fábrica fotosintética

A densidades extremas, el follaje cierra rápidamente formando una espesa capa superior que captura casi toda la luz disponible. Las hojas que quedan por debajo (las de la parte media e inferior de las plantas) operan en penumbra, por debajo del punto de compensación lumínica. Esto significa que la respiración consume más energía de la que la fotosíntesis puede producir. **Estas hojas dejan de ser fábricas de azúcares y se convierten en parásitas metabólicas**, drenan energía en lugar de aportarla. El dosel, visto desde arriba, parece exuberante y vigoroso, pero la realidad es que la fotosíntesis neta por planta se ha reducido drásticamente. Hay mucho follaje, pero poca producción real de fotoasimilados que puedan enviarse a las raíces.

2. Competencia por el espacio radical

Bajo tierra, la batalla es igual de feroz. Al reducirse el espacio vital, las raíces de plantas vecinas se entremezclan y compiten desesperadamente por cada recurso disponible: agua, nitrógeno, fósforo y, críticamente, potasio. El potasio es el activador maestro de las enzimas que gobiernan la tuberización y el llenado de almidón (Sacarosa Sintasa, AGPasa). Cuando escasea, la señal bioquímica para engrosar las raíces simplemente no se activa. El resultado es un sistema radical extenso pero superficial, compuesto por raíces delgadas y fibrosas que exploran frenéticamente un suelo ya agotado por las vecinas. Es una guerra donde todos pierden.

3. Alteración del microclima. La puerta abierta a las enfermedades

Un follaje excesivamente denso atrapa la humedad y bloquea la ventilación en la base de las plantas. Se crea un microclima oscuro, húmedo y sin circulación de aire, el ambiente ideal para la proliferación de hongos patógenos que causan enfermedades foliares y podredumbres de tallo. Además, las plantas estresadas son más vulnerables al ataque de plagas como el tetuán (*Cylas formicarius*). La energía que debería destinarse a la tuberización se desvía hacia mecanismos de defensa y reparación de tejidos, agravando aún más la caída del rendimiento.

LA CONEXIÓN CON LA LEY 3. EL CAMINO BIFURCADO

Una densidad excesiva no solo compite por recursos; activa directamente el programa genético del vicio. El estrés por luz (sombreamiento) y la competencia radical son interpretados por la planta como señales ambientales adversas. En respuesta, prioriza la supervivencia sobre la producción. Al sentir la proximidad de otras plantas, redirige sus recursos hacia el alargamiento de tallos y guías, impulsada por giberelinas. Es un intento desesperado por escapar de la sombra y alcanzar nueva luz. Es el mismo mecanismo hormonal que conocemos como vicio, pero aquí inducido por el hacinamiento, no por el calor nocturno.

Bajo estrés intenso, las raíces incipientes son las primeras en sacrificarse. Los carbohidratos limitados se destinan a mantener la biomasa aérea (lo único que puede generar más energía), abortando el desarrollo de las raíces tuberosas. La planta fuerza el camino del vicio no por una decisión errada, sino por necesidad de sobrevivir al hacinamiento.

La Ley del Espacio Vital enseña que el alto rendimiento en boniato no se conquista abarrotando el campo, sino diseñándolo con inteligencia espacial. Prioriza la calidad fisiológica de cada planta sobre la cantidad bruta de individuos. **El productor sabio no se pregunta ¿cuántas plantas más puedo plantar en esta hectárea?, sino ¿cuánto espacio necesita cada una de mis plantas para darme sus mejores raíces?**

LEY 14

DE LA SEMILLA VIVA



Un esqueje no es un palito para clavar; es un ser vivo que respira, transpira y lucha por sobrevivir desde el momento del corte.

INTRODUCCIÓN

Entre el corte del esqueje y su entierro en el suelo fértil, existe un lapso de tiempo decisivo y peligrosamente subestimado, el período de manejo post-cosecha de la semilla. En este intervalo, el esqueje deja de ser parte de una planta integrada y se convierte en un organismo independiente y extremadamente vulnerable, cuya viabilidad depende de condiciones críticas. Ignorar su fisiología en esta fase es garantizar, antes de sembrar, el fracaso de una parte significativa de la plantación. Esta ley gobierna la transición entre el esqueje y la raíz.

LA PRÁCTICA DEL "AVIVERADO" UN ERROR QUE SE DISFRAZA DE SABIDURÍA

En algunas regiones, es común la práctica de "aviverar" los esquejes: cortarlos y mantenerlos a la sombra durante 5-7 días antes de la plantación, con la creencia de que así se fortalecen. Durante este período, las hojas se tornan amarillas, se caen, y en los nudos comienzan a emerger raíces fibrosas blancas. Lo que parece un signo de vigor es, en realidad, un proceso de estrés prolongado que compromete seriamente el potencial productivo.

Esta misma práctica, bajo el nombre de "curado", se promueve en algunos manuales de Centroamérica y otros países tropicales como si fuera una técnica recomendable. Se argumenta que dejar los esquejes varios días a la sombra, hasta que emitan raíces, mejora su prendimiento. Es un error que debemos desterrar con la misma contundencia con la que rechazamos los cepellones. La ciencia es clara, lo que se gana en aparente fortaleza, se pierde multiplicado en toneladas.

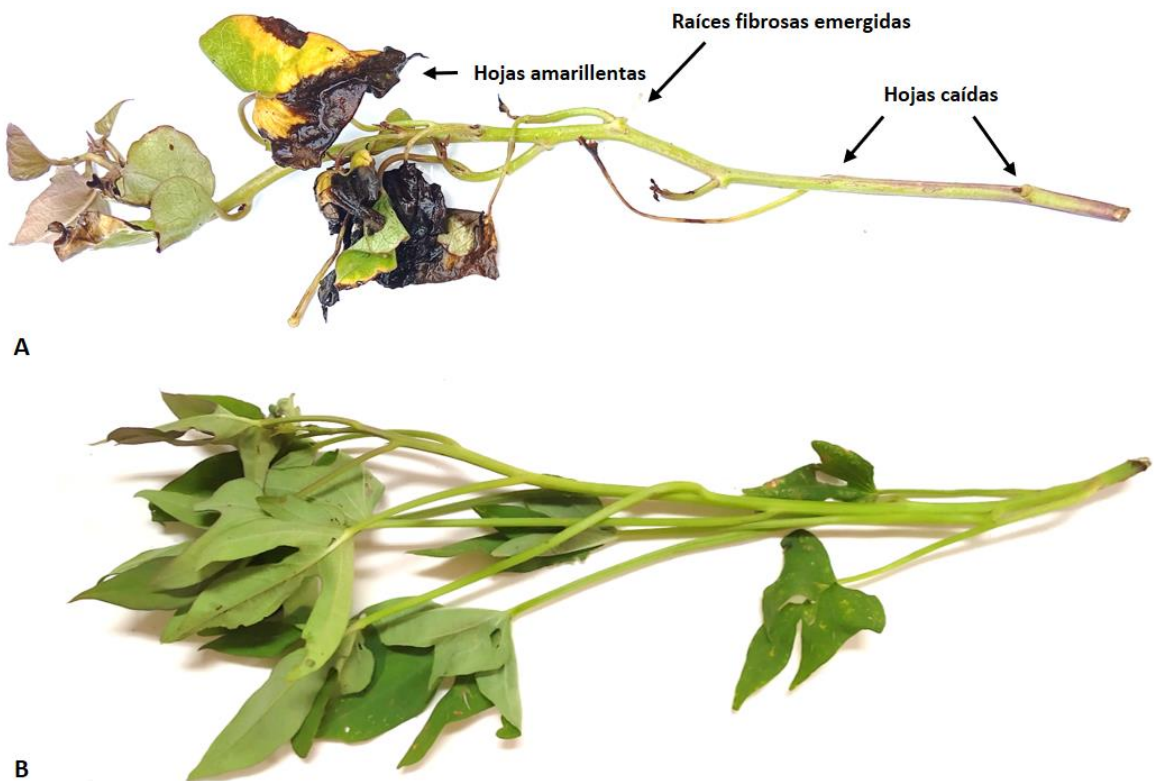


Figura 14.1. Estado fisiológico de los esquejes según el manejo post-corte. A: Esquejes "aviverados" (5 días después del corte, mantenido a la sombra), hojas amarillentas, raíces fibrosas emergidas pero frágiles, hojas caídas por pérdida de turgencia; B: Esqueje fresco (cortado el mismo día), hojas verdes, turgentes, sin emergencia radical prematura, máxima reserva de energía.



Figura 14.2. Plantación con esquejes aviverados (currados) después de varios días de almacenamiento a la sombra. Los esquejes presentan hojas amarillentas, pérdida de turgencia, raíces prematuras frágiles y una longitud excesiva, condiciones que comprometen severamente el establecimiento del cultivo.



Figura 14.3. Esquejes de boniato recién cortados y plantados dentro de las primeras 24 horas. Se observan hojas verdes y turgentes, sin emergencia de raíces prematuras, conservando al máximo sus reservas energéticas y su capacidad de enraizamiento. Este manejo asegura un establecimiento rápido y uniforme del cultivo.

LA TRAMPA FISIOLÓGICA DEL AVIVERADO

Estas raíces que emergen durante el aviverado no son un signo de vigor; son una trampa fisiológica. Durante los días de espera a la sombra, el esqueje (privado de su conexión con el suelo) activa sus primordios radicales en un intento desesperado por buscar agua y nutrientes que no existen. Pero estas raíces son extremadamente frágiles, carecen de la estructura lignificada que las endurecería en el suelo, y al menor contacto se parten, dejando expuesto y dañado el primordio radicular del que surgieron.

Lo más grave es lo que ocurre a nivel fisiológico. El esqueje, al estar varios días sin sembrar, pierde turgencia (esa presión hidráulica interna que mantiene sus células erectas y funcionales) y agota sus reservas energéticas en el proceso de emitir raíces que luego serán destruidas. Cuando finalmente llega al suelo, llega debilitado, deshidratado y con sus primordios radicales dañados.

Pero hay un punto aún más crítico. Como establecimos en la Ley 1: La Anatomía del Rendimiento, el 90% de las raíces que formarán los boniatos comerciales se deciden en los primeros 7-10 días después de la plantación. Es en esa ventana temprana donde la planta define cuántos primordios radicales se transformarán en raíces tuberosas. Si al momento de la plantación el esqueje ya tiene sus primordios dañados por la manipulación, esa ventana se cierra antes de abrirse. Las raíces que se partieron durante el manejo son, literalmente, boniatos que nunca existirán.

Cada raíz fibrosa que se rompe al manipular un esqueje aviverado es una promesa de rendimiento que se desvanece. La planta no puede regenerar esos primordios perdidos; el daño es irreversible. Por eso, sembrar un esqueje que ha estado días fuera del suelo es como iniciar la carrera con un atleta lesionado, puede llegar a la meta, pero nunca dará su mejor rendimiento.

El punto de ruptura se observa como una pequeña lesión necrótica (negra) donde el tejido quedó expuesto, comprometiendo irreversiblemente ese primordio.



Nudo de esqueje aviverado por exceso de días. Las puntas de las raíces emergidas (cofia radical) se han necrosado y tornado negras por deshidratación y exposición al ambiente fuera del suelo.



Nudo de esqueje fresco, manejado con cuidado y sembrado en menos de 24 horas. Las raíces emergen de los primordios como puntas blancas y turgentes, listas para explorar el suelo.

Figura 14.4. Estado de los primordios radicales en esquejes según el manejo post-corte. A: Primordios dañados por manipulación, nudo de esqueje aviverado donde las raíces fibrosas emergidas se han partido; B: Primordios necrosados por desecación; C: Primordios sanos e intactos.

LO QUE LA CIENCIA Y LA TRADICIÓN NOS ENSEÑAN

La tradición cubana, heredada de siglos de cultivo, nunca necesitó de estas prácticas artificiales. El esqueje fresco, cortado en la hora fresca y sembrado antes de 24 horas, es insuperable. No necesita "aviverarse" ni "curarse". Necesita llegar al suelo con sus hojas verdes, su turgencia intacta y sus primordios radicales listos para activarse bajo tierra, no en el aire.

Cualquier manual que recomiende el "curado" o "aviverado" de esquejes de boniato está promoviendo una práctica que la fisiología vegetal condena. Es un error que, como el de los cepellones, debemos desterrar. En el boniato, la semilla viva no espera: se siembra.

EL EXPERIMENTO DE NIVELES DE HOJAS

Para comprender el impacto de la pérdida de hojas en el establecimiento de los esquejes, realizamos un experimento comparando esquejes con 100% de hojas, 50% de hojas y sin hojas (simulando el estado de esquejes aviverados que han perdido su follaje). Los resultados son concluyentes. Las plantas con 100% de hojas crecieron 13.66 cm en 16 días, mientras que las plantas sin hojas apenas alcanzaron 4.30 cm, un crecimiento 68% menor. El número de raíces fibrosas por nudo fue más del doble en las plantas con 100% de hojas (8.2) comparado con las sin hojas (3.5). La longitud de las raíces también se redujo drásticamente (de 12.5 cm a 5.2 cm).

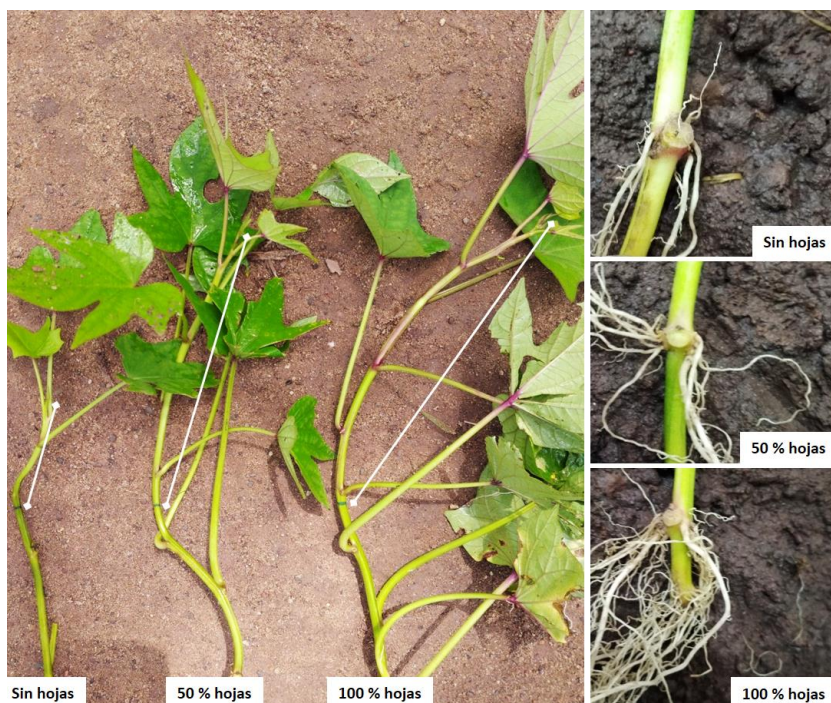


Figura 14.5. Desarrollo de plantas de boniato a los 16 días después de la plantación según el nivel de hojas inicial del esqueje. Las imágenes muestran el contraste en crecimiento foliar, formación de nueva área foliar y desarrollo del sistema radical fibroso en los tres tratamientos evaluados.

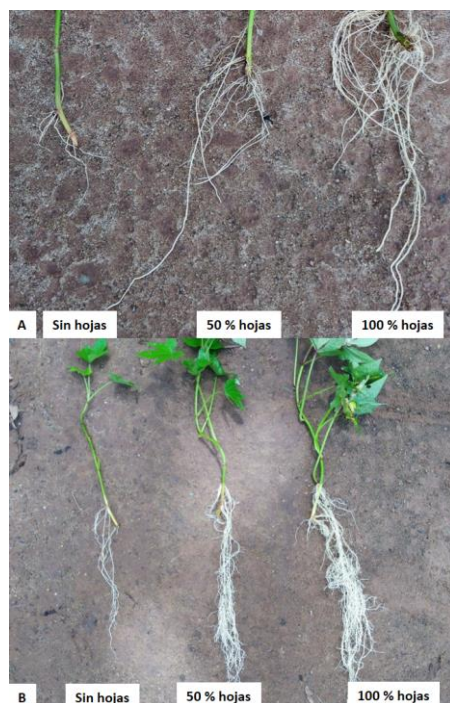


Figura 14.6. Desarrollo de plantas de boniato según el nivel de hojas inicial del esqueje. A: A los 8 ddp; B: A los 16 ddp.

La explicación fisiológica es clara, las hojas son la fábrica de energía de la planta. Sin ellas, el esqueje depende exclusivamente de las reservas limitadas en su tallo para sobrevivir y enraizar. Pero el tallo, aunque puede realizar algo de fotosíntesis, es un órgano no especializado y muy ineficiente en este proceso.

La respuesta está en la anatomía de la planta. Las hojas poseen una alta densidad de estomas (estructuras especializadas en el intercambio gaseoso) distribuidos estratégicamente en ambas caras (anfiestomáticas) o principalmente en el envés. Estos estomas son las puertas por donde entra el CO_2 necesario para la fotosíntesis y sale el oxígeno producido. En el tallo, los estomas son escasos, dispersos y a menudo poco funcionales. El tejido caulinar (del tallo) tiene como función principal el sostén y el transporte, no la captura de energía lumínica.

Además, las células del tallo están recubiertas por una cutina gruesa y, en muchos casos, una capa de suberina que impermeabiliza su superficie para evitar la pérdida de agua, pero que también actúa como una barrera física que dificulta la entrada de CO_2 . Las células que contienen cloroplastos en el tallo (si las hay) están en capas profundas, bajo varios estratos de tejido protector, muy lejos de la superficie. En las hojas, en cambio, los cloroplastos están justo debajo de la epidermis, a unos pocos micrómetros de la fuente de CO_2 .

