Selección temprana en *Hevea brasiliensis*: vigor, estabilidad y resiliencia climática en el trópico húmedo

Elías Ortiz-Cervantes[1*] J. Jesús Loyola[2]

[1] Campo Experimental El Palmar, Centro de Investigación Regional Golfo Centro (CIRGOC), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Km. 18 Carr. Tezonapa-El Palmar. 95080, Tezonapa, Veracruz, México.
[2] Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carr. México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México, México.

Artículo recibido el 29 de abril del 2026 aceptado el 12 de mayo del 2026

Early testing in Hevea brasiliensis: vigor, stability and climatic resilience in the humid tropics.

Abstract

Conventional genetic improvement of *Hevea brasiliensis* faces a critical operational challenge due to extremely prolonged selection cycles, which can extend from 25 to 30 years before a definitive commercial evaluation is possible. Given this, the validation of early-stage trials becomes a strategic imperative to optimize the efficiency and profitability of breeding programs in the humid tropics. This research aimed to evaluate the vegetative vigor, productive efficiency, and phenotypic stability of five rubber clones (IAN 710, IAN 873, IRCA 41, IRCA 19, and IRCA 111) under the agro-ecological conditions of Tezonapa, Veracruz.
Over an intensive 48-month monitoring period, variables for diameter growth (DBH), height (ALT), and dry rubber yield (RS) were quantified. The robustness of the statistical analysis was ensured using Linear Mixed Models via the REML/BLUP procedure, integrating high-resolution climatic variables obtained through the ClimateNA v7.60 platform, which allowed for the accurate modeling of the genotype-by-environment (G×E) interaction.
Results showed highly significant differences ($P < 0.0001$), among the evaluated materials, confirming extensive genetic variability. Clones from the Brazilian series stood out for their notable structural precocity; specifically, the IAN 873 clone recorded the highest mean diameter increment (2.24 mm/month), projecting a reduction of up to 12 months in the juvenile phase to reach the commercial tapping threshold compared to the IRCA 111 clone. Through the application of the Finlay-Wilkinson stability model, it was determined that the IRCA 41 clone possesses specific adaptability to optimal environments ($\beta = 1.226$), achieving the highest yield per series (21.31 g) despite exhibiting intermediate vegetative vigor.
Analysis of climatic interactions revealed that water deficit (DEFH), and maximum temperatures (TMAX), act as the main negative environmental modulators, significantly impacting the turgidity and productivity of the clones ($r = -0.186^{***}$). Likewise, the analysis of productive hierarchy, using the Spearman coefficient, showed an increasing consolidation trend as the physiological maturity of the trees increased, reaching a correlation of $\rho = 0.679^{***}$ between the third and fourth year of evaluation. It is concluded that the IAN 873 clone manifests the greatest resilience and phenotypic stability against water stress ($R^2 = 0.751$), while IRCA 41 is positioned as the material with the highest productive potential under favorable conditions. These findings validate that a monitoring window of 36 to 48 months constitutes a statistically reliable parameter for the selection of outstanding genotypes, allowing for a substantial acceleration in the evaluation cycles of elite germplasm in the Mexican humid tropics.

Key words: edaphoclimatic conditions, survival, dasometric variables, nutrients *Hevea brasiliensis*, early selection, phenotypic stability, genotype-by-environment interaction, genetic improvement, precocity.

Resumen

*Autor de correspondencia
Email: ortiz.elias@inifap.gob.mx
ISSN 2594-0384 (Electrónica)

El mejoramiento genético convencional de *Hevea brasiliensis* enfrenta un desafío operativo crítico debido a los ciclos de selección extremadamente prolongados, que pueden extenderse de 25 a 30 años antes de permitir una evaluación comercial definitiva. Ante esta problemática, la validación de pruebas tempranas se vuelve un imperativo estratégico para optimizar la eficiencia y la rentabilidad de los programas de mejoramiento en el trópico húmedo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el vigor vegetativo, la eficiencia productiva y la estabilidad fenotípica de cinco clones de hule (IAN 710, IAN 873, IRCA 41, IRCA 19 e IRCA 111) bajo condiciones agroecológicas de Tezonapa, Veracruz.

A lo largo de un periodo de monitoreo intensivo de 48 meses, se cuantificaron variables de crecimiento diamétrico (DAP), altura (ALT) y rendimiento de caucho seco (RS). La robustez del análisis estadístico se garantizó mediante el uso de modelos lineales mixtos bajo el procedimiento REML/BLUP, integrando variables climáticas de alta resolución obtenidas a través de la plataforma ClimateNA v7.60, lo que permitió modelar con precisión la interacción genotipo-ambiente (GxE).

Los resultados evidenciaron diferencias altamente significativas ($P < 0.0001$) entre los materiales evaluados, confirmando una amplia variabilidad genética. Los clones de la serie brasileña destacaron por su notable precocidad estructural; específicamente, el clon IAN 873 registró el mayor incremento diamétrico medio (2.24 mm/mes), proyectando una reducción de hasta 12 meses en la fase juvenil para alcanzar el umbral de pica comercial en comparación con el clon IRCA 111. Mediante la aplicación del modelo de estabilidad de Finlay-Wilkinson, se determinó que el clon IRCA 41 presenta una adaptabilidad específica a ambientes óptimos ($\beta = 1.226$), logrando el rendimiento más alto por serie (21.31 g), aun cuando exhibe un vigor vegetativo intermedio.

El análisis de las interacciones climáticas reveló que el déficit hídrico (DEFH), y las temperaturas máximas (TMAX), actúan como los principales moduladores ambientales negativos, impactando significativamente la turgencia y la productividad de los clones ($r = -0.186^{***}$). Asimismo, el análisis de la jerarquía productiva, mediante el coeficiente de Spearman, mostró una tendencia de consolidación creciente conforme aumentó la madurez fisiológica de los árboles, alcanzando una correlación de $\rho = 0.679^{***}$ entre el tercer y cuarto año de evaluación. Se concluye que el clon IAN 873 manifiesta la mayor resiliencia y estabilidad fenotípica frente al estrés hídrico ($R^2 = 0.751$), mientras que el IRCA 41 se posiciona como el material con mayor potencial productivo bajo condiciones favorables. Estos hallazgos validan que un periodo de monitoreo de 36 a 48 meses constituye un parámetro estadísticamente confiable para la selección de genotipos sobresalientes, permitiendo una aceleración sustancial en los ciclos de evaluación de germoplasma élite en el trópico húmedo mexicano.

Palabras clave: Hevea brasiliensis, selección temprana, estabilidad fenotípica, interacción genotipo-ambiente, mejoramiento genético, precocidad.

Introducción

El caucho natural (*Hevea brasiliensis* [Willd. ex A. Juss.] Müll. Arg.), constituye una materia prima estratégica a nivel global, esencial para la manufactura de más de 50,000 productos industriales (Priyadarshan, 2011). La demanda actual exige un incremento sustancial en la productividad por unidad de área; no obstante, el mejoramiento genético de esta especie enfrenta desafíos críticos derivados de su biología perenne, dado que los ciclos de selección convencionales pueden extenderse entre 25 y 30 años antes de la liberación comercial de un clon (Priyadarshan, 2017). En este contexto, la implementación de pruebas tempranas surge como una herramienta indispensable para identificar genotipos sobresalientes en etapas juveniles, permitiendo reducir significativamente los periodos de evaluación (Kalpani *et al*., 2020; Chandrasekhar *et al*., 2007).