Por último, la densidad de cloroplastos por unidad de área es incomparablemente mayor en las hojas que en los tallos. Una hoja de boniato puede tener cientos de miles de cloroplastos por milímetro cuadrado de tejido fotosintético, mientras que en el tallo esa cifra se reduce drásticamente, y los pocos cloroplastos presentes están mal posicionados para capturar luz.

Cada hoja que se pierde es un pedazo de la fábrica que se cierra; cuando la fábrica está vacía, la producción se detiene.

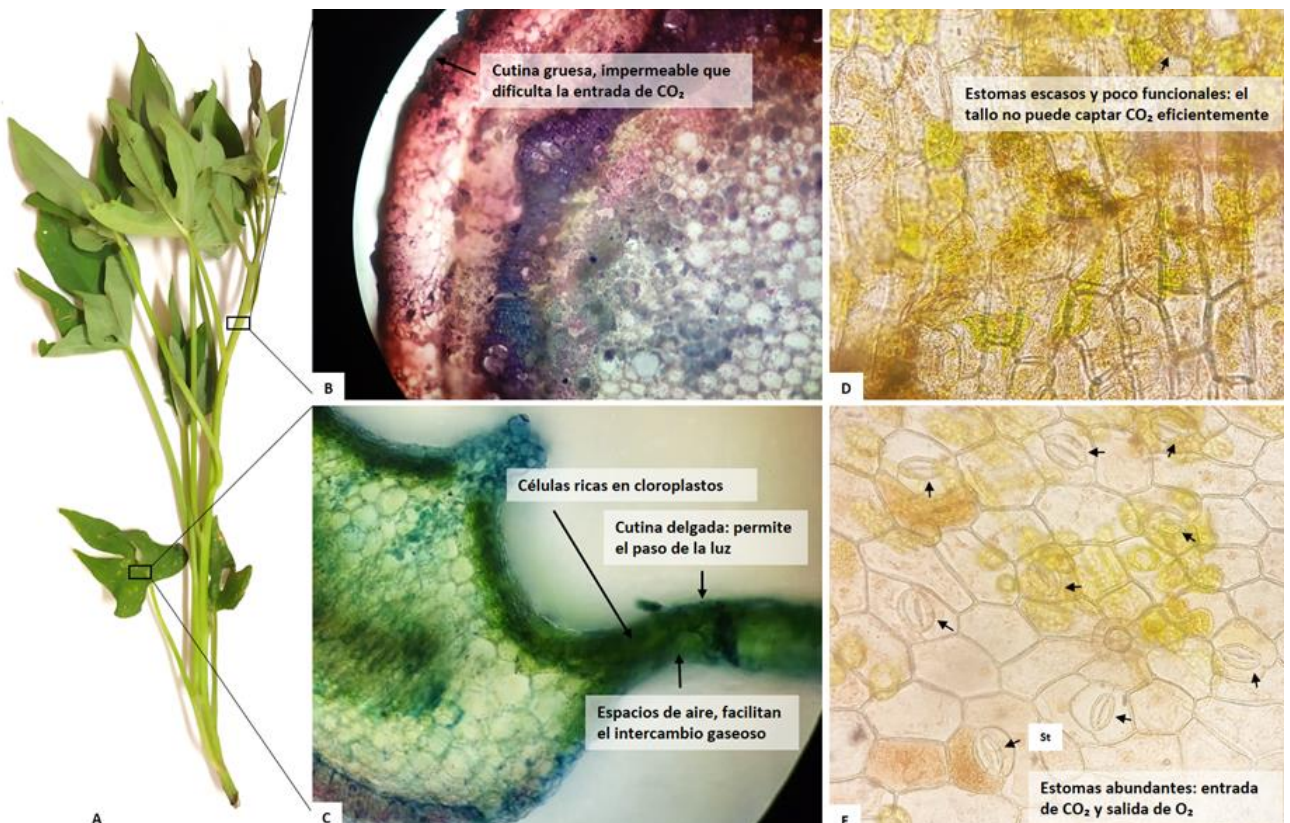


Figura 14.7. Por qué el esqueje necesita sus hojas. A: Esqueje de boniato de 30 cm de longitud; B: Corte transversal del tallo; C: Corte transversal de la hoja; D: Detalle de la epidermis del tallo: estomas escasos, dispersos y poco funcionales; E: Detalle de la epidermis de la hoja: estomas abundantes, funcionales y estratégicamente ubicados.

IMPACTO EN EL RENDIMIENTO FINAL

El retraso en el crecimiento inicial observado en los esquejes sin hojas o con pocas hojas no es un problema temporal. Las plantas que arrancan con desventaja no logran recuperarse completamente durante el ciclo. La pérdida de las primeras semanas (el período donde se define el número de raíces tuberosas es irreversible. Al llegar a la cosecha, las diferencias se mantienen y se traducen directamente en toneladas menos por hectárea.

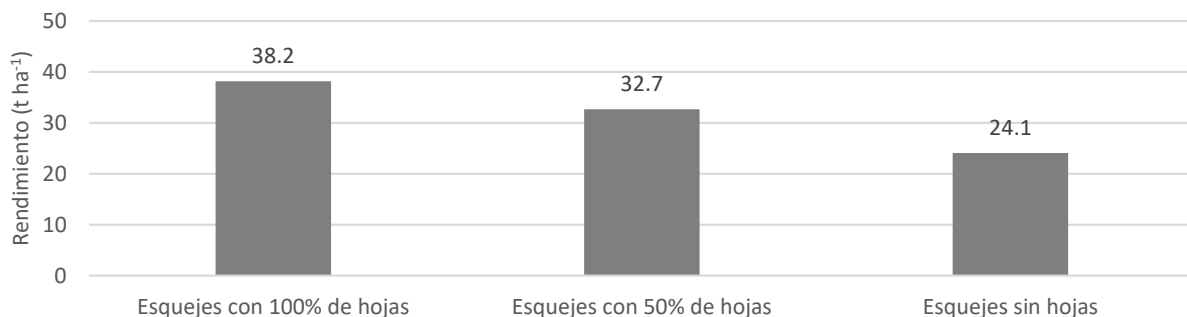


Figura 14.8. Rendimiento según el nivel de hojas inicial del esqueje. Las plantas que perdieron sus hojas durante el aviverado o por manejo inadecuado nunca logran recuperar el potencial de las que se sembraron con su follaje intacto.

¿POR QUÉ ALGUNOS PRODUCTORES CORTAN LAS HOJAS?

Existe una creencia errónea muy extendida, que los esquejes con hojas verdes se deshidratan rápidamente después del corte, y que por eso es mejor aviverarlos hasta que pierdan el follaje, o incluso cortar las hojas antes de plantar, dejando solo el tallo. Esta práctica es un error fisiológico garrafal que condena al cultivo desde el inicio.

Cuando un esqueje se corta, la planta entra en estado de *shock*. Las hojas, lejos de deshidratarse descontroladamente, cierran sus estomas en cuestión de minutos como mecanismo de defensa. Los estomas son las puertas por donde sale la mayor parte del agua (entre el 90% y el 95% de la transpiración total). Este cierre estomático es tan eficaz que la pérdida de agua por transpiración se reduce drásticamente, hasta niveles que el esqueje puede soportar sin problema durante horas, siempre que no esté expuesto al sol directo.

La transpiración cuticular (la que ocurre a través de la cutícula cerosa que recubre hojas y tallos) es mínima, representando apenas entre el 5% y el 10% del total de pérdida de agua. Esta cutícula actúa como una barrera impermeable que protege al tejido de la desecación. Por eso, un esqueje con hojas verdes, mantenido a la sombra y en un ambiente fresco, no se deshidrata significativamente en las primeras 24 horas después del corte.

Los estomas permanecen cerrados hasta que el esqueje entra en contacto con el suelo húmedo y comienza a absorber agua. Una vez plantado, las raíces en formación empiezan a tomar agua y las señales hidráulicas viajan por el tallo hasta las hojas, indicando que es seguro reabrir los estomas. Es entonces, y solo entonces, cuando la planta reanuda plenamente su actividad fotosintética.

La lección es clara, las hojas no son un lastre que haya que eliminar; son el motor energético que impulsa el enraizamiento y el crecimiento inicial. Un esqueje sin hojas es un motor sin combustible.

Sin hojas no hay fábrica. Sin fábrica no hay azúcar. Sin azúcar no hay boniato. Así de simple.

EL DAÑO POR EXPOSICIÓN SOLAR DIRECTA

La práctica de dejar los esquejes expuestos al sol después del corte es aún más catastrófica que el aviverado a la sombra. Nuestros estudios cuantificaron este impacto con datos alarmantes. A las 24 horas de exposición al sol, ya se ha perdido casi un tercio de la inversión en semilla. A las 48 horas, se ha perdido más de la mitad de las plantas. A las 72 horas, el campo queda prácticamente destruido y a las 96 horas, la muerte es total. No hay recuperación posible.

Pero el daño no se limita a las plantas que mueren. Incluso los esquejes que sobreviven 24 horas de exposición arrastran un daño fisiológico irreversible, su rendimiento cae de 37.8 t/ha (testigo a la sombra) a 29.6 t/ha, una pérdida de más del 21% en productividad. El estrés no solo mata, sino que también debilita de por vida a los sobrevivientes.

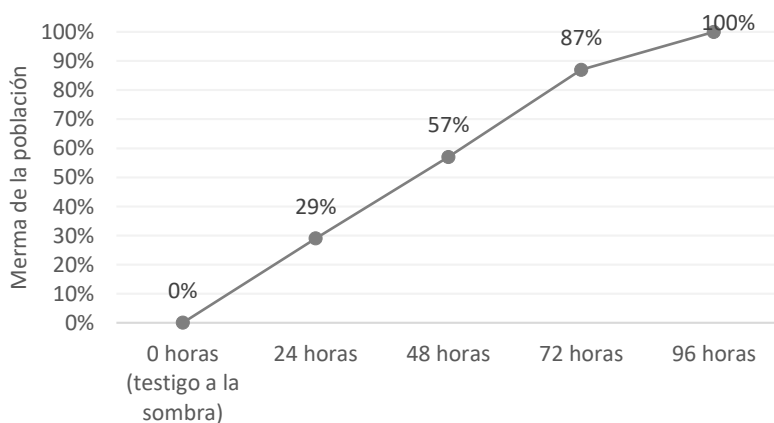


Figura 14.9. Pérdida de población por exposición solar de los esquejes antes de la plantación.

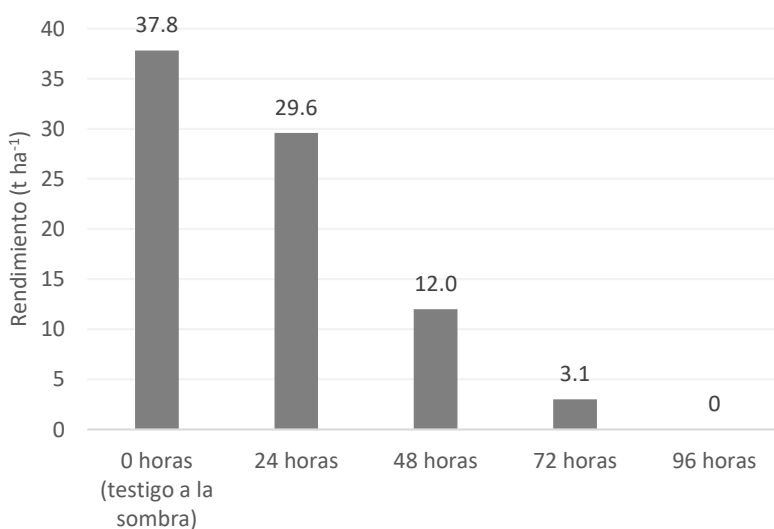


Figura 14.10. Rendimiento de los esquejes sobrevivientes según tiempo de exposición solar.





Figura 14.11. Daño irreversible por exposición solar prolongada. Esquejes de boniato después de cuatro días de exposición directa al sol. Las hojas están completamente necrosadas, secas y quebradizas. Los tallos presentan manchas negruzcas y pardo-oscuras (tejido muerto por desecación extrema y estrés térmico) donde las células han colapsado irreversiblemente, perdiendo turgencia y funcionalidad.

EL PRECIO DE LA DESPOBLACIÓN

A las 24 horas de exposición al sol, se pierde el 29% de las plantas; a las 48 horas, el 57%; a las 72 horas, el 87%; a las 96 horas, el 100%. Pero esos números fríos esconden una realidad más dolorosa, cada planta que falta es una promesa de rendimiento que nunca se cumplirá.

En una plantación de boniato con densidad óptima (37,037 plantas/ha, 90 x 30 cm), cada planta tiene el potencial de producir entre 2-3 raíces comerciales, con un peso promedio de 400-500 gramos por raíz en variedades de alto rendimiento. Esto significa que cada planta puede aportar entre 0.8 y 1.5 kg de cosecha comercial, lo que en términos de rendimiento equivale a 29.6 y 55.5 t/ha respectivamente cuando la población está completa.

Una falla del 29% (que es lo que ocurre cuando los esquejes se dejan 24 horas al sol) significa que se pierden tres de cada 10 plantas. En un metro lineal de surco con distancia de 0.30 m entre plantas, donde deberían ir 3.3 plantas, falta aproximadamente una planta por cada metro. Esa pérdida representa, en términos brutos, más de 10,000 plantas por hectárea que nunca llegarán a cosecharse. Con ellas, se pierden entre 8-15 toneladas de rendimiento potencial que jamás se recuperarán.



Figura 14.12. Campo de boniato con severa despoblación por uso de esquejes expuestos al sol antes de la plantación. Se observan los espacios vacíos donde las plantas no lograron establecerse, reduciendo drásticamente la población final y el rendimiento potencial.

¿SE PUEDEN REPONER ESAS PLANTAS PERDIDAS CON RESIEMBRAS?

Nuestros estudios demuestran que no es una estrategia viable. Hemos evaluado resiembras realizadas a diferentes edades del cultivo y los resultados son concluyentes. Cuando la resiembra se hace después de los 15 días de establecido el cultivo, las plantas de reemplazo sufren un retraso irreversible.

Las plantas resemebradas inician su proceso de enraizamiento y definición de su arquitectura vascular (poliarca o no) cuando las plantas originales ya llevan 10-15 días de ventaja. Ese desfase es crítico, mientras las plantas originales están entrando en la fase de llenado de raíces, las resemebradas apenas están definiendo su potencial. Al llegar a la cosecha, las plantas resemebradas nunca alcanzan el tamaño, ni la calidad, ni el % de materia seca de las establecidas a tiempo.

En nuestros experimentos, las plantas resemebradas a los 15 días produjeron raíces con un peso promedio 30-40% menor que las plantas originales, y una proporción significativa de ellas (hasta un 25%) no llegaron a tuberizar comercialmente. La razón es fisiológica: la sincronía del cultivo se pierde. Las plantas resemebradas compiten en desventaja por luz, agua y nutrientes, y su desarrollo radical tardío choca con la fase de llenado de las plantas establecidas tempranamente.

La mejor estrategia, por tanto, no es reponer; es evitar que falten. Una resiembra es una solución de emergencia que nunca alcanza la eficiencia de una plantación completa y uniforme desde el inicio. Por eso, la Ley de la Semilla Viva no es solo una recomendación técnica; es una ley de prevención económica. Cada planta que se pierde por mal manejo post-corte es un costo que no se recupera, una inversión en semilla, mano de obra y preparación de suelo que no dará fruto.

En el boniato, no hay reposición que compense una mala siembra. La primera oportunidad es la única oportunidad.

LA FISIOLOGÍA DEL COLAPSO

Un esqueje recién cortado es una herida abierta y un sistema en *shock*. Sus prioridades fisiológicas inmediatas son dos:

1. Cicatrizar la herida del corte para evitar la entrada de patógenos y la pérdida masiva de agua.
2. Movilizar reservas para iniciar la formación de raíces adventicias. Ambas requieren un gasto energético enorme y un metabolismo activo.

La exposición solar directa ataca este proceso frágil por tres vías simultáneas:

1. Deshidratación. El tallo, privado de su sistema radical, no puede reponer el agua que pierde por transpiración y evaporación. Bajo el sol, esta pérdida es exponencial. Las células se plasmolizan, los tejidos se marchitan y la turgencia (la fuerza hidráulica esencial para el crecimiento celular) se desploma. Sin turgencia, no hay división celular ni emergencia de raíces.
2. Estrés térmico. La radiación solar eleva la temperatura del tejido muy por encima de la ambiental. Este calor desnaturaliza enzimas clave, aumenta la respiración quemando reservas de carbohidratos, y daña las membranas celulares, haciendo que pierdan su integridad.
3. Fotoinhibición y radicales libres. La luz solar intensa en hojas estresadas satura el aparato fotosintético. En lugar de producir energía, se generan especies reactivas de oxígeno que oxidan y dañan lípidos, proteínas y ADN, acelerando la muerte celular programada.

El sol no solo seca el esqueje; lo cuece, lo ahoga metabólicamente y lo envenena desde dentro.

Esta ley es fundamental porque representa el primer y más crítico punto de control de calidad en el campo. De nada sirve seleccionar los nudos óptimos (Ley 8), usar material certificado (Ley 12) o sembrar en la densidad correcta (Ley 13), si los esquejes son tratados como desechos inertes entre el corte y la siembra. Es el cuello de botella operativo donde se pierden, en horas, los beneficios de meses de trabajo en el banco de semilla. Una cadena es tan fuerte como su eslabón más débil; aquí, el manejo post-corte es ese eslabón.