Esta estrategia se fundamenta en la existencia de correlaciones genéticas positivas entre los caracteres evaluados en fases inmaduras y el rendimiento en la etapa adulta, premisa ampliamente documentada en diversos programas de mejoramiento (Gonçalves *et al*., 2005a, 2005b). Tradicionalmente, la selección se ha basado en pruebas de rendimiento a corto plazo; sin embargo, este enfoque debe integrarse con el análisis dinámico del desarrollo ontogénico. Estudios contemporáneos confirman que caracteres como el incremento del perímetro del tallo y el espesor de corteza poseen una heredabilidad moderada a alta, asegurando que la selección precoz genere un progreso genético predecible y eficiente (Peres Silva *et al*., 2014; Suwanchana *et al*., 2020;

Gouvêa *et al*., 2013b). Asimismo, la eficiencia productiva depende de la maduración temprana del sistema laticífero, factor que puede monitorearse mediante parámetros bioquímicos y fisiológicos desde la fase de vivero (Madigasekara *et al*., 2025).
Complementariamente, la eficacia de la selección precoz no depende exclusivamente del rendimiento absoluto, sino de la homeostasis fisiológica frente a la interacción genotipo-ambiente (G × A). La estabilidad de los caracteres productivos es un componente crítico, tal como lo han señalado diversos estudios sobre la estabilidad clonal de la producción de látex y la susceptibilidad al secamiento (Omokhafe y Alika, 2003; Omokhafe, 2004). En regiones con marcada estacionalidad, los materiales genéticos pueden exhibir una eficiencia sobresaliente bajo condiciones óptimas, pero carecer de resiliencia ante eventos de estrés hídrico o térmico (Ajith *et al*., 2022; Jacob *et al*., 2021). Por ello, el empleo de modelos lineales mixtos (REML/BLUP), es fundamental para desglosar la varianza genética de la ambiental, permitiendo una predicción más precisa de los valores genéticos (Gouvêa *et al*., 2013). La validación local de series clonales representa, por tanto, el vínculo necesario entre la investigación básica y la recomendación técnica fundamentada para la heveicultura moderna.
Bajo estas premisas, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficacia de las pruebas tempranas como criterio de selección mediante el seguimiento multianual de genotipos de las series IAN e IRCA. Se buscó determinar el vigor vegetativo y la estabilidad productiva de dichos clones en respuesta a la variabilidad climática estacional, a fin de identificar materiales con un balance óptimo entre potencial de rendimiento y resiliencia ambiental que sustente el uso de las pruebas tempranas como herramientas de predicción robusta en el trópico húmedo mexicano.

Materiales y métodos

Área de estudio y caracterización ambiental
La investigación se realizó en el Campo Experimental El Palmar del INIFAP, ubicado en Tezonapa, Veracruz, México (18°32’ N, 96°46’ O; 180 msnm). La región presenta un clima cálido húmedo (Am), con una precipitación media anual de 2,800 mm y una temperatura media de 25 °C. Los suelos predominantes son Acrisoles (FAO/WRB), de naturaleza ácida y textura franco-arcillosa, característicos de las zonas productoras de caucho en el trópico húmedo mexicano.
Para asegurar la precisión del análisis, se efectuó una caracterización ambiental detallada mediante el software ClimateNA v7.60 (Wang et al., 2016). Se extrajeron variables mensuales de temperatura (máxima, mínima y media), precipitación (PPT), radiación (RAD) e índice térmico (DD5). Se puso especial énfasis en el déficit hídrico mensual (DEFH), calculado como balance hídrico acumulado, para cuantificar el impacto del estrés hídrico estacional sobre la fisiología de los clones, factor ampliamente documentado como limitante en la expresión del potencial genético (Priyadarshan y Clément-Demange, 2004).

Material biológico y manejo experimental
Se evaluaron cinco clones de Hevea brasiliensis seleccionados por su potencial genético: IAN 710 e IAN 873 (origen brasileño), e IRCA 41, IRCA 19 e IRCA 111 (origen africano/francés, introducidos mediante convenio INIFAP-CIRAD). Las plantas se produjeron en bolsas de polietileno (20 x 40 cm) e injertadas sobre patrones de seis meses de edad. El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental consistió en 20 árboles, con un marco de plantación de 3 x 3 m (densidad de 1,111 árboles ha^{-1}). El manejo agronómico incluyó el control sistemático de malezas, podas de formación y un programa de fertilización semestral, ajustado a los requerimientos nutricionales específicos para el desarrollo de la especie en la región (Ortiz, 2017).

Variables de respuesta y dinámica ontogénica
El seguimiento fenológico y productivo se realizó durante 48 meses, segmentados en etapas anuales (P1 a P4), para facilitar el análisis de estabilidad temporal, siguiendo los protocolos propuestos para la selección temprana de genotipos (Gonçalves *et al*., 2005a). Las variables evaluadas fueron:

- Vigor vegetativo: Se midió mensualmente el diámetro a la altura del pecho (DAP), a 1.30 m y la altura total (ALT). Con estos datos, se calcularon las tasas de incremento anual (I-DAP e I-ALT), como indicadores de precocidad genotípica, técnica validada en diversos estudios de selección precoz (Suwanchana *et al*., 2020).
- Rendimiento de caucho seco**:** Se determinó mediante la prueba Hamaker-Morris-Mann (H-M-M), modificada (Lopes *et al*., 1999). Se empleó un sistema de pica en semi-espiral descendente (S/2), a una altura de 60 cm del suelo, con una frecuencia de día alterno (d/2). El látex recolectado cada cinco picas (serie), por árbol fue coagulado y deshidratado a 70 °C

hasta peso constante para determinar el rendimiento por serie (RS, g) y, mediante el acumulado de las series mensuales, se obtuvo el rendimiento mensual (REN, g).

Análisis estadístico y modelos de estabilidad

El análisis de los datos se realizó en SAS® v9.4 mediante un enfoque de dos fases que garantiza la precisión de los estimadores genéticos:

- Fase 1: Modelos Lineales Mixtos: Para evaluar el vigor y rendimiento, se utilizó el procedimiento PROC MIXED mediante máxima verosimilitud restringida (REML). Los clones y los periodos se definieron como efectos fijos, mientras que los bloques e individuos dentro de bloques se trataron como efectos aleatorios. La autocorrelación temporal de los datos longitudinales se modeló con una estructura de simetría compuesta (DDFM=BETWITHIN), enfoque ampliamente utilizado para maximizar la eficiencia en la estimación de parámetros genéticos (Bombonato *et al*., 2015; Gouvêa *et al*., 2013a). La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey-Kramer ($\alpha = 0.05$).
- Fase 2: Estabilidad y alometría: Se aplicó el modelo de Finlay y Wilkinson (1963), para estimar la respuesta genotípica (β) y la predecibilidad (R^2). Asimismo, se evaluó la eficiencia alométrica mediante regresión lineal (RS vs. DAP), para analizar la partición de carbono hacia la síntesis de látex. Finalmente, se calcularon coeficientes de correlación de Pearson (r) y Spearman (ρ), para validar la asociación entre las variables biológicas y los factores ambientales, complementando los criterios de selección para estabilidad productiva (Gonçalves *et al*., 2011).

Resultados

Vigor estructural y precocidad vegetativa

El análisis de varianza (Tabla 1), reveló diferencias altamente significativas ($P < 0.001$), para la tasa de incremento diamétrico (I-DAP) y altura (I-ALT), entre los genotipos evaluados. El clon IAN 873 presentó la mayor tasa de incremento diamétrico, con una media de 2.244 mm mes^{-1}, posicionándose significativamente por encima de los materiales de la serie IRCA. En términos de proyección temporal, los datos indican que el IAN 873 reduce la fase juvenil entre 10 y 12 meses en comparación con el clon IRCA 111. Como se observa en la figura 1, las trayectorias de crecimiento muestran una divergencia clara desde el inicio del ciclo, consolidando al IAN 873 como el genotipo con mayor dinamismo estructural.