La ley se traduce en un protocolo no negociable que todo productor debe convertir en rutina:

| Práctica | Recomendación |
|-------------------------------|---|
| Hora de corte | Realizar en las primeras horas de la mañana o al final de la tarde, cuando la demanda transpiratoria es mínima y los tejidos están más hidratados. |
| Manejo inmediato | Depositar los esquejes inmediatamente después del corte en un lugar fresco, ventilado y totalmente sombreado. Bajo un árbol, en una nave, cubiertos con sacos húmedos o mallas de sombreado. |
| Si no se siembra el mismo día | Agrupar en mazos sueltos (nunca apretados para evitar el calentamiento). Si el período supera las 6 horas, humedecer ligeramente el follaje con un rocío fino de agua limpia, nunca encharcando los tallos. |
| Tiempo máximo | El tiempo ideal entre el corte y la siembra es menor de 12 horas. Nunca debe exceder las 24 horas, incluso bajo sombra. Cada hora cuenta, cada hora es turgencia que se pierde. |

La Ley de la Semilla Viva enseña que el boniato no comienza en el surco, sino en el momento del corte. El esqueje no es un palito para clavar; es un ser fisiológicamente activo que respira, transpira y lucha por sobrevivir. Su manejo requiere el mismo cuidado que se tendría con una plántula recién germinada.

No hay que temer a las hojas verdes. Las hojas no deshidratan el esqueje; al contrario, son su única fuente de energía para enraizar y crecer. El verdadero peligro no es la hoja, es el sol directo, el tiempo excesivo fuera del suelo y la manipulación brusca que rompe las raíces recién formadas. Un esqueje bien manejado (cortado en la hora fresca, sembrado antes de 24 horas, con todas sus hojas verdes y sin raíces prematuras) es una promesa de alto rendimiento.

Esta ley separa al productor meticuloso del descuidado. Es una ley de logística y respeto biológico. Quien la cumple, asegura que el 100% del potencial genético y fisiológico que seleccionó y pagó llegue vivo y vigoroso al suelo. Quien la ignora, siembra, literalmente, un campo de cadáveres vegetales y sobrevivientes lisiados, condenando su cosecha al fracaso desde el mismísimo inicio.

Un esqueje marchito es una promesa de rendimiento rota. Un esqueje con hojas verdes, sembrado a tiempo, es el primer paso hacia las 50 toneladas por hectárea.





LEY 15

DE LA ALIMENTACIÓN SABIA



Fertilizar no es echar, es equilibrar. La planta no responde a la cantidad de fertilizante que recibe, sino a la sincronía entre lo que demanda y lo que se le entrega.

INTRODUCCIÓN

En la producción de boniato, la fertilización suele ser la práctica más costosa y, a la vez, la peor entendida. Existe la creencia de que a más fertilizante, más cosecha. Pero la realidad es otra, el exceso de fertilizante no solo encarece la producción, sino que puede reducir el rendimiento, desequilibrar la planta y dañar el suelo.

La Ley de la Alimentación Sabia postula que el alto rendimiento no se logra inyectando nutrientes en exceso, sino entregando a la planta lo que necesita, en el momento preciso, en la cantidad justa y en la forma adecuada.

LO QUE LA PLANTA NECESITA

Hoy sabemos la cantidad total de nutrientes que una plantación de boniato de alto rendimiento extrae del suelo. Para una cosecha de 35-40 toneladas por hectárea, la planta absorbe aproximadamente:

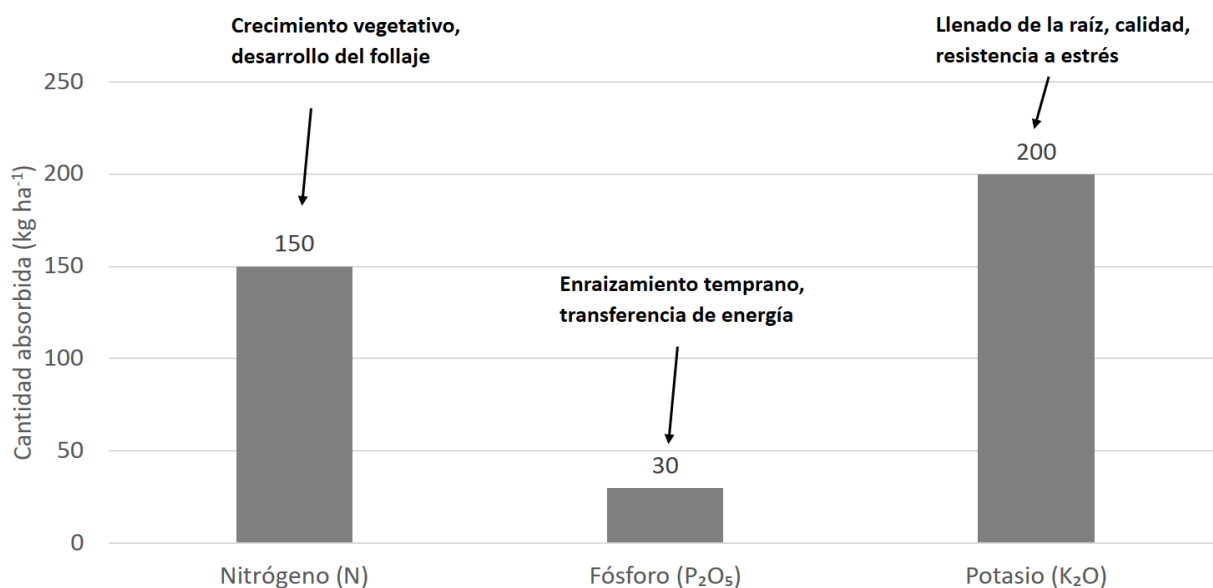


Figura 15.1. Extracción total de nutrientes por una plantación de boniato de alto rendimiento (35-40 t/ha de raíces).

Estas cifras representan la extracción total de la planta, es decir, lo que se acumula tanto en las raíces cosechadas como en el follaje, tallos y raíces fibrosas que quedan en el campo.



Pero atención, la dosis de fertilizante que se aplica no es igual a lo que la planta extrae. Entre el fertilizante que se echa al suelo y lo que la planta realmente absorbe hay un abismo de diferencias. ¿Por qué? Porque el suelo es un sistema vivo y complejo:

- El nitrógeno se volatiliza (se pierde como gas) si se aplica en la superficie, o se lixivia (se lava con el agua) si llueve fuerte después de aplicarlo.
- El fósforo se fija en el suelo, especialmente en suelos ácidos como muchos de Cuba. Aunque se aplique, solo una fracción queda disponible para la planta; el resto queda bloqueado.
- El potasio puede lavarse en suelos arenosos si se aplica muy temprano y llueve antes de que la planta lo necesite.

Por eso, las dosis de fertilizante recomendadas siempre son más altas que la extracción de la planta. Se aplica más para compensar las pérdidas y asegurar que la planta reciba lo que necesita en el momento que lo necesita.

Ejemplo práctico

La fórmula 9-13-17 (9% N, 13% P₂O₅, 17% K₂O) es una de las más usadas en Cuba. Si se aplican 800 kg/ha (0.8 t/ha) de esta fórmula, los nutrientes aportados son:

N: 72 kg (9% de 800)

P₂O₅: 104 kg (13% de 800)

K₂O: 136 kg (17% de 800)

Esta dosis se acerca a lo que la planta necesita, aunque aún está por debajo de los 200 kg de potasio que extrae una plantación de alto rendimiento. Por eso, muchas veces hay que complementar con más potasio (cloruro o sulfato) y fraccionar el nitrógeno para que no se pierda.

La clave no es la cantidad de fertilizante que se echa, sino cuánto de lo que se echa termina siendo aprovechado por la planta. Un suelo con baja materia orgánica y mala estructura desperdicia fertilizante; un suelo vivo lo aprovecha mejor.

La lección es clara, el potasio es el nutriente rey del boniato. La planta necesita casi tanto potasio como nitrógeno, y mucho más que fósforo. Ignorar esta relación es condenar la tuberización desde el inicio. Sin potasio suficiente, la planta no puede activar las enzimas que convierten los azúcares en almidón, y el llenado de las raíces se detiene. **Por eso, en cualquier estrategia de fertilización (orgánica, química o mixta) el potasio debe ser una prioridad.**



EL NUTRIENTE OLVIDADO (EL POTASIO)

El potasio no es un nutriente más; es el director de orquesta de la fisiología del boniato. Su papel es decisivo por varias razones:

1. Activa las enzimas del llenado de la raíz: El potasio regula directamente la sacarosa sintasa (SuSy) y la almidón sintasa (SSS), las enzimas que convierten los azúcares en almidón dentro de la raíz. Sin potasio, la fábrica de almidón se apaga.
2. Acelera el transporte de azúcares: El potasio mejora el flujo de fotoasimilados desde las hojas (fuente) hacia las raíces en formación (sumidero). Aumenta la actividad de la sacarosa fosfato sintasa (SPS) en las hojas, lo que incrementa la producción de sacarosa y su transporte hacia las raíces.
3. Mejora la calidad de la cosecha: La aplicación de potasio aumenta el contenido de azúcares solubles, vitamina C y proteína en las raíces. La combinación óptima de fertilizantes elevó el contenido de azúcares solubles hasta un 46.2%.
4. Aumenta el rendimiento de forma significativa. Sin potasio suficiente, el boniato no llena sus raíces. En nuestros estudios, evaluamos diferentes dosis de potasio en un suelo de baja disponibilidad natural. Los resultados muestran una respuesta clara y creciente hasta un punto óptimo, a partir del cual el rendimiento se estabiliza.

En un suelo pobre en potasio, la aplicación de este nutriente puede casi duplicar el rendimiento, pasando de 12.5 a 22.0 t/ha. Más allá de 180 kg K₂O/ha, el incremento es marginal y no justifica el costo adicional. La lección es clara, el potasio no es un lujo, es la base del rendimiento. En suelos con deficiencia, no hay otra práctica que pueda compensar su falta.

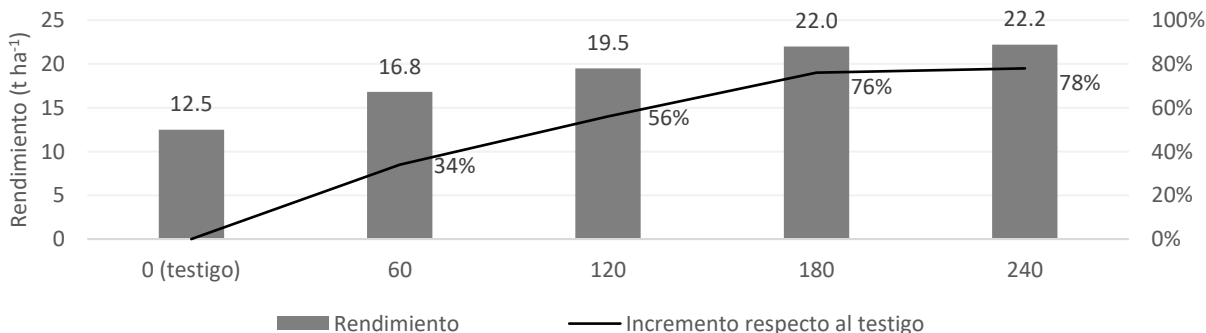


Figura 15.2. Respuesta del boniato a la aplicación de potasio (K₂O) en un suelo con baja disponibilidad natural.

Un suelo con bajo potasio es un techo de rendimiento que no se puede romper con nada más. Sin potasio, no hay tuberización. Sin potasio, no hay calidad.

El peligro del exceso

Un error común es pensar que, si un poco de fertilizante es bueno, mucho es mejor. Los estudios demuestran lo contrario. En ensayos con dosis crecientes de nitrógeno (el nutriente que más influye en el crecimiento vegetativo) se encontró que las dosis más altas no produjeron los mejores rendimientos. El máximo se alcanzó con el 75% de la dosis recomendada; más allá de ese punto, el rendimiento se estancó o disminuyó.

El nitrógeno en exceso desvía el metabolismo de la planta. En lugar de enviar recursos a las raíces para que se engrosen, la planta los invierte en alargar tallos y producir más hojas. Es el camino directo al vicio, una planta exuberante por fuera, vacía por dentro.

Por eso, hay una regla que no admite excepción: en siembras de primavera, donde el riesgo de vici es mayor, no se debe aplicar nitrógeno en absoluto. Si el suelo es muy pobre, se puede aplicar una dosis muy baja antes de la siembra, pero nunca después.

EL VALOR DE LA MATERIA ORGÁNICA

Nuestros estudios confirman lo que los campesinos saben desde siempre, la materia orgánica no es un fertilizante más, es la base de la fertilidad duradera. En un experimento con diferentes fuentes orgánicas aplicadas a razón de 15-20 toneladas por hectárea, encontramos que cada una aporta algo distinto. El estiércol de cerdo destacó por el mayor rendimiento, alcanzando 48.6 toneladas por hectárea, y la mejor tasa de comercialización (78%), es decir, más raíces de primera calidad. El estiércol de oveja, en cambio, favoreció el crecimiento aéreo y la producción de biomasa, lo que lo hace valioso para sistemas donde se aprovecha también el follaje. El estiércol de vaca, por su parte, dio raíces con la mayor proporción de materia seca (71%), es decir, más concentradas en almidón y menos agua.

La conclusión práctica es sencilla, cualquier materia orgánica disponible en la finca (cachaza, estiércol de cualquier tipo, compost) es valiosa. No importa tanto cuál, sino que se aplique. El suelo responde a la vida, no a la fórmula química exacta.

ORGÁNICO + QUÍMICO

La mejor estrategia no es elegir entre orgánico o químico, sino saber cuándo y cómo combinarlos. En un experimento clave evaluamos diferentes proporciones de fertilizante químico y materia orgánica (estiércol bien descompuesto o cachaza, que en este caso llamamos bio-orgánico por su actividad microbiana).

La mezcla 50% químico + 50% orgánico alcanza el mayor rendimiento (41.7 t/ha), superando en un 28% al químico solo. El tratamiento solo orgánico produce menos, pero con la mejor calidad: raíces más dulces, más firmes y con mayor valor nutricional.

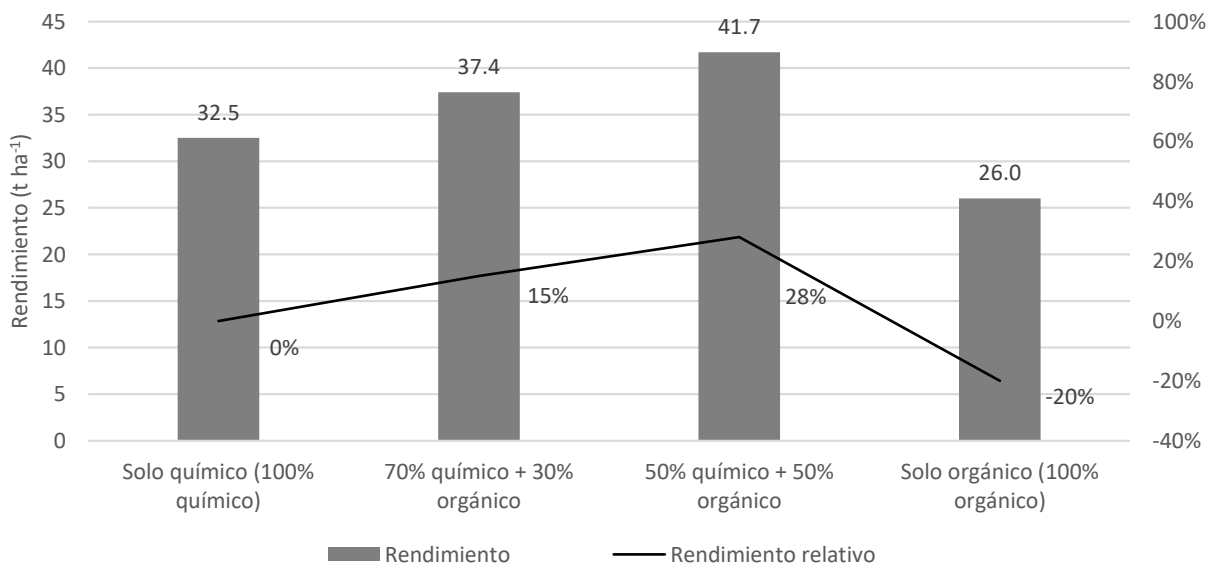


Figura 15.3. Rendimiento del boniato según la combinación de fertilizante químico y materia orgánica.

¿Qué significa esto en la práctica? Si tiene acceso a materia orgánica (cachaza, estiércol, compost), úsela. Combine la mitad de la dosis química con la materia orgánica. No solo obtendrá más toneladas por hectárea, sino que estará construyendo suelo fértil para los próximos ciclos. Si no tiene acceso a materia orgánica suficiente, aún puede obtener buenos resultados con químico solo, pero recuerde, el suelo se empobrece con el tiempo. La materia orgánica no es un gasto; es una inversión que se multiplica cosecha tras cosecha.

BIOFERTILIZACIÓN CON MICORRIZAS

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) forman una simbiosis natural con las raíces del boniato. Actúan como una extensión radical externa, explorando un volumen de suelo hasta 50 veces mayor que la raíz sola, y transfiriendo a la planta principalmente fósforo (P) y agua. En suelos con baja disponibilidad de fósforo (como los Ferralíticos Rojos de Cuba), esta simbiosis es particularmente valiosa.