Dinámica de rendimiento y eficiencia biofísica

La evaluación productiva mostró una divergencia clara entre el vigor vegetativo y el rendimiento de caucho seco (Tabla 1). Aunque el IAN 873 lideró el vigor estructural, el clon IRCA 41 presentó el rendimiento más alto, con un promedio de 39.18 g mes^{-1} ($P < 0.0001$). Esta diferencia evidencia una especialización funcional distinta: mientras los clones IAN privilegiaron la biomasa leñosa, los clones IRCA, particularmente el IRCA 41, maximizaron la producción de látex por unidad de tiempo.

Análisis de correlaciones

La matriz de correlación (Tabla 2), indicó una asociación positiva significativa entre el DAP y el rendimiento acumulado ($r = 0.657^{***}$). Por el contrario, se detectó una correlación negativa entre el incremento en altura (I-ALT) y el rendimiento

Tabla 1. Dinámica de crecimiento, desarrollo estructural y eficiencia productiva en cinco clones de *H. brasiliensis*.

	Vigor (Incrementos)		Desarrollo Final		Rendimiento Mensual	
Clon	I-DAP (mm/mes) [1]	I-ALT (m/mes) [2]	DAP_F (cm)[3]	ALT_F (m)[4]	REN (g/mes) [5]	R_GAS (g/serie) [6]
IRCA 41	1.982^{b}	0.237^{b}	10.32^{b}	11.54^{bc}	39.18^{a}	21.31^{a}
IAN 873	2.244^{a}	0.252^{a}	11.94^{a}	12.41^{a}	34.55^{b}	18.66^{b}
IAN 710	2.155^{a}	0.233^{b}	11.49^{a}	11.65^{b}	29.48^{c}	15.77^{c}
IRCA 19	1.928^{bc}	0.222^{c}	10.18^{b}	10.84^{c}	26.23^{d}	13.84^{d}
IRCA 111	1.833^{c}	0.224^{c}	9.61^{b}	11.07^{bc}	24.60^{d}	13.64^{d}
n	18,609	16,953	399	400	6,410	6,403
Valor *F*	27.60^{***}	13.96^{***}	24.85^{***}	15.00^{***}	61.95^{***}	53.84^{***}
Varianza (σ^2)	3.81	0.035	301.16	1.95	750.00	258.41

Medias con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$). Asteriscos (***) indican $P < 0.001$. Errores estándar (EE): [1]0.032, [2]0.003, [3]0.19, [4]0.15, [5]0.77, [6]0.45.