En Cuba se comercializa el EcoMic®, un biofertilizante a base de HMA que ha dado excelentes resultados en el cultivo. La dosis recomendada es de 35 kg por hectárea de inóculo. Su preparación es sencilla, se mezclan 20 kg de inóculo con 100 litros de agua hasta lograr una pasta fluida. Con esa pasta se inocula el primer tercio de los esquejes (la parte que irá enterrada), y se plantan directamente, o se dejan secar a la sombra para plantar después.



Figura 15.4. Preparación de esquejes para la plantación. Mazos de 100 bejucos se sumerge en la pasta fluida de EcoMic® (hongos micorrízicos arbusculares) para inocular el primer tercio de la semilla, asegurando la colonización de las raíces desde el inicio del ciclo.

El beneficio es doble. Por un lado, las plantas micorrizadas son más tolerantes a la sequía y absorben mejor el fósforo, lo que se traduce en un sistema radical más denso y vigoroso. Por otro lado, el uso de EcoMic® permite ahorrar hasta el 50% del fertilizante mineral que se aplicaría convencionalmente, sin afectar el rendimiento. En condiciones de baja fertilidad, el incremento de rendimiento por micorrización puede alcanzar el 10-15%, y en suelos pobres en fósforo, la absorción de este nutriente puede aumentar hasta un 50%.

Integrar las micorrizas en el sistema de fertilización no es un lujo; es una estrategia de eficiencia. Reduce la dependencia de fertilizantes químicos, mejora la salud del suelo y potencia el rendimiento de forma sostenible.

El fertilizante químico es una herramienta, no una necesidad absoluta.

Un suelo vivo, con alta materia orgánica (>3%) y microbiota activa, no necesita grandes dosis de química. Lo que necesita es que el productor deje de ver la fertilización como una receta fija y la convierta en una decisión informada: análisis de suelo, recursos disponibles, objetivos de rendimiento.

BIOFERTILIZACIÓN

ALIADOS BIOLÓGICOS PARA REDUCIR COSTOS Y MEJORAR LA EFICIENCIA

Además de las micorrizas, existen otros biofertilizantes que potencian la nutrición del boniato y permiten reducir las dosis de fertilizantes químicos. Investigaciones del INIVIT han evaluado *Pseudomonas fluorescens* Migula (que solubiliza el fósforo) y *Azotobacter chroococcum* Beijerinck (que fija el nitrógeno). Los resultados muestran que con estos biofertilizantes se puede ahorrar hasta un 60% de fertilizante químico sin perder rendimiento.

***Pseudomonas fluorescens*. Menos fósforo, igual cosecha**

El gráfico muestra claramente que la aplicación de *Pseudomonas fluorescens* permite reducir a la mitad la dosis de fósforo sin afectar el rendimiento. Con 20 kg/ha de P_2O_5 más la bacteria se alcanzan 28.3 t/ha, superior al rendimiento que se obtiene con 40 kg/ha sin la bacteria (27.1 t/ha). En suelos pobres en fósforo (0 kg/ha), la bacteria también ayuda, subiendo el rendimiento de 13.7 a 17.8 t/ha. **La bacteria no reemplaza al fertilizante, pero lo hace mucho más eficiente.**

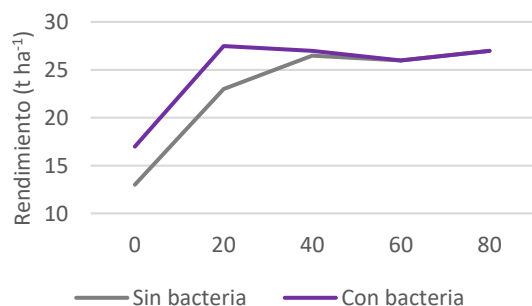


Figura 15.5. Efecto de *Pseudomonas fluorescens* en el rendimiento del boniato con diferentes dosis de fósforo. A 20 kg + bacteria se alcanza el mismo rendimiento que a 40 kg sin bacteria, demostrando un ahorro del 50% en fertilizante fosfatado.

***Azotobacter chroococcum*. Menos nitrógeno, menos riesgo de "vicio"**

El nitrógeno es necesario, pero su exceso desvía la planta hacia el crecimiento vegetativo y reduce la tuberización ("vicio"). Con *Azotobacter chroococcum* se puede reducir drásticamente la dosis de nitrógeno, con solo 25 kg/ha de N más la bacteria se alcanzan 32.5 t/ha, prácticamente el mismo rendimiento que se obtiene con 75 kg/ha sin bacteria (34.5 t/ha). El ahorro es de 50 kg de nitrógeno por hectárea, más del 60%. Además, al usar menos nitrógeno químico, se reduce el riesgo de que la planta se vaya a "vicio".

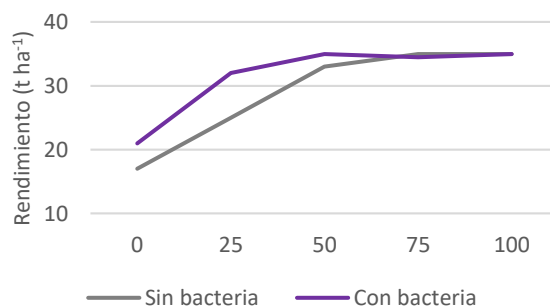


Figura 15.6. Efecto de *Azotobacter chroococcum* en el rendimiento del boniato con diferentes dosis de nitrógeno. A 25 kg + bacteria se iguala el rendimiento de 75 kg sin bacteria, con un ahorro del 60% en fertilizante nitrogenado.

Recomendación

Aplique estos biofertilizantes en el momento de la plantación, junto con la materia orgánica y el fertilizante de fondo, y una segunda dosis a los 20 días. Con *Pseudomonas fluorescens* ahorra la mitad del fósforo (de 40 a 20 kg/ha). Con *Azotobacter chroococcum* ahorra el 60% del nitrógeno (de 75 a 25 kg/ha). Son baratos, fáciles de aplicar y le devuelven el dinero en fertilizantes ahorrados.



Figura 15.7. Esquema de aplicación de biofertilizantes en el cultivo del boniato. A: Aplicación del biofertilizante (*Pseudomonas fluorescens* o *Azotobacter chroococcum*) en el fondo del surco; B: Plantación de los esquejes sobre el biofertilizante aplicado; C: Crecimiento y desarrollo del cultivo, con una segunda aplicación del biofertilizante; D y E: Evaluaciones en la cosecha.

ESTRATEGIAS PRÁCTICAS PARA EL PRODUCTOR

| Momento | Qué aplicar | Dosis / Observación |
|---------------------------------------|----------------------|--|
| Pre-siembra | Materia orgánica | 15-20 t/ha, localizada en el fondo del surco |
| Pre-siembra | Fósforo (P_2O_5) | 100% de la dosis necesaria (el fósforo se fija en el suelo; debe estar disponible desde el inicio) |
| Pre-siembra | Nitrógeno (N) | 50% de la dosis necesaria (el otro 50% se aplica después) |
| 30 días después (inicio tuberización) | Nitrógeno (N) | 50% restante |
| 30 días después (inicio tuberización) | Potasio (K_2O) | 70% de la dosis total (momento crítico: activa las enzimas de síntesis de almidón) |
| 60 días después (llenado, opcional) | Potasio (K_2O) | 30% extra |

¿Por qué aplicar potasio después de la siembra y no todo al inicio?

El potasio es móvil en el suelo y puede lavarse si se aplica muy temprano y llueve mucho. Además, la planta no lo necesita en grandes cantidades hasta que comienza la fase de tuberización (alrededor de los 30 ddp). Por eso, la mejor estrategia es fraccionar su aplicación:

- Primera aplicación (70% de la dosis total): Se aplica a los 30 ddp, en forma de fertilizante granulado. En este momento, el cultivo aún no ha cerrado el campo. Esta es la dosis principal, la que activa las enzimas de síntesis de almidón en el momento crítico de inicio de la tuberización. Dosis: 126 kg K_2O /ha (70%).
- Segunda aplicación (30% de la dosis total): Se aplica a los 60 ddp, en forma de fertilizante foliar o soluble (sulfato de potasio, cloruro de potasio disuelto o biofertilizante rico en K). En esta etapa, el follaje ya ha cerrado el campo, por lo que la aspersión foliar es la vía más práctica. Esta dosis complementaria asegura el llenado continuo en la fase final del ciclo. Dosis: 54 kg K_2O /ha (30%).

El que solo alimenta la planta, cosecha una vez. El que alimenta el suelo, cosecha siempre.



LEY 16

DE LA SIEMBRA HORIZONTAL



La horizontalidad no es una posición; es una estrategia. No se trata de cómo enterrar un tallo, sino de cómo desatar un ejército de yemas.

INTRODUCCIÓN

Una de las decisiones más simples y a la vez más trascendentales durante la plantación del boniato es la orientación física del esqueje en el surco. Esta acción, aparentemente mecánica, activa complejos programas fisiológicos y hormonales dentro de la planta. La Ley de la Siembra Horizontal establece que la posición del esqueje no es un detalle de siembra, sino un disparador ambiental primario que determina la distribución de hormonas, la expresión de las yemas y, en última instancia, la arquitectura productiva de toda la planta. Sembrar vertical o inclinado no es un error de forma; es un error fisiológico con consecuencias cuantificables en toneladas por hectárea.



Figura 16.1. Métodos de plantación del boniato. A: Horizontal; B: Inclinado; C: Vertical; D: Enterrado profundo (ahogado). La imagen muestra, en la parte superior, los esquemas de los métodos de plantación (adaptados de Yan *et al.*, 2022) y, en la parte inferior, fotografías de campo que ilustran cada técnica.



En nuestros experimentos evaluamos cuatro posiciones de plantación: horizontal, inclinada, vertical y entierro profundo con decapitación (Ahogado, método que algunos productores utilizan). La posición horizontal alcanzó el máximo rendimiento, con 48.9 t/ha en promedio, superando ampliamente a la inclinada (36.2 t/ha) y a la vertical (27.8 t/ha). Esta diferencia de 21.1 t/ha entre el horizontal y el vertical no es marginal; es la brecha entre una cosecha excepcional y una mediocre.

El entierro profundo con decapitación logró un rendimiento estimado de 42.5 t/ha (superior al inclinado y al vertical) pero no superó al horizontal. La explicación fisiológica es simple, al enterrar todo el esqueje y cortar el ápice, la planta debe invertir energía extra en hacer emerger los brotes desde mayor profundidad, retrasando su desarrollo inicial. Aunque la decapitación rompe la dominancia apical y activa varias yemas laterales, el costo energético de la emergencia profunda frena el crecimiento temprano.

En cambio, la plantación horizontal logra lo mejor de ambos mundos, entierra la Zona de Oro en condiciones uniformes de suelo (activando múltiples yemas), pero deja el ápice aéreo y varias hojas, que continúan realizando fotosíntesis desde el primer día, impulsando un crecimiento rápido y vigoroso sin necesidad de invertir energía en emerger.

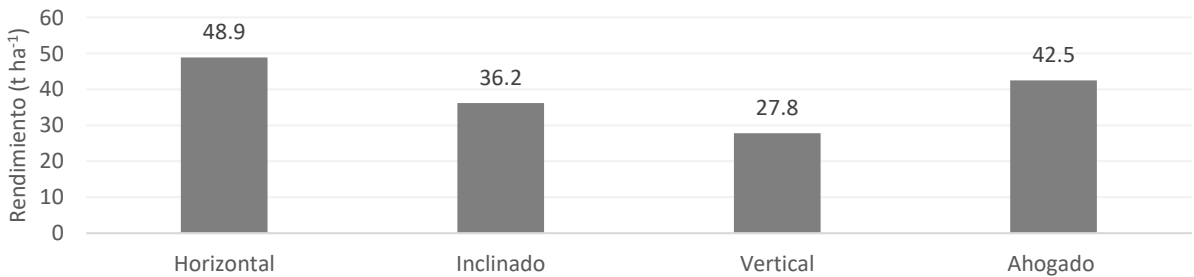


Figura 16.2. Rendimiento del boniato según la posición de plantación del esqueje.



Figura 16.3. Métodos tradicionales de plantación manual de esquejes de boniato. A: Plantación manual directa, productores inclinados, colocando los esquejes con la mano a la profundidad y orientación deseada. Este método permite mayor precisión y mejor compactación del suelo alrededor del esqueje, pero es físicamente demandante, lento y causa fatiga lumbar; B y C: Plantación con guataca (azadón), un operador va delante colocando los esquejes sobre el cantero, mientras otro productor lo sigue tapándolos con la guataca en un solo movimiento. Este método es más rápido y cubre mayor área en menos tiempo, pero la precisión en la profundidad y orientación horizontal del esqueje depende completamente de la habilidad del trabajador, lo que puede resultar en una plantación menos uniforme y una peor compactación del suelo alrededor del esqueje.

LA EXPLICACIÓN FISIOLÓGICA

Posición Vertical

Cuando un esqueje se coloca verticalmente, solo 2-3 nudos quedan enterrados, frente a los 5-7 que se entierran en la siembra horizontal. Ya de entrada, el potencial productivo se reduce a la mitad.

Entre esos pocos nudos enterrados, uno tiene una ventaja decisiva, el más cercano a la superficie. Este nudo recibe mejor oxigenación, temperatura más estable y, sobre todo, es el primero en recibir los fotoasimilados que las hojas producen, porque el flujo de savia desde el follaje hacia las raíces encuentra en él el primer punto de descarga. Los nudos más profundos quedan en un ambiente más compacto y con menos oxígeno, además de recibir los recursos ya parcialmente consumidos por el nudo superior.

Pero el factor clave es hormonal. La yema apical, situada sobre el suelo, es el centro de producción de auxinas. Esta hormona fluye hacia abajo por el tallo y se concentra en los nudos enterrados, pero no de forma equitativa. El nudo superior enterrado (el más cercano a la superficie) recibe la mayor concentración, lo que estimula su capacidad para desarrollar raíces tuberosas. Los nudos inferiores, en cambio, reciben menos auxinas y, por tanto, su potencial para tuberizar se ve reducido.

El resultado, solo el nudo superior enterrado desarrolla raíces tuberosas de calidad. Los nudos inferiores, con menor estímulo hormonal y menos recursos, apenas producen raíces fibrosas o, en el mejor de los casos, raíces tuberosas pequeñas y tardías. De los 2-3 nudos enterrados, apenas uno se convierte en la fuente principal de la cosecha.

Posición Inclinada

La posición inclinada mitiga, pero no resuelve, el problema. El esqueje se coloca con un ángulo que entierra varios nudos (generalmente entre 3-4) pero mantiene el ápice en el aire. En esta configuración, el gradiente de auxinas sigue operando, la yema más cercana a la superficie recibe la mayor concentración hormonal, mientras que las más profundas reciben menos. A esto se suma la ventaja ambiental, la yema superior está en la zona del suelo con mejor oxigenación y temperatura, lo que le permite emitir raíces con más vigor. Las yemas inferiores, aunque no están completamente suprimidas, enraízan con menor fuerza.

Posición Horizontal

Colocar el esqueje horizontalmente es un acto de ingeniería fisiológica. En esta configuración, los 5-7 nudos de la Zona de Oro quedan enterrados a la misma profundidad uniforme, mientras que solo la punta del esqueje (con las hojas más jóvenes) permanece sobre el suelo. Este diseño produce tres efectos decisivos:

- Al no haber una yema dominante en la parte enterrada, la auxina se distribuye de manera equitativa entre todos los nudos. Todos parten en igualdad de condiciones hormonales.
- Todas las yemas enterradas experimentan las mismas condiciones de temperatura, humedad y oxigenación. No hay una más cerca de la superficie que tenga ventaja.
- Al recibir señales equivalentes, todas las yemas viables se activan simultáneamente. Cada nudo produce raíces tuberosas de calidad, dando lugar a 3-5 raíces tuberosas bien formadas a partir de un solo esqueje.

El resultado es un rendimiento máximo de 48.9 t/ha, porque cada nudo aporta su potencial y ninguna yema domina sobre las demás.



Figura 16.4. Contraste en la arquitectura productiva según el método de plantación.

Posición enterrada profunda con decapitación (Ahogado)

Este método, utilizado por algunos productores, consiste en enterrar completamente el esqueje y decapitarlo (cortar el ápice) antes de la plantación. La decapitación elimina la fuente principal de auxinas, rompiendo la dominancia apical y estimulando la activación de todas las yemas laterales. En teoría, es una forma de lograr que varios nudos emitan brotes foliares y tubericen.

Sin embargo, tiene una limitación fisiológica importante, al no quedar ningún ápice aéreo, todas las yemas deben emerger desde la profundidad del suelo, invirtiendo energía extra en elongación antes de llegar a la luz. Este retraso inicial frena el desarrollo temprano y reduce el rendimiento final a 42.5 t/ha, superior al inclinado y al vertical, pero inferior al horizontal.



Figura 16.5. Emergencia de brotes a los 9 días después de la plantación en el método de entierro profundo con decapitación (ahogado).

EL COMPLEMENTO PERFECTO PARA LA SIEMBRA HORIZONTAL

La Ley de la Siembra Horizontal establece que la posición del esqueje es el factor más determinante para activar todas las yemas y maximizar el rendimiento. Pero enseñar la teoría no es suficiente; el productor necesita herramientas que le permitan aplicar esa ley en el campo con precisión y eficiencia. Esa es la razón de ser del INIVITPlant.

¿QUÉ ES EL INIVITPLANT?

Es un implemento manual que revoluciona la tradicional plantación manual de esquejes de boniato. Se trata de una herramienta ergonómica que consiste en una varilla metálica curvada, equipada con un mango cómodo para asegurar un agarre firme. En su extremo inferior incorpora una punta en forma de anilla abierta o "V", diseñada específicamente para sujetar con precisión el esqueje y guiarlo durante la plantación.

Este tipo de herramientas no es nuevo en el mundo. En China, donde la mecanización agrícola ha avanzado significativamente, se utilizan ampliamente plantadores manuales de dos mangos (conocidos como zaimiaoqi o 栽苗器) que realizan en un solo movimiento lo que tradicionalmente requería cinco pasos: abrir el hoyo, colocar el esqueje, ajustar la profundidad, tapar, compactar. El INIVITPlant adapta esta tecnología probada a las condiciones específicas del boniato y del productor cubano.

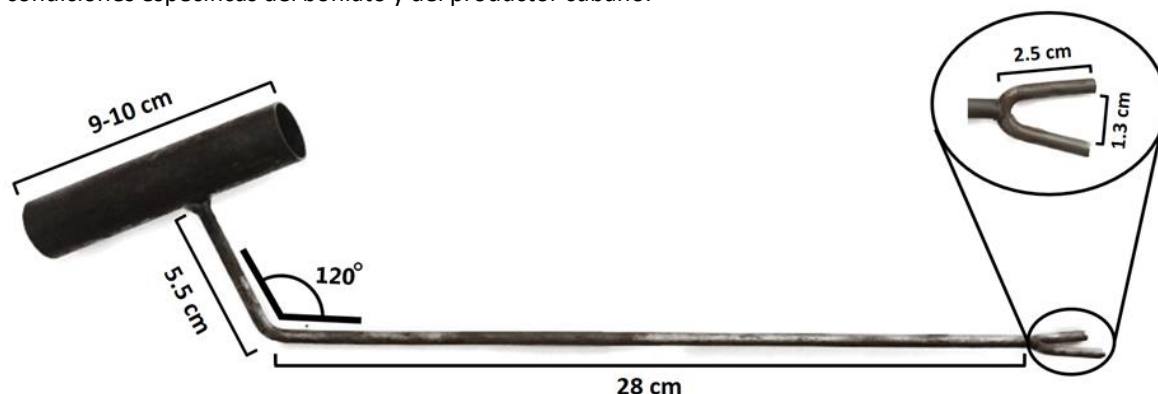


Figura 16.6. INIVITPlant: implemento manual para la plantación horizontal de esquejes de boniato.

¿Cómo Funciona?

La operación es sencilla pero precisa, y representa un cambio radical respecto a la siembra manual tradicional.

- **Paso 1: Preparación.** El productor toma un esqueje con una mano y lo coloca sobre el cantero, en la posición deseada para la siembra horizontal. Con la otra mano sostiene el INIVITPlant por su mango ergonómico.
- **Paso 2: Posicionamiento.** La punta en forma de "V" del implemento se coloca sobre la sección basal del esqueje (la parte que debe quedar enterrada), justo por encima de los nudos que conforman la Zona de Oro.
- **Paso 3: Inserción.** Con un movimiento firme y controlado, se empuja el implemento hacia abajo. La "V" presiona el esqueje contra el suelo y lo introduce en la tierra a la profundidad deseada (10 cm, como establece la Ley 17).
- **Paso 4: Retiro y cierre.** Se retira el implemento con un movimiento suave hacia arriba. El suelo, al no haber sido invertido ni removido en exceso, cierra naturalmente alrededor del esqueje, fijándolo en su lugar sin necesidad de pasos adicionales.

Lo que antes requería cinco movimientos separados se reduce a un solo movimiento fluido, el esqueje se presenta sobre la superficie, la "V" lo toma, lo empuja hacia abajo y lo deja enterrado en su posición exacta, todo en una acción continua.

VENTAJAS Y BENEFICIOS PRINCIPALES

| Beneficio | Descripción |
|------------------------------------|---|
| 1. Siembra uniforme y de calidad | Garantiza que todos los esquejes queden enterrados a la profundidad uniforme de 10 cm y en posición horizontal, optimizando la emergencia y el establecimiento del cultivo. |
| 2. Elimina el estrés de la planta | Evita la manipulación directa del esqueje por parte del agricultor, reduciendo daños mecánicos y el riesgo de transmitir enfermedades. |
| 3. Preserva la humedad del suelo | Su diseño permite la plantación sin invertir el prisma de tierra, evitando la evaporación y conservando la humedad crítica para el desarrollo de la nueva planta. |
| 4. Alta eficiencia y productividad | Agiliza y acelera significativamente el proceso de siembra, permitiendo cubrir mayores áreas en menos tiempo y con menor esfuerzo físico. |
| 5. Humanización del trabajo | El trabajador no necesita agacharse repetidamente. Esto reduce la fatiga lumbar y hace la tarea más cómoda, rápida y menos agotadora. |
| 6. Bajo costo y sencillez | Es una herramienta de fabricación simple, accesible y duradera, ideal para el contexto del agricultor. Fabricada en acero inoxidable, resiste la corrosión y el uso continuo. |

La Ley de la Siembra Horizontal es una ley de precisión. Exige que el esqueje quede a una profundidad uniforme y en posición perfectamente horizontal. Sin una herramienta adecuada, lograr esa precisión en cada esqueje, durante una jornada completa de plantación, es casi imposible. La fatiga, la prisa y la variabilidad humana introducen errores que comprometen el rendimiento.

El INIVITPlant es el puente entre la teoría y la práctica. Es la herramienta que convierte el conocimiento fisiológico en una realidad de campo. No es solo un implemento; es la garantía de que lo que enseñamos en esta ley se va a cumplir en cada surco, en cada esqueje, en cada hectárea sembrada.



Figura 16.7. Comparación de métodos de plantación de esquejes de boniato. Secuencia superior: Método tradicional manual: Se abre un hoyo, se coloca el esqueje manualmente en la posición deseada, se ajusta la profundidad y orientación, se tapa con tierra y se compacta con los pies o manos. Secuencia inferior: Método con INIVITPlant: Se coloca el esqueje sobre el cantero, se posiciona la "V" del implemento sobre la sección basal del esqueje, con un solo movimiento, se empuja hacia abajo enterrando el esqueje en posición horizontal y se retira el implemento.



Figura 16.8. Extensión del INIVITPlant entre productores. Personal del INIVIT demuestra el uso del implemento manual en campo, explicando sus ventajas para lograr una plantación horizontal uniforme, a la profundidad correcta y con mínimo esfuerzo físico. La transferencia de esta tecnología a los agricultores forma parte de las estrategias de innovación local para aumentar la eficiencia y la calidad de la plantación de boniato.

El INIVITPlant no es una herramienta más; es la materialización de la ciencia en el campo. Al garantizar la siembra horizontal a la profundidad justa, elimina la variabilidad humana y asegura que cada esqueje exprese todo su potencial. Es, en esencia, el aliado práctico de la Ley de la Siembra Horizontal.

Como dijo un productor después de probarlo: Jamás vuelvo a sembrar como antes.



LEY 17

DE LA PROFUNDIDAD JUSTA



Sembrar no es solo enterrar, es colocar la vida en el lugar exacto donde el suelo la respira y la plaga la respeta.

INTRODUCCIÓN

Tras definir la posición horizontal del esqueje, surge una pregunta igual de crítica: ¿a qué profundidad debe quedar? No es lo mismo 5 cm que 15 cm. La plantación del boniato enfrenta aquí una decisión que determina el equilibrio entre dos fuerzas opuestas, por un lado, las exigencias fisiológicas de la planta para una tuberización óptima; por otro, la presión del entorno (incluyendo la plaga más temida, el tetuán) que acecha desde la superficie. La Ley de la Profundidad Justa establece que existe un punto preciso donde la planta respira, se alimenta y engrosa sus raíces sin asfixiarse, y donde la plaga encuentra una barrera que no puede cruzar sin costo.

LA PROFUNDIDAD QUE DEFINE EL RENDIMIENTO

El gráfico muestra una verdad inapelable, no hay una relación lineal entre profundidad y rendimiento. La curva tiene un pico definido, y fuera de él, la productividad se desploma.

A los 5 cm, el rendimiento total es aceptable (34 t/ha), pero la afectación por tetuán alcanza el 29.3%. Las raíces están demasiado cerca de la superficie, en la zona donde la plaga actúa sin barreras. Casi un tercio de la cosecha se pierde antes de salir del campo.

A los 10 cm, ocurre lo que llamamos el punto justo, el rendimiento total alcanza su máximo (43 t/ha) y, aunque la afectación por tetuán aún existe (20%), la producción bruta es tan alta que el rendimiento sano (34.4 t/ha) supera ampliamente al de cualquier otra profundidad. Es la combinación ganadora, la planta encuentra el ambiente que necesita para engrosar, y la plaga encuentra una barrera que le cuesta superar.

A los 15-20 cm, el panorama cambia drásticamente. El rendimiento total disminuye a 25.5 y 20 t/ha respectivamente. La afectación por tetuán es la más baja (15.3% y 12.3%), pero ese dato es irrelevante, no hay cosecha que proteger. La planta, asfixiada por la compactación y la falta de oxígeno a mayor profundidad, simplemente no produce.

La lección es clara, más profundo no es más seguro; es menos productivo. Más superficial no es más rápido; es más vulnerable. El punto justo, a 10 cm, es donde la planta respira, la raíz engrosa y la plaga se frena.

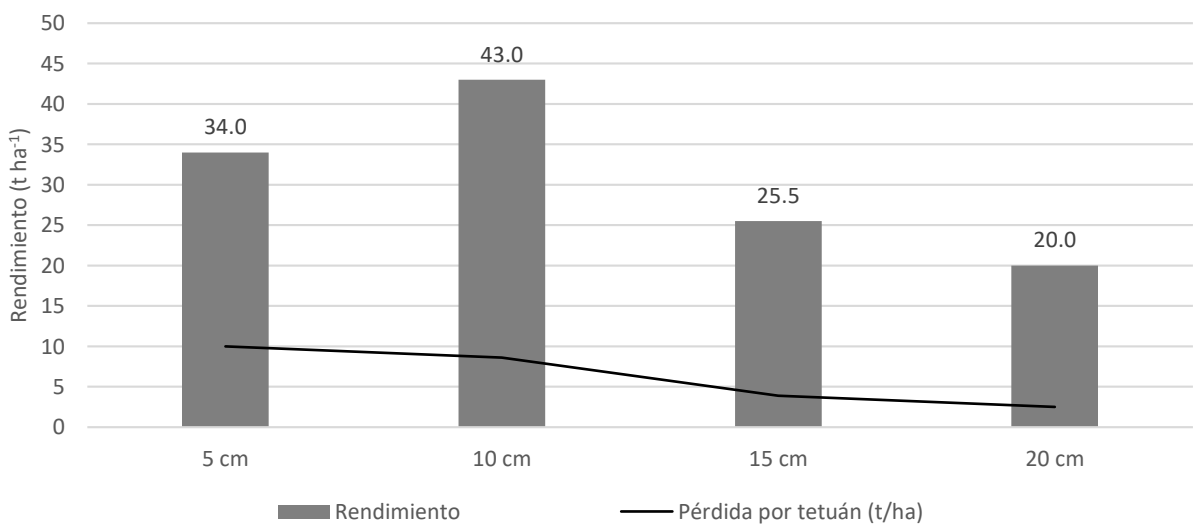


Figura 17.1. Rendimiento total y afectación por tetuán según la profundidad de plantación.



Figura 17.2. Contraste en la calidad de la cosecha según la profundidad de plantación. A: Plantación a 10 cm; B: Plantación 20 cm.

EXPLICACIÓN FISIOLÓGICA

El ambiente que la raíz necesita para engrosar

La raíz tuberosa del boniato no es un órgano cualquiera; es un tejido de almacenamiento que requiere condiciones muy específicas para desarrollarse:

- A 10 cm, el suelo mantiene una porosidad adecuada que permite el intercambio gaseoso necesario para la respiración radical. A mayor profundidad (15-20 cm), el suelo está más compactado, con menos oxígeno, y el metabolismo de la raíz se ralentiza. La planta no puede llenar lo que no puede respirar.
- **En los primeros 5 cm, el suelo se sobrecalienta de día y se enfría de noche.** Esa inestabilidad térmica estresa la raíz. A 10 cm, la temperatura es más estable, favoreciendo una división celular constante y un flujo sostenido de azúcares hacia las raíces.
- El engrosamiento de la raíz no ocurre en el aire; necesita cierta presión del suelo para desencadenar la división celular radial. A 10 cm, la presión es la adecuada, es la señal física que le dice a la célula que debe expandirse en ancho, no en largo. A 15 cm o más, la presión es excesiva; la raíz se deforma o no logra expandirse.

La barrera que frena al tetuán

El tetuán no ataca al azar. La hembra necesita grietas en el suelo para acceder a las raíces tuberosas y depositar sus huevos. Cuando la raíz tuberiza muy cerca de la superficie (5 cm), su engrosamiento empuja el suelo hacia arriba y abre grietas, creando vías directas para que la plaga alcance su objetivo sin esfuerzo. A 10 cm, en cambio, el engrosamiento ocurre a mayor profundidad; la presión sobre la superficie es menor, las grietas no se forman o son menos profundas, y la hembra no encuentra acceso fácil para ovipositar. A 15-20 cm, aunque las grietas brillan por su ausencia, la planta ya no produce raíces tuberosas de calidad que valga la pena proteger.

El equilibrio, entonces, es a 10 cm, la raíz engrosa sin romper la superficie, la plaga no encuentra entrada, y la planta respira en su ambiente óptimo. Es el punto justo donde la biología de la planta y la ecología de la plaga se encuentran en un empate que favorece al cultivo.

En el boniato, la profundidad no es un detalle; es la línea que separa una cosecha récord de una pérdida anunciada.

LEY 18

DEL CAMPO ELEVADO



Cada centímetro que gana el cantero, lo gana la cosecha. Perder altura es perder toneladas antes de plantar.

INTRODUCCIÓN

La preparación del suelo para el boniato culmina con la conformación del cantero o camellón, un paso que muchos subestiman como una simple formalidad topográfica. Sin embargo, los resultados son contundentes, la altura del cantero no es un detalle de forma, sino el parámetro decisivo que define el volumen, la estructura y el clima del hábitat subterráneo donde se formarán las raíces tuberosas.

La Ley del Campo Elevado establece que plantar sobre un cantero alto no es una opción; es la condición para activar el máximo potencial fisiológico de la planta, transformando el suelo compacto en una cámara de crecimiento ideal que maximiza la aireación, el drenaje y el espacio de expansión radical.

La relación entre altura del cantero y rendimiento es una de las más claras y contundentes de toda la fisiología del boniato, cada centímetro de altura cuenta. En el fondo del surco, sin cantero, el rendimiento apenas alcanza 17.2 toneladas por hectárea. A los 10 cm sube a 25.9 t/ha. A los 15 cm alcanza 32.4 t/ha. A los 20 cm se dispara a 42.9 t/ha. Y a los 30 cm llega a 53.4 t/ha, más del triple que en el fondo del surco. El tramo de mayor respuesta está entre 10 y 20 cm, pero los últimos 10 cm (de 20 a 30) aportan 1.05 toneladas por cada centímetro adicional. En total, levantar el cantero a 30 cm significa ganar más de 36 toneladas por hectárea. Es la relación más directa que existe entre un esfuerzo de preparación del suelo y su recompensa en la balanza, por cada palada de tierra que se levanta, el campo devuelve más de una tonelada de boniato.

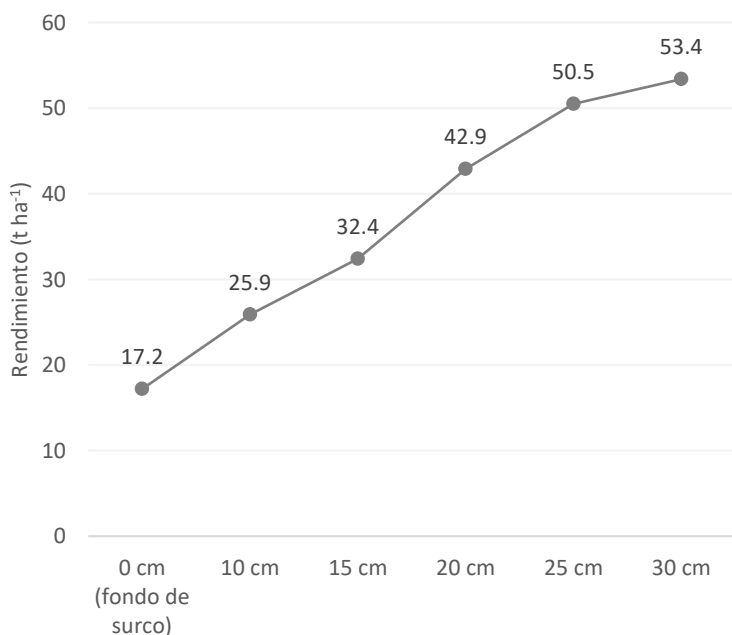


Figura 18.1. Rendimiento del boniato según la altura del cantero (forma semicircular). La curva muestra cómo el rendimiento aumenta progresivamente con la altura.





Figura 18.2. Relación entre la altura del cantero y el rendimiento del boniato.



Figura 18.3. Contraste en la práctica de plantación del boniato según la posición en el cantero. A: Plantación correcta sobre el cantero alto (30 cm), con suelo suelto y mullido, a la profundidad óptima de 10 cm. Esta práctica favorece el drenaje, la aireación radical y el desarrollo de raíces tuberosas de alto calibre; B y C: Plantación incorrecta en el fondo del surco o en la base del cantero, en lugar de hacerlo sobre la parte elevada. Esta mala práctica, aún observada en algunas empresas, provoca mal drenaje, compactación del suelo, asfixia radical y una mayor exposición de las raíces al ataque del tetuán, reduciendo drásticamente el rendimiento.