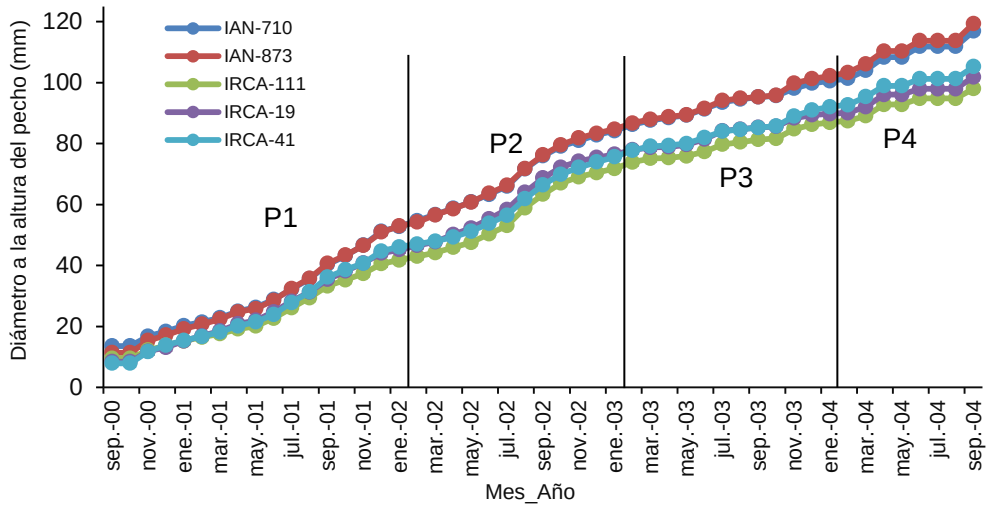


Figura 1. Trayectorias de crecimiento diamétrico acumulado (DAP, mm) en cinco genotipos de *Hevea brasiliensis* durante 48 meses de evaluación en Tezonapa, Veracruz. Los puntos representan la media mensual y las barras verticales indican el error estándar (EE). Las fases P1 a P4 delimitan las etapas ontogénicas del desarrollo juvenil.

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson (r), entre variables climáticas, crecimiento vegetativo y componentes del rendimiento en *H. brasiliensis*.

Variable de Respuesta	DEFH (mm)	TMAX (°C)	PTME (mm)	DAP (cm)	ALT (m)	I-DAP
REN (g/mes)	-0.116***	0.132***	0.231***	0.584***	0.466***	-0.165***
R_GAS (g/serie)	-0.186***	0.113***	0.322***	0.657***	0.604***	-0.105***
I-DAP (mm/mes)	-0.194***	0.042***	0.151***	-0.035***	-0.070***	-
I-ALT (m/mes)	-0.103***	0.116***	0.133*	-0.086***	-0.043***	0.156***

DAP: diámetro; ALT: altura; I: incrementos; REN: rendimiento mensual promedio por mes; R_GAS: rendimiento mensual promedio por serie por árbol. DEFH: déficit hídrico; TMAX: temperatura máxima; PTME: precipitación. Significancia: *** P < 0.001; * P < 0.05; ns: no significativo.

(r = -0.105***). Respecto a las variables ambientales, el déficit hídrico (DEFH), presentó una correlación negativa y significativa con la productividad (r = -0.186***), estableciéndose como el modulador ambiental con mayor impacto negativo sobre la turgencia y el flujo de látex. Esta relación entre las variables climáticas y la eficiencia productiva se visualiza en la figura 2, donde el estrés hídrico limita la respuesta productiva de los genotipos más sensibles.

Estabilidad y eficiencia biológica (β)

El modelo de Finlay-Wilkinson clasificó a los genotipos según su respuesta ambiental (β). El clon IRCA 41 obtuvo un coeficiente β = 1.226, indicando una alta sensibilidad y maximización productiva en condiciones óptimas. El clon IAN 873 mostró un comportamiento más estable (β = 1.118, R^2 = 0.751), manteniendo un desempeño consistente ante la variabilidad del entorno. En contraste, el clon IRCA 111 presentó una respuesta negativa ante el estrés hídrico y térmico (β = -0.060***, β2 = -6.956***), denotando una alta vulnerabilidad ambiental (Tabla 3). La figura 3 permite observar la dispersión de los genotipos bajo el modelo de regresión conjunta, confirmando la posición superior del IRCA 41 frente a la estabilidad mostrada por el IAN 873.

Validación de la selección temprana

El análisis de la interacción Genotipo x Periodo (F = 7.80***), mostró una variabilidad inicial alta en el rendimiento. No obstante, el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), indicó una estabilización del ranking de genotipos a partir del tercer año (ρ = 0.679***; Tabla 4), confirmando que la jerarquía productiva de los clones se consolida tras los 36 meses de evaluación. Dicha estabilización y el comportamiento del ranking a través del tiempo se presentan en la figura 4, la cual corrobora que la selección temprana a los 36 meses es un predictor confiable del potencial productivo