LA EXPLICACIÓN FÍSICA Y FISIOLÓGICA

Un cantero de 30 cm de altura triplica el volumen de suelo suelto disponible para las raíces en comparación con un surco plano. Esto permite que las raíces se extiendan sin encontrar resistencia, desarrollen un sistema fibroso más extenso y distribuyan los boniatos en un espacio amplio, evitando que compitan entre sí y resultando en raíces más grandes y uniformes.

La altura del cantero también mejora el equilibrio de agua y aire. El drenaje es perfecto, el exceso de agua escurre hacia los surcos sin encharcar la zona radical, previniendo la asfixia de las raíces. Además, el suelo se mantiene más poroso y oxigenado, lo que favorece una respiración eficiente de la raíz, clave para absorber nutrientes y para que los boniatos crezcan.

El cantero elevado se calienta más rápido en la mañana y se enfría mejor que el suelo plano, moderando las temperaturas extremas en la zona donde se forman los boniatos.

En un suelo plano, la compactación genera alta resistencia al crecimiento de las raíces. En un cantero alto, esa resistencia es mucho menor, la raíz no gasta energía empujando la tierra, sino que la dedica por completo a engrosar y llenarse de almidón.

Por último, un cantero alto y bien conformado reduce la formación de grietas en la superficie, actuando como una barrera física que dificulta el acceso del tetuán a los boniatos.



Figura 18.4. Conformación mecanizada de canteros altos para boniato. Implemento agrícola acoplado a tractor utilizado en sistemas de plantación mecanizada para la formación de canteros altos. El equipo cuenta con rodillos o conos cilíndricos que moldean el suelo, creando un camellón de perfil semicircular y dejando una ranura superficial en la parte superior que facilita la siembra horizontal de los esquejes a la profundidad uniforme recomendada (10 cm).

La Ley del Campo Elevado enseña que la primera cosecha del boniato no son las raíces tuberosas, sino el propio suelo transformado en un hábitat de alto rendimiento. Un cantero bajo o plano es una sentencia de limitación fisiológica; un cantero alto es un acto de fe en el potencial genético de la planta, ofreciéndole las condiciones edáficas óptimas para que exprese su máximo poder de producción.

En el boniato, se cosecha lo que el suelo debidamente conformado, permite que se desarrolle. La altura del cantero no es un lujo; es la inversión que más toneladas devuelve por cada centímetro de tierra elevada.

LEY 19

DEL SUELO FRENTE AL CIELO



Cuando vayan a plantar boniato, miren para cualquier lugar, menos para el cielo.

INTRODUCCIÓN

Entre las prácticas tradicionales que rodean la agricultura, pocas son tan persistentes y controvertidas como la siembra y manejo según las fases de la luna. En el cultivo del boniato, esta creencia se materializa en la costumbre arraigada de cortar los esquejes solo en una luna específica, supuestamente para garantizar mejor arraigo y mayores cosechas.

La Ley del Suelo Frente al Cielo surge de una investigación científica decisiva del INIVIT que establece un principio fundamental: los factores determinantes del éxito o fracaso del cultivo del boniato **son exclusivamente terrestres y biológicos**, no astronómicos. Ignorar esta evidencia es desperdiciar atención y recursos en variables ilusorias mientras se descuidan las verdaderamente críticas.

CÓMO SE PUSO A PRUEBA LA CREENCIA

Para someter la creencia popular a un escrutinio científico riguroso, se diseñó un experimento brillante en su simplicidad y contundencia. En lugar de sembrar solo en las cuatro fases lunares típicas una vez, se realizaron siembras diarias, incluyendo fines de semana, durante tres meses consecutivos. Este diseño garantizó que cada fase lunar (Llena, Menguante, Nueva, Creciente) fuera repetida varias veces a lo largo del período, eliminando cualquier posible coincidencia o sesgo estacional.

Los resultados fueron categóricos e invariables:

- Rendimiento: No hubo diferencias estadísticas. Los valores oscilaron entre 37.9 y 39.0 t/ha, una variación mínima atribuible al azar experimental, no a un patrón lunar.
- Afectación por tetuán: Tampoco hubo diferencias. La incidencia de la plaga más dañina varió entre 2.7% y 4.0%, sin correlación con la fase lunar al momento de la siembra.

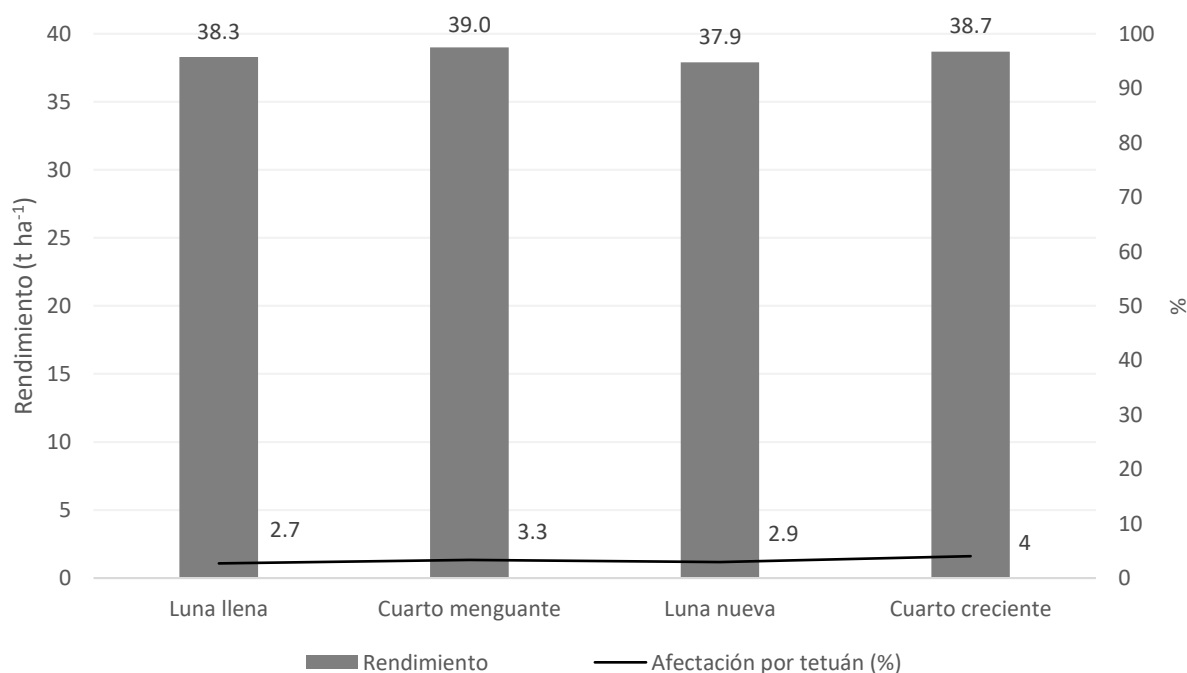


Figura 19.1. Resultados del experimento de plantación según fases lunares. No se observaron diferencias significativas en rendimiento ni en afectación por tetuán entre las cuatro fases de la luna.

POR QUÉ LA LUNA NO INFLUYE EN EL BONIATO

La luna ejerce una influencia física demostrable en la Tierra a través de la gravedad (mareas) y la luminosidad nocturna. Sin embargo, para un cultivo como el boniato, estas fuerzas son insignificantes frente a los factores ambientales y fisiológicos que realmente importan.

La fuerza gravitacional lunar que causa las mareas oceánicas es completamente irrelevante a escala de la savia de una planta o del agua capilar en el suelo de un cantero. La presión de la gravedad terrestre es millones de veces mayor y constante. No existe un mecanismo fisiológico conocido por el cual un cambio minúsculo en la gravedad pueda influir en la división celular del meristemo de una raíz de boniato.

La luminosidad nocturna es fisiológicamente irrelevante. El boniato es una planta de fotosíntesis C3, con metabolismo diurno. Sus procesos críticos de crecimiento, partición de asimilados y tuberización están gobernados por la luz solar intensa (fotoperiodo, intensidad lumínica) y por señales hormonales endógenas, no por los tenues rayos de la luna llena. La cantidad de luz lunar es demasiado baja para activar la fotosíntesis o alterar significativamente los relojes circadianos de la planta.

La Ley del Suelo Frente al Cielo es una ley liberadora. Libera al productor de la carga supersticiosa y del rígido calendario lunar, permitiéndole centrar toda su atención, tiempo y recursos en las prácticas que verdaderamente generan impacto.

La célebre frase del investigador que lideró este experimento en el INIVIT lo resume todo: **"Cuando vayan a plantar boniato, miren para cualquier lugar, menos para el cielo."**

En el sistema de alto rendimiento, no hay lugar para variables no demostradas. Cada decisión debe estar respaldada por la fisiología de la planta y la evidencia agronómica. La excelencia en el boniato se construye con ciencia aplicada a la tierra, no con tradiciones dirigidas al cielo. Esta ley sienta el principio racional sobre el cual se sostienen todas las demás, la confianza en el método científico y el rechazo al dogma infundado.



LEY 20

DEL AGUA JUSTA



*El boniato no absorbe agua por sed, la absorbe por necesidad.
Regar es sincronizar el agua con el latido de la raíz.*

INTRODUCCIÓN

El boniato ha aprendido a sobrevivir en condiciones de sequía, pero para alcanzar el alto rendimiento necesita una relación precisa con el agua. No es que sea exigente; es que la diferencia entre sobrevivir y producir 50 toneladas está en entender cuándo, cuánto y cómo regar. La Ley del Agua Justa establece que el riego no es uniforme a lo largo del ciclo, cada fase exige un manejo distinto.

La planta tiene tres etapas en un mismo ciclo, como se explica en la Ley 2: El Calendario Fisiológico. El agua debe sincronizarse con cada una de ellas.

¿Cuánta agua necesita realmente el boniato?

El boniato requiere entre 750 y 2,000 mm de agua durante su ciclo, dependiendo del clima, el suelo y la variedad. En condiciones de secano, se necesitan al menos 800-850 mm bien distribuidos. Con riego suplementario, se puede optimizar el rendimiento. La evapotranspiración del cultivo (ETc) varía a lo largo del ciclo, con un pico en la fase de crecimiento.

Sin embargo, nuestros estudios han demostrado que con 400 mm bien distribuidos se pueden alcanzar rendimientos comerciales excelentes (30-40 t/ha), especialmente en suelos con buena retención de humedad. El mito de que el boniato necesita 900 mm proviene de condiciones de alta demanda evaporativa y ciclos muy largos. La clave no es la cantidad total, sino la sincronía.

La evapotranspiración del cultivo (ETc) varía a lo largo del ciclo:

| Fase (Ley 2) | Días | Demanda hídrica |
|---------------|--------|---|
| Enraizamiento | 0-30 | Baja (1.5-2.5 mm/día) |
| Crecimiento | 30-90 | Máxima (4-6 mm/día) |
| Acumulación | 90-120 | Alta, pero decreciente (3.5-4.5 mm/día) |

El Agua en Cada Fase

Fase I: Enraizamiento (0-30 días)

En los primeros 30 días, la planta forma su sistema radical fibroso. Un déficit hídrico aquí retrasa el enraizamiento y compromete el número de raíces tuberosas que se formarán más tarde.

Recomendación: Suelo húmedo pero no encharcado.

Fase II: Crecimiento (30-90 días)

Esta es la fase de máxima demanda hídrica. La planta desarrolla su follaje y construye la fábrica fotosintética que llenará las raíces. Si el agua escasea aquí, el rendimiento final se desploma irreversiblemente.

Recomendación: Riego abundante y regular.

Fase III: Acumulación (90-120 días)

La planta redirige todos los recursos hacia el llenado de las raíces. En esta fase, el exceso de agua es tan dañino como la falta. El encharcamiento asfixia las raíces y favorece la pudrición.

Existe una creencia errónea de que suspender el riego bruscamente al final del ciclo hace que la planta produzca más boniatos o que estos sean más grandes. Esto es falso, el número y tamaño de las raíces tuberosas ya se definieron en fases anteriores y no se modifican en esta etapa. Lo que se logra con una reducción gradual del riego (no una suspensión abrupta) es mejorar la calidad, aumentar la materia seca, concentrar azúcares (dulzor), curar la piel y facilitar la cosecha. Un estrés hídrico severo y repentino puede causar rajaduras y pérdida de calidad.

Recomendación: Riegos moderados y decrecientes, evitando tanto el encharcamiento como un estrés extremo. Suspender el riego por completo solo durante los últimos 7-10 días antes de la cosecha.

En el boniato, regar no es humedecer la tierra; es sincronizar la vida con el calendario fisiológico de la planta.

RIEGO EN SURCOS ALTERNOS. EL MÉTODO DEL SECADO PARCIAL DE RAÍCES

Los estudios del INIVIT han explorado técnicas innovadoras para optimizar el uso del agua en el cultivo del boniato sin sacrificar el rendimiento. Una de ellas es el riego en surcos alternos, también conocido como secado parcial de raíces (*Partial Root-Zone Drying, PRD*).

¿En qué consiste? Esta técnica se basa en un principio fisiológico simple pero poderoso, en lugar de regar toda la superficie del suelo de manera uniforme, se riega un surco sí y el siguiente no, alternando en cada evento de riego. Esto significa que la mitad del sistema radicular recibe agua mientras que la otra mitad se expone a un estrés hídrico moderado. En el próximo riego, se invierte el patrón, los surcos que estaban secos se riegan y los que estaban húmedos se dejan secar.

Cuando una porción de las raíces detecta sequía, la planta produce ácido abscísico (ABA) en esas raíces estresadas. Esta hormona viaja por el xilema hasta las hojas y ordena el cierre parcial de los estomas, reduciendo la pérdida de agua por transpiración sin afectar drásticamente la fotosíntesis. Como la otra mitad de las raíces sigue en suelo húmedo, la planta mantiene su crecimiento y producción.

En nuestros ensayos con boniato, aplicamos esta técnica durante la fase de crecimiento activo (Fase II). Los resultados mostraron un ahorro de agua de aproximadamente un 30-40% en comparación con el riego convencional de todos los surcos. Las plantas sometidas a secado parcial de raíces desarrollaron un sistema radical más profundo y vigoroso, y los rendimientos fueron equivalentes o incluso ligeramente superiores a los del grupo testigo.



Figura 20.1. Esquema del riego en surcos alternos (secado parcial de raíces). Las flechas negras indican los surcos que reciben agua en el primer riego; las flechas amarillas indican los surcos que se dejan secar. En el siguiente riego, la alternancia se invierte, los surcos que estaban secos se riegan y los que estaban regados se dejan secar.



LEY 21

DE LA DEFENSA INTEGRAL



Contra el tetuán no hay una solución única, hay un sistema. El que solo fumiga, pierde; el que entiende al enemigo, vence.

INTRODUCCIÓN

El tetuán (*Cylas formicarius*) es la plaga más devastadora del boniato a nivel mundial. En Cuba, antes de 1992, llegó a dañar el 50% de la producción nacional, con pérdidas que alcanzaban hasta el 100% en campos descuidados. Su control se basaba en hasta 12 aplicaciones de insecticidas por campaña, con un consumo anual de 864,000 litros de dimetoato solo en las empresas estatales. El resultado: costos altos, contaminación ambiental y, aun así, pérdidas inaceptables.

La Ley de la Defensa Integral enseña que no hay una solución mágica. El tetuán se combate con un sistema de ocho frentes, donde cada práctica suma y ninguna sobra. El que confía en una sola medida (sea química, biológica o cultural) está condenado a perder.

Conocer al enemigo

El tetuán completa su ciclo en 32-40 días en condiciones cubanas, generando 8-10 generaciones por año. Una hembra puede poner en promedio 300 huevos en su vida. La larva perfora galerías sinuosas en la raíz, relleniéndolas con excremento, y al hacerlo induce en la planta la formación de terpenoides y cumarinas (sustancias defensivas que la raíz produce para protegerse) que le dan un sabor amargo insoportable. Basta un daño mínimo para que el boniato quede inutilizado, pues incluso una pequeña galería desencadena esta reacción química que impregna toda la raíz.



Figura 21.1. Daño causado por el tetuán en raíces de boniato. A: Raíces tuberosas con daño severo por tetuán; B: Adultos de *Cylas formicarius* sobre la superficie de la raíz.

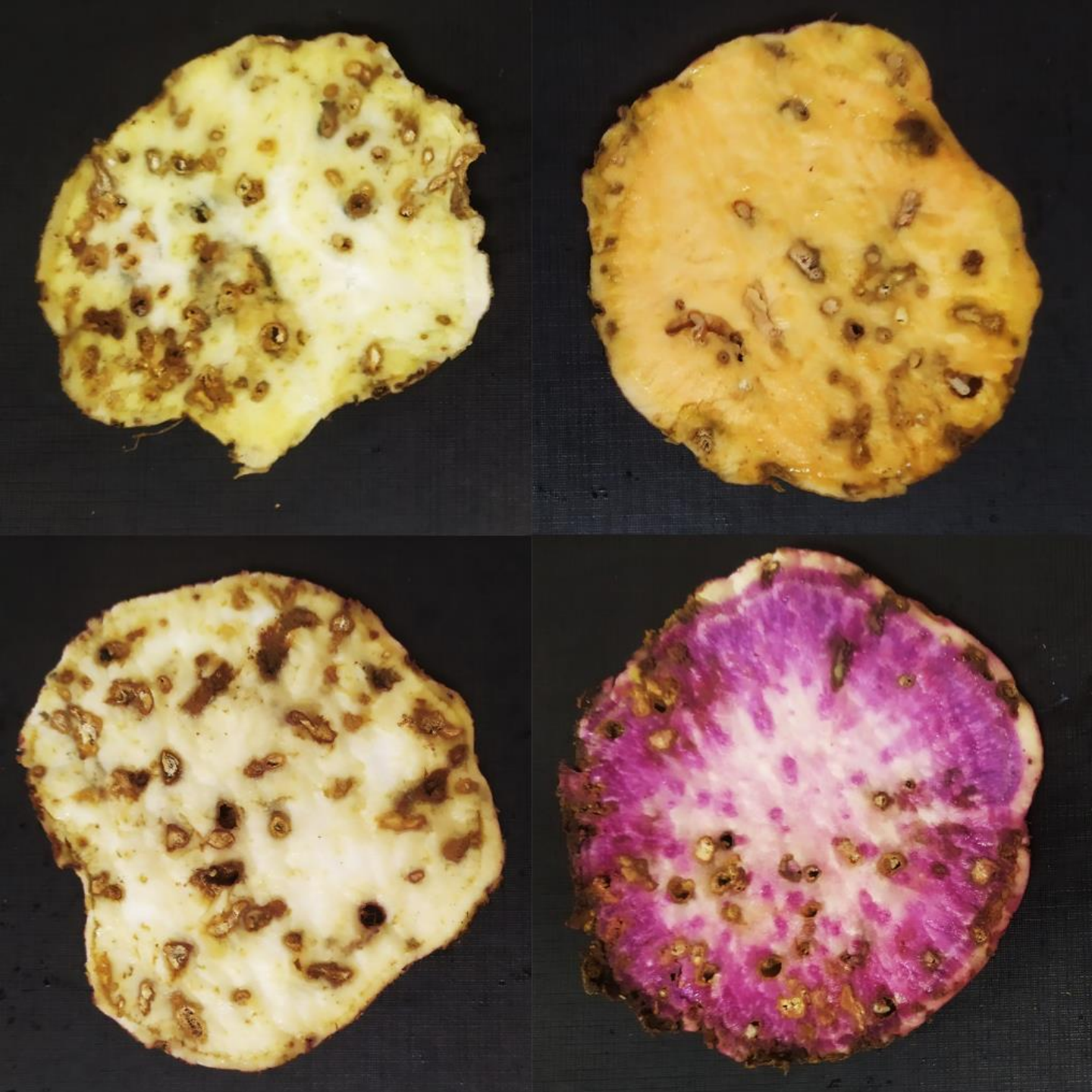


Figura 21.2. Raíces tuberosas de boniato con daño severo por tetuán. Galerías excavadas por las larvas de *Cylas formicarius* en el interior de las raíces. El daño se caracteriza por túneles sinuosos rellenos de excremento (visibles como manchas oscuras) y áreas de necrosis en la pulpa. En respuesta al ataque, la raíz produce compuestos terpénicos como la ipomeamarona, que imparten un sabor amargosísimo e incomedible incluso en niveles muy bajos de infestación. Una sola galería es suficiente para inutilizar comercialmente toda la raíz, ya que el sabor amargo se difunde por el tejido circundante.

Las pérdidas por esta plaga pueden alcanzar entre el 80% y el 100% de la producción en campos sin manejo adecuado.

LA PRIMERA VÍA DE INFESTACIÓN: EL TALLO

Antes de que los boniatos se formen, el tetuán llega al campo y busca refugio en la base de los tallos ("madres"), donde deposita sus huevos. Las larvas perforan el tallo desde allí, dañando el sistema vascular y afectando el flujo de savia. Cuando el ataque es severo, la planta reacciona produciendo tejido cicatricial que engrosa anormalmente el tallo, una señal visible de que la plaga está dentro.

La segunda vía de infestación son las grietas del suelo. Una vez que las raíces se engrosan, empujan la tierra y abren grietas. Por ellas, los adultos acceden directamente a los boniatos para ovipositar. **Esta vía es responsable del 65% del daño total.**



Figura 21.3. Vías de infestación del tetuán. A: Base de tallos sanos (30-40 días), primer sitio de oviposición; B: Tallo dañado (120 días), engrosado por la reacción de la planta al ataque.

El ciclo es corto y la reproducción es explosiva. Si no se interviene temprano, en tres meses la población se multiplica por cientos.

El 65% del daño viene por el suelo

Un estudio pionero del INIVIT cuantificó por primera vez las vías de infestación:

| Vía de acceso | Proporción del daño |
|-------------------------------|---------------------|
| A través de grietas del suelo | 65% |
| A través del tallo | 35% |

El control no puede centrarse solo en el follaje. La batalla se gana o se pierde en la superficie del suelo. Las grietas son autopistas que conectan al insecto con la raíz. Evitarlas es cerrar la puerta principal.

LAS HERRAMIENTAS DEL SISTEMA DE DEFENSA

Herramienta 1: Variedades con escape genético

No existe resistencia absoluta, pero sí genotipos con mecanismos de escape. El 'INIVIT B2-2005' y otros cultivares de tuberización profunda (>8 cm) sufren hasta 3 veces menos daño que cultivares superficiales como el 'CEMSA 78-354'. La precocidad también es clave, los genotipos de ciclo corto (110-120 días) exponen sus raíces a menos generaciones de la plaga.

Herramienta 2: Profundidad de plantación justa

Sembrar a 10 cm (Ley 17) equilibra rendimiento y protección. A 5 cm, las grietas abren la puerta al tetuán; a 15-20 cm, la planta se asfixia y no produce. El punto justo es donde la raíz engrosa sin romper la superficie y el insecto encuentra una barrera física que cuesta superar.

Herramienta 3: Cierre de grietas (labor cultural clave)

Entre los 30-40 días después de la plantación, cuando el follaje aún no ha cerrado el campo, se debe realizar una labor superficial (con cultivador ligero o tracción animal) para desmoronar y rellenar las grietas. Esta práctica, aplicada sistemáticamente, puede reducir el daño hasta en un 47%.

Herramienta 4: Manejo del agua

El riego no solo es producción; es protección. Un suelo con humedad uniforme no forma grietas. En la fase crítica de llenado (80-100 días), mantener la humedad evita que las raíces al agrietarse expongan su superficie al ataque. Campos con riego en período seco tienen 4-5 veces menos daño que los no regados.

Herramienta 5: Cosecha oportuna

Postergar la cosecha es una de las decisiones más riesgosas que puede tomar un productor cuando el tetuán está presente. Nuestros experimentos en el INIVIT cuantificaron el costo de esperar: en un grupo de parcelas evaluadas, **la infestación promedio a los 90 días era de 9.4%, pero al extender el ciclo a 120 días, ese mismo indicador se disparó a 36.1%. En términos prácticos, el daño se cuadruplicó en solo 30 días.**

Herramienta 6: Destrucción de residuos

Después de la cosecha, quedan en el campo hasta 700 kg/ha de restos (raíces pequeñas, deformes, dañadas). Cada kilogramo puede albergar 2,400 larvas. Si no se destruyen, esos residuos son la fuente de infestación para el próximo ciclo.

El cálculo es escalofriante: $700 \text{ kg} \times 2,400 \text{ larvas} = 1,680,000 \text{ larvas}$ por hectárea. De ese total, al menos la mitad serán hembras adultas. Si cada una pone 300 huevos, el potencial de infestación para la siguiente campaña supera los 250 millones de larvas por hectárea. La quema o el enterramiento profundo no son opcionales.



LAS HERRAMIENTAS DEL SISTEMA DE DEFENSA

Herramienta 7: Colindancia, aislamiento

El tetuán adulto tiene una gran capacidad de vuelo. Estudios con machos marcados han registrado desplazamientos de hasta 1,800 metros en condiciones favorables. La migración entre campos es especialmente intensa cuando hay diferencias de edad en el cultivo: un campo joven cercano a uno viejo y cosechado puede recibir hasta 8 veces más adultos que otro sembrado a mayor distancia.

Mantener una distancia mínima de 1,000 metros entre plantaciones nuevas y campos de más de 30 días de edad. Cuando esto no sea posible, establecer barreras físicas (cortinas de maíz o girasol) que dificulten el vuelo de los adultos. Evitar la colindancia entre campos en diferentes estados fenológicos.

Herramienta 8: Selección de esquejes

La hembra prefiere ovipositar en la parte basal del tallo. Nuestros estudios han cuantificado la distribución de los huevos a lo largo del tallo, el 71% de los huevos se localizan en los primeros 10 cm basales, y el 29% restante en los siguientes 30 cm (de 10-40 cm desde la base). Por encima de los 40 cm, los tallos están completamente libres de huevos y larvas. Por esta razón, **los esquejes deben tomarse exclusivamente de la parte apical y pre-apical del tallo** (los primeros 25-30 cm desde la punta), descartando las secciones basales que concentran la casi totalidad de la población de la plaga. Esta práctica, combinada con el tratamiento de los esquejes con *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. o nematodos entomopatógenos, reduce drásticamente la introducción del tetuán en nuevos campos.

Herramienta 9: Control biológico con hongos entomopatógenos

Beauveria bassiana y *Metarhizium anisopliae* (Metschnikoff) Sorokin son hongos entomopatógenos que infectan y matan al tetuán. Sus esporas (conidias) penetran la cutícula del insecto, colonizan su interior y lo destruyen en 3-5 días. La aplicación se realiza en campo a partir de los 30-35 días después de la siembra, con frecuencia semanal hasta que el hongo se establezca. Investigaciones en India demostraron que la aplicación de *B. bassiana* en la zona radical redujo significativamente el daño en raíces, con resultados comparables al uso de feromonas o insecticidas químicos.

Los hongos entomopatógenos pueden combinarse con las trampas de feromona para crear un sistema de auto-infección: los machos atraídos salen contaminados y dispersan el hongo entre la población, incluyendo a las hembras durante el apareamiento.

Herramienta 10: Control biológico con hormigas depredadoras

Pheidole megacephala F. (hormiga leona) y *Tetramorium guineense* F. (hormiga del plátano) son depredadoras naturales del tetuán. Se establecen en campos con sombra y humedad, y pueden reducir la población de adultos al interferir con la oviposición. Una colonia bien establecida es un ejército permanente de defensa.

Cómo colectarlas y trasladarlas: La técnica ha sido validada por el INIVIT. Se localiza un reservorio natural de hormigas (preferiblemente en áreas sombreadas y húmedas, como plantaciones de plátano o bajo árboles) donde las colonias sean abundantes. Se preparan trampas con hojas secas de plátano enrolladas formando un mazo de 20-30 cm de largo. Estas trampas se colocan sobre el suelo del reservorio, preferiblemente después de un riego ligero que incentive la actividad de las hormigas. A los 3-12 días, las hormigas (incluidas las reinas y los huevos) colonizan las trampas. Se trasladan entonces al campo de boniato, ubicándolas cerca de las plantas, entre los 30 y 40 días después de la siembra, cuando el follaje ya proporciona la sombra que las hormigas necesitan para establecerse. Una vez liberadas, colonizan el suelo y se convierten en un control permanente que no requiere de nuevas aplicaciones.

Herramienta 11: Control biológico con nematodos entomopatógenos

La cepa HI-24 de *Heterorhabditis* sp., aislada en Cuba, es altamente patógena sobre larvas y pupas del tetuán. Aplicada al cerrar el campo (35-40 días), con riego previo y en horas de la tarde, puede reducir la infestación de raíces tuberosas a 0%. Su ventaja: busca activamente al insecto dentro de las galerías, donde los químicos no llegan.

HERRAMIENTA 12: LA FEROMONA SEXUAL

La feromona sexual del tetuán es un atrayente poderoso que captura machos, reduciendo la tasa de reproducción. En Cuba, con 16 trampas por hectárea (25 x 25 m) y cápsulas de 0.5 mg de ingrediente activo, se ha logrado reducir el daño en más del 60%. Las trampas se colocan a los 30-35 días después de la plantación, con la cápsula a 10 cm sobre el follaje.

Debajo de la cápsula de feromona se coloca un recipiente con agua y detergente (o jabón líquido) en proporción de 1 g de detergente por litro de agua. Esta solución rompe la tensión superficial, impidiendo que los insectos escapen y provocando su ahogamiento.

En lugar de agua con detergente, el recipiente puede contener una suspensión de esporas de *Beauveria bassiana* o *Metarhizium anisopliae*. Los machos atraídos entran en contacto con el hongo, se contaminan y luego dispersan las esporas en la población, infectando a hembras durante el apareamiento. **Este sistema de auto-infección ha demostrado causar mortalidades de hasta 96.2% en machos y 33% en hembras en campos tratados.**

Para evitar la concentración de daño en un punto y aumentar la captura en un 48%, se recomienda rotar las trampas semanalmente, desplazándolas 4-5 metros en el sentido de las hileras.



Figura 21.4. Trampa de feromona para el control del tetuán.

Cápsula con feromona sexual





LA COMBINACIÓN GANADORA

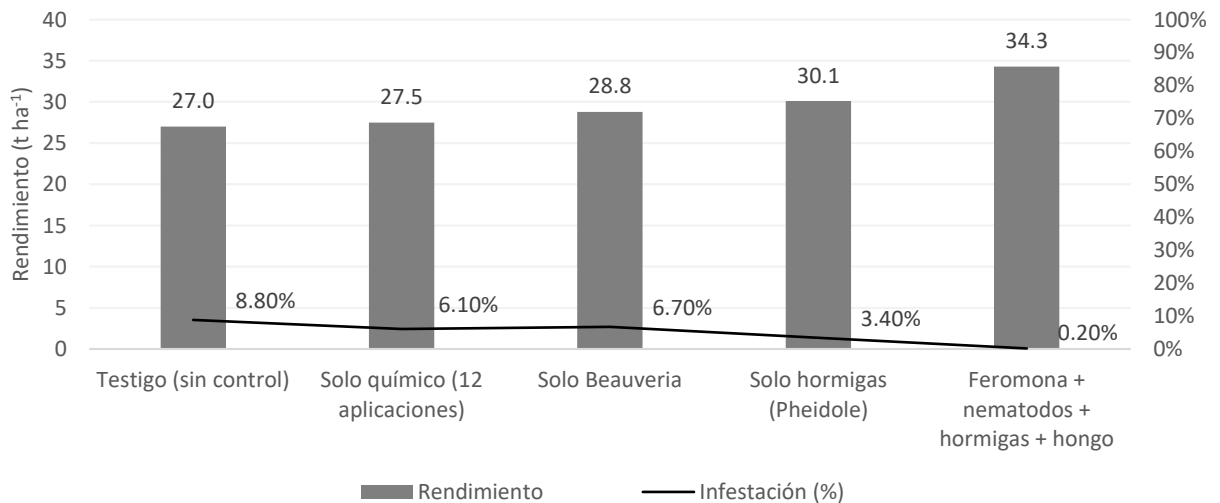


Figura 21.5. Efecto de las estrategias de manejo integrado sobre el rendimiento y la infestación por tetuán.

La Ley de la Defensa Integral enseña que el tetuán no se vence con una aplicación milagrosa, sino con un sistema coherente que comienza antes de la siembra y termina después de la cosecha.

El productor que domina este sistema deja de ser un aplicador de insecticidas y se convierte en un estratega que diseña un ecosistema hostil para la plaga y favorable para su cultivo.

En la guerra contra el tetuán, el que solo fumiga, pierde. El que entiende al enemigo, sus grietas, sus ciclos y sus debilidades, construye un sistema que lo vence sin necesidad de depender de un solo veneno.



LEY 22

DE LA COSECHA OPORTUNA



Cosechar no es arrancar; es saber esperar el momento justo, cuidar cada raíz y guardar lo que con tanto trabajo se construyó.

INTRODUCCIÓN

Después de meses de trabajo, desde la selección del esqueje hasta el manejo del suelo, el riego y el control de plagas, llega el momento decisivo, la cosecha. Es el acto final donde todo el esfuerzo se convierte en producto. Pero también es el momento donde más se pierde si no se hace con ciencia.

La Ley de la Cosecha Oportuna establece que el rendimiento final no es solo lo que se produce en el campo, sino lo que se logra cosechar, curar y almacenar sin pérdidas. Una cosecha mal hecha, en el momento equivocado o con un manejo descuidado, puede echar a perder el trabajo de todo un ciclo.

EL MOMENTO JUSTO

El boniato no tiene un calendario fijo; su madurez se lee en la planta y en la raíz. Cosechar antes es perder toneladas; cosechar después es arriesgar la calidad.

| Indicador | Señal de madurez |
|-------------------------------|--|
| Follaje | Las hojas comienzan a amarillear, los tallos pierden turgencia |
| Días después de la plantación | Variedades precoces: 110-120 días; variedades tardías: >150 días |
| Raíces (escarbando) | La piel está firme, no se pela con el roce; el contenido de materia seca alcanza el 25-30% (como promedio) |

LA COSECHA EN SÍ

Las reglas que siguen son fruto de décadas de experiencia en el INIVIT y de la práctica de los mejores productores.