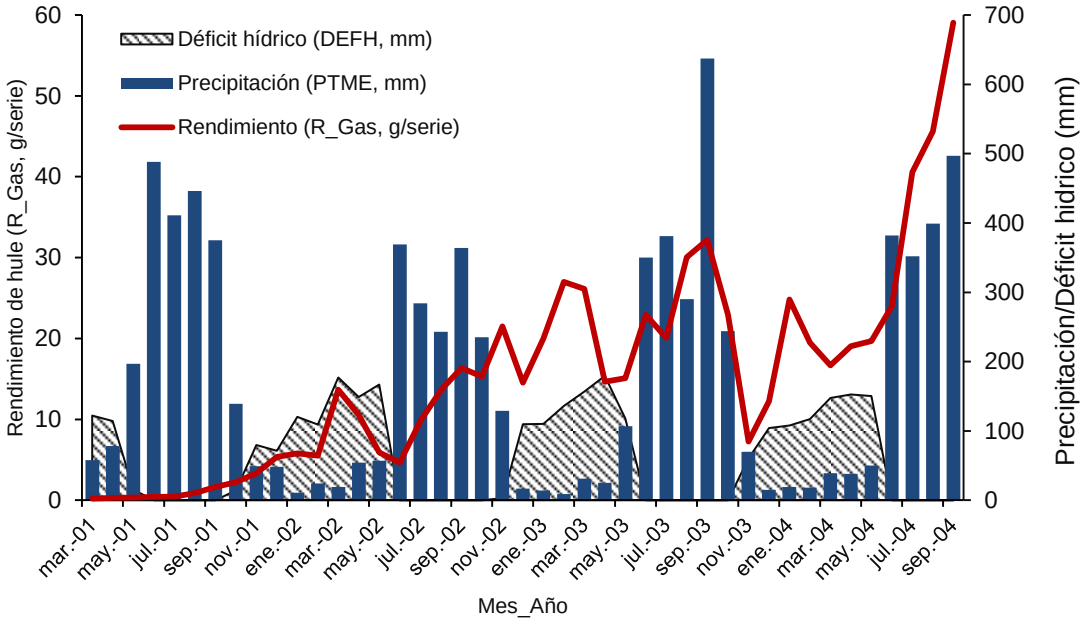


Figura 2. Relación funcional entre la variabilidad climática estacional (precipitación y déficit hídrico, mm) y la eficiencia productiva (R_GAS, g serie^{-1}), en cinco clones de *H. brasiliensis*. Las áreas sombreadas indican periodos de estrés hídrico estacional (DEFH > 0).

Tabla 3. Parámetros de estabilidad (Finlay-Wilkinson) y coeficientes de sensibilidad ambiental para el rendimiento de caucho en cinco clones de *H. brasiliensis*.

Clon	Estabilidad (F-W)		Sensibilidad ambiental (Betas)			
	Coef. β	R^2	DEFH (β_1)	TMAX (β_2)	EVPR (β_3)	Caracterización
IRCA 41	1.226	0.599	0.000 (ref)	0.000 (ref)	0.000 (ref)	Especialista Élite
IAN 873	1.118	0.751	-0.004^{ns}	-3.665*	0.329**	Homeostasis
IAN 710	0.889	0.691	-0.014^{ns}	-4.230**	0.354**	Intermedio
IRCA 111	0.921	0.560	-0.060***	-6.956***	0.505***	Vulnerable
IRCA 19	0.859	0.606	-0.091***	-3.589*	0.279*	Sensible al estrés
Valor F (ANOVA)	37.57*	-	61.77*	35.29*	7.85*	Interacción GxA*

β > 1.0: Adaptabilidad específica a ambientes favorables; β≈1.0: Adaptabilidad general; β < 1.0: Adaptabilidad específica a ambientes desfavorables (bajo dinamismo). Valores negativos indican susceptibilidad ante el déficit hídrico (DEFH) y temperatura máxima (TMAX). EVPR: evaporación. Significancia: *** P < 0.001; ** P < 0.01; * P < 0.05; ns: no significativo.

final.