- 1. El momento justo.** Coseche cuando la afectación por tetuán no supere el 3% de las raíces. Si espera más, el daño se dispara. El follaje debe eliminarse primero, pasando una chapeadora o un tiller de ganchos, y dejar que las guías se sequen por 72 horas como máximo antes de la cosecha. Esto facilita la operación y reduce la humedad en el campo.
- 2. Humedad adecuada.** Cosechar cuando el suelo esté en su punto, húmedo pero no encharcado. Si está muy seco, las raíces se quiebran al arrancarlas; si está muy mojado, se manchan de tierra y son más propensas a pudrirse después. El punto justo se reconoce porque la tierra se desprende con facilidad y las raíces salen limpias.
- 3. Preparación del cantero.** Si es necesario, pase un cultivador por el camellón para reactivarlo y soltar la tierra. Esto mejora la calidad de la cosecha y facilita la extracción de las raíces.
- 4. Extracción de las raíces.** Para arrancar los boniatos, pase un arado de doble vertedera por el cantero, de forma alterna (un surco sí, otro no, y luego los restantes). En áreas donde exista, la cosechadora de papa adaptada al boniato es una excelente opción, pues extrae las raíces con mínimo daño mecánico. También existen cosechadoras específicas para boniato que realizan la misma función. En pequeñas áreas, se puede usar tracción animal con arado simple, o incluso horquillas manuales en suelos sueltos.
- 5. Manipulación cuidadosa.** Una vez extraídas, las raíces deben recogerse a mano con cuidado. No se avientan, no se golpean, no se dejan al sol. Se colocan suavemente en cestos o sacos. El daño mecánico es la principal causa de pérdida en el almacenamiento.
- 6. Clasificación en campo.** Separe de inmediato las raíces dañadas, enfermas o con signos de tetuán. No mezcle las sanas con las afectadas. Un boniato dañado contamina a los sanos en el almacén.
- 7. Tiempo fuera del campo.** Una vez envasada, la cosecha no debe permanecer más de 24 horas en el campo. La exposición al sol y el calor acelera la pérdida de agua y calidad.



Figura 22.1. Métodos e implementos para la cosecha del boniato. A: Cosecha manual cuidadosa en pequeñas áreas; B: Cosecha con tracción animal (arado simple) en áreas medianas; C: Implemento de doble vertedera de tracción mecanizada; D: Cosechadora específica para boniato (excavadora de camellones con sistema de separación tierra-raíz). En todos los casos, la regla es la misma, extraer sin golpear, manipular con suavidad, clasificar en campo y proteger del sol.

EL CURADO

El curado es el proceso más importante y menos conocido para extender la vida del boniato en almacén. No es opcional; es la diferencia entre semanas y meses de conservación. Consiste en un tratamiento postcosecha que cura las heridas superficiales y forma una capa protectora (suberina) sobre la piel, sellando las pequeñas raspaduras y evitando la entrada de patógenos.

Durante 4-7 días, las raíces deben mantenerse a una temperatura de 29-32°C y una humedad relativa del 85-95%, con ventilación mínima para mantener esa alta humedad. Sin este proceso, las raíces pierden agua rápidamente, se arrugan, y las heridas no selladas se infectan con hongos y bacterias, pudriéndose en semanas.



EL ALMACENAMIENTO

Una vez curadas, las raíces pueden almacenarse para consumo diferido o para esperar mejores precios. Pero el almacenamiento tiene sus propias reglas.

La temperatura debe mantenerse entre 12-15°C. Por debajo de 10°C, las raíces sufren daño por frío, la pulpa se oscurece y al cocinarlas tienen sabor amargo. Por encima de 18°C, brotan prematuramente y pierden peso. La humedad relativa debe estar entre 80-90%; menos de 80% las arruga, más de 90% favorece las pudriciones. La ventilación debe ser moderada pero constante, para evitar la acumulación de CO₂ y etileno, que aceleran la maduración.

Métodos tradicionales para pequeños productores. En Cuba, el almacenamiento con control de ventilación, puede conservar las raíces por 3-4 meses si se curaron previamente. También se pueden usar sacos de yute con capas de aserrín de maderas entre las raíces, que reduce la humedad y previene hongos, logrando 2-3 meses de almacenamiento.

Aspectos críticos a vigilar

Durante el almacenamiento, hay que controlar la pérdida de peso (normal entre 20-30% en 2-3 meses; si supera el 40%, la humedad es muy baja). La brotación indica que la temperatura es demasiado alta (>18°C) y reduce el contenido de nutrientes. Las pudriciones deben eliminarse de inmediato, pues un boniato podrido puede contaminar a los sanos.

Lo que no se debe hacer

Cosechar en suelo muy seco es un error, las raíces se vuelven quebradizas y se parten al arrancarlas. Dejar las raíces al sol después de cosechar las deshidrata rápidamente, hace que pierdan peso y daña su piel con la radiación ultravioleta. Lavar antes de almacenar elimina la capa protectora natural y acelera la pudrición; solo se lava si se va a vender en el día. Almacenar sin curar es condenar las raíces a perder peso y pudrirse en semanas. Guardarlas junto a frutos climatéricos acelera su deterioro porque el etileno que emiten esos frutos induce la brotación. Usar contenedores cerrados sin ventilación acumula humedad y favorece las pudriciones.





RAÍCES TUBEROSAS CON PARTES VERDES

Durante la cosecha, es posible encontrar raíces tuberosas que presentan zonas de color verde en su superficie, generalmente cerca de la corona o en áreas que asomaron fuera del suelo. Este fenómeno tiene una explicación fisiológica clara y constituye una señal de alerta sobre deficiencias en el manejo del cultivo.

El color verde en las raíces tuberosas se debe a la formación de clorofila en los tejidos expuestos a la luz solar. Normalmente, las raíces del boniato se desarrollan bajo tierra, en completa oscuridad, y no producen clorofila. Sin embargo, cuando una raíz queda parcialmente expuesta (ya sea por grietas en el suelo, por un cantero bajo o por un crecimiento superficial), los tejidos que reciben luz activan un proceso de diferenciación celular, los amiloplastos (orgánulos que almacenan almidón) se transforman en cloroplastos mediante la síntesis de clorofila. El proceso es irreversible, una vez que la luz penetra en los tejidos y se activa la síntesis de clorofila, el color verde permanece y no desaparece, aunque la raíz vuelva a cubrirse de tierra.

Las causas que favorecen la exposición de las raíces son varias. Los canteros bajos (menos de 20 cm de altura) no proporcionan suficiente profundidad para albergar el desarrollo de las raíces, que terminan creciendo hacia la superficie en lugar de profundizar. Durante la fase de llenado (90-120 días), el engrosamiento de las raíces empuja la tierra hacia arriba; si el suelo está muy seco o compactado, se forman grietas por donde penetra la luz. Las lluvias intensas o un riego mal manejado pueden erosionar el cantero, dejando las raíces superficiales al descubierto. Además, algunos cultivares (como 'CEMSA 78-354') tienen una tuberización naturalmente superficial, lo que los hace más propensos a este problema. Por último, un suelo muy compactado impide que las raíces penetren en profundidad, forzándolas a crecer cerca de la superficie.

A diferencia de lo que ocurre en la papa, donde la exposición a la luz induce la formación de solanina (una toxina que puede causar malestares estomacales), en el boniato el color verde se debe exclusivamente a la clorofila, que es inocua para el consumo humano. Sin embargo, las raíces verdes tienen menor valor comercial, ya que los consumidores las rechazan por asociarlas con inmadurez o mala calidad, y suelen presentar una textura más fibrosa y un sabor ligeramente amargo.

Ante la aparición de raíces verdes, se recomienda revisar la altura del cantero (debe ser de 30 cm, según la Ley 18), controlar las grietas mediante las prácticas de manejo descritas en la Ley 21, asegurar una profundidad de plantación adecuada (10 cm, según la Ley 17), y cosechar a tiempo para evitar que el problema avance.



NEMATODOS AGALLADORES (*Meloidogyne* spp.)

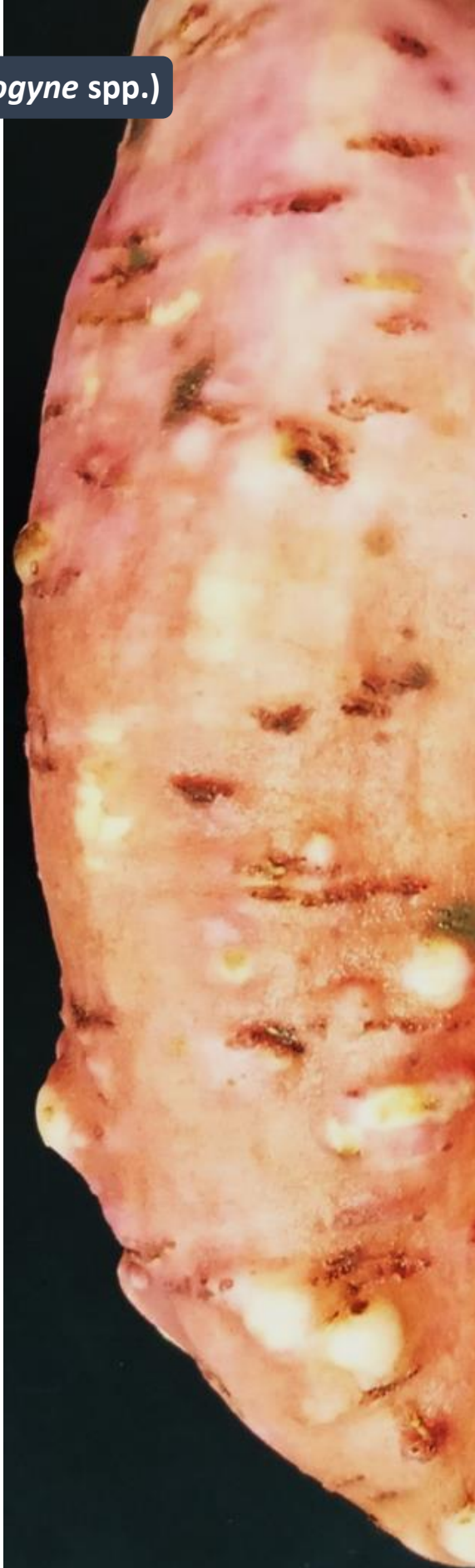
La raíz tuberosa presenta protuberancias o abultamientos irregulares en su superficie, que pueden ser pequeños y numerosos o grandes y aislados. En cortes transversales, se observan áreas de tejido hipertrofiado y, en ocasiones, la presencia de hembras adultas del nematodo en el interior de las agallas. Los nematodos del género *Meloidogyne* (principalmente *M. incognita* (Kofoid & White) Chitwood, *M. enterolobbi* Yang & Eisenback) son endoparásitos sedentarios, los juveniles de segundo estadio penetran las raíces jóvenes y se sitúan en las células del parénquima vascular, induciendo la formación de células gigantes multinucleadas (hipertrofia) y una proliferación desordenada del tejido circundante (hiperplasia), de las cuales se alimentan hasta llegar a formar hembras adultas. Esta reacción de la planta es la que genera los abultamientos característicos.

Los factores predisponentes son suelos arenosos, monocultivo de boniato o de otros cultivos hospedantes (tomate, frijol, pepino, etc.), y la utilización de raíces tuberosas proveniente de campos infestados.

Además de la deformación estética, las agallas afectan el sistema vascular, reduciendo el flujo de agua y nutrientes hacia la raíz. En infestaciones severas, la planta puede presentar enanismo, marchitez en horas cálidas de día y una drástica reducción del rendimiento. Las raíces muy agalladas pierden valor comercial, especialmente para el mercado fresco, aunque pueden destinarse a procesamiento industrial.

Manejo y prevención

- Monitoreo de poblaciones antes y durante el ciclo del cultivo, mediante el muestreo aleatorio estratificado, aplicación, además, del método del bioensayo a muestras de suelo recolectadas.
- Rotación de cultivos con plantas no hospedantes o barbechos, durante al menos 2-3 años.
- Uso de cultivares resistentes.
- Solarización del suelo en áreas muy infestadas (cubrir el suelo con plástico transparente durante 4-6 semanas en épocas de alta radiación).
- Aplicación de materia orgánica en áreas a plantar.
- Aplicación de agentes de control biológico como los hongos (*Pochonia chlamydosporia* var. *catenulata* [Kamyschko ex G.L. Barron & Onions] Zare & W. Gams, *Paecilomyces lilacinus* [Thom] Samson). Producto comercial Hebernem® a base de la bacteria *Tsukamurella paurometabola* (Steinhaus) Collins.
- Uso de Hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), mediante el producto comercial Ecomic®, en combinación con biocarbones enriquecidos, como estrategia de biofertilización y manejo de poblaciones de nematodos agalleros.
- Evitar el uso de raíces tuberosas de campos infestados para prevenir la diseminación del nematodo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Belehu, T., Hammes, P.S., & Robbertse, P.J. (2004). The origin and structure of adventitious roots in sweet potato (*Ipomoea batatas*). *Australian Journal of Botany*, 52(4), 551-558.
- Castellón, M.C., Morales, A., & Maza, N. (1993). Evaluación de feromona sexual para el control de *Cylas formicarius* en Cuba. *Revista de Protección Vegetal*, 8(2), 115-120.
- Chalfant, R.B., Jansson, R.K., Seal, D.R., & Schalk, J.M. (1990). Ecology and management of sweet potato insects. *Annual Review of Entomology*, 35, 157-180.
- Cisneros, F., & Alcázar, J. (Eds.). (2001). Manejo Integrado del Gorgojo del Camote o Tetuán del Boniato, *Cylas formicarius* (Fab.), en Cuba. Centro Internacional de la Papa (CIP, Lima, Perú. 138 pp.
- Jansson, R.K., & Raman, K.V. (1991). Sweet potato pest management: a global overview. En R. K. Jansson & K. V. Raman (Eds.), *Sweet Potato Pest Management: A Global Perspective* (pp. 1-12). Westview Press.
- Jarret, R.L. (1991). Cultivo de tejidos de camote. En W. M. Roca & L. A. Mroginski (Eds.), *Cultivo de Tejidos en la Agricultura. Fundamentos y Aplicaciones* (pp. 421-446). CIAT.
- Kays, S.J. (1985). The physiology of yield in the sweet potato. En J. C. Bouwkamp (Ed.), *Sweet Potato Products: A Natural Resource for the Tropics* (pp. 79-132). CRC Press.
- López, J. (1995). Embriogénesis somática en el cultivo del boniato (*Ipomoea batatas* (L.), Lam.) [Tesis de maestría, Instituto de Biotecnología de las Plantas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas]. 43 pp.
- Ma, J., Aloni, R., Villordon, A., LaBonte, D., Kfir, Y., Zemach, H., & Firon, N. (2015). Adventitious root primordia formation and development in stem nodes of 'Georgia Jet' sweetpotato, *Ipomoea batatas*. *American Journal of Botany*, 102(7), 1040-1049.
- Morales, A. (1995). Estudio del daño de *Cylas formicarius* (F.) en el cultivo del boniato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.). INIVIT, Villa Clara, Cuba. 22 pp.
- Morales, A., Maza, N., & Castellón, M.C. (1996). Eficiencia de trampas de feromona en el control del tetuán del boniato. *Revista de Protección Vegetal*, 11(2), 95-100.
- Morales, A., & Maza, N. (2001). Aspectos generales sobre el cultivo de camote (Boniato) en Cuba. En F. Cisneros & J. Alcázar (Eds.), *Manejo Integrado del Gorgojo del Camote o Tetuán del Boniato, Cylas formicarius* (Fab.), en Cuba (pp. 3-9). Centro Internacional de la Papa (CIP).
- Morales, A., Rodríguez, D., Rodríguez, R., Rodríguez, Y., Trujillo, N., Jiménez, A., Molina, O. (2023). Floral biology and phenology of sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.) in Cuba. Bases for genetic improvement. *African Journal of Agricultural Research*, 19(11), 1043-1055.
- Morales, A., Pastrana, I., Rodríguez, D., Portal, O., Beovides, Y., Rodríguez, Y., Jiménez, A., León, Y., Ventura, V. (2024). Inheritance of the Flesh Color and Shape of the Tuberous Root of Sweet Potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.). *Horticulturae*, 10(10):1032.
- Morales, A., Ma, P., Jia, Z., Rodríguez, D., Vargas, I.J.P., Ventura, V., Efraín González, J., Portal, O., Diaz, F., Parrado Alvarez, O. (2025). Evolution of sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.) breeding in Cuba. *Plants*, 14(13), 1911.
- Morales, A., Ma, P., ZhaoDong, J., Rodríguez, D., Pastrana-Vargas, I., González, R., Molina, O., Jiménez, A., Rodríguez, Y., Morales, L., Beovides, Y., Portal, O., Xiaofeng, B. (2025). Decoding phenotypic signatures of *Cylas formicarius* Fab. resistance in a global sweetpotato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.) germplasm collection. *Frontiers in Plant Science*, 16:1625810.
- Morales, A., Pastrana-Vargas, I., Rodríguez, D., ZhaoDong, J., Ma, P., Xiaofeng, B. (2025). Book Chapter: Sweet Potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.) Breeding: From Reproductive Biology to Variety Development. *Root Vegetables-Scientific Research and Practical Application*. 29 pp.
- Talekar, N.S. (1991). Integrated pest management of sweet potato weevil. En R. K. Jansson & K. V. Raman (Eds.), *Sweet Potato Pest Management: A Global Perspective* (pp. 241-258). Westview Press.
- Togari, Y. (1950). A study of tuberous root formation in sweet potato. *Bulletin of the National Agricultural Experimental Station (Japan)*, 68, 1-96.
- Villordon, A.Q., LaBonte, D. R., Firon, N., & Carey, E. (2013). Variation in nitrogen rate and local availability alter root architecture attributes at the onset of storage root initiation in 'Beauregard' sweetpotato. *HortScience*, 48(7), 808-815.
- Villordon, A.Q., Ginzberg, I., & Firon, N. (2014). Root architecture and root and tuber crop productivity. *Trends in Plant Science*, 19(7), 419-425.
- Yan, W., Hu, M., Li, K., Wang, J., & Zhang, W. (2022). Design and Experiment of Horizontal Transplanter for Sweet Potato Seedlings. *Agriculture*, 12(5), 675.

Más de 50 años de investigación del INIVIT sintetizados en 22 leyes científicas. Una guía práctica para productores, técnicos y estudiantes que busca transformar el conocimiento en rendimiento tangible.

ISBN: 978-959-295-015-3