Discusión

Plasticidad fenotípica y compensación metabólica

Los resultados confirman que el vigor vegetativo temprano es un predictor sólido de la adaptabilidad al sitio. La superioridad del IAN 873 en I-DAP corrobora la alta heredabilidad del crecimiento diamétrico reportada por Gonçalves *et al*. (2005a), validando la viabilidad de la selección precoz mediante el seguimiento de tasas de incremento. La divergencia observada entre el crecimiento (IAN 873) y la productividad (IRCA 41), sustenta la hipótesis de un *trade-off* o compensación funcional: una canalización preferencial de carbono, ya sea hacia biomasa leñosa o hacia la biosíntesis de polímeros (látex), tal como lo ha señalado Priyadarshan (2011). Esta eficiencia biofísica del IRCA 41 lo posiciona como un material de élite para esquemas de pica intensiva, reforzando la importancia de los modelos de selección simultánea propuestos por Gouvêa *et al*. (2013b).

Respuesta al estrés hídrico y estabilidad clonal

La correlación negativa observada entre el déficit hídrico (DEFH) y la producción corrobora los hallazgos de Ajith *et al*. (2022), y Jacob *et al*.

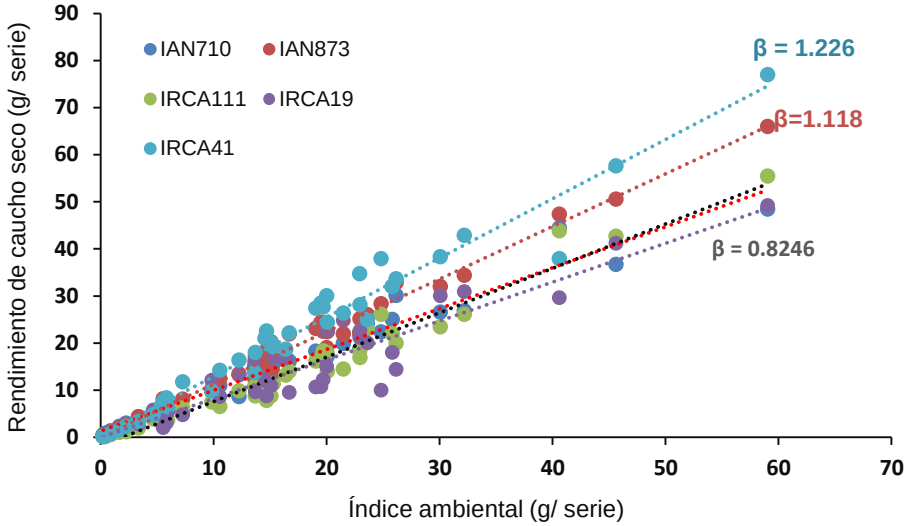


Figura 3. Modelo de regresión conjunta de Finlay-Wilkinson para la estabilidad productiva de cinco genotipos de *Hevea brasiliensis*. La pendiente (β), representa la adaptabilidad al ambiente y el coeficiente de determinación (R^2), la predecibilidad fenotípica. El eje horizontal (Índice ambiental), corresponde al rendimiento promedio mensual de todos los clones.

Tabla 4. Evolución del rendimiento (g/ mes^{-1}), estabilidad del ranking y efectos fijos del modelo mixto para cinco clones de *H. brasiliensis* en cuatro periodos (P1-P4).

Clon	P1 (Año 1)	P2 (Año 2)	P3 (Año 3)	P4 (Año 4)	ρ (P vs P4)
IRCA 41	3.05^{b}	15.18^{a}	28.03^{a}	41.46^{a}	0.291^{***} (P1 vs P4)
IAN 873	3.31^{b}	13.15^{c}	23.46^{a}	37.83^{ab}	
IRCA 111	1.48^{b}	8.99^{d}	16.16^{c}	31.70^{bc}	0.335^{***} (P2 vs P4)
IAN 710	3.39^{b}	12.87^{c}	18.88^{b}	30.34^{c}	
IRCA 19	1.81^{b}	12.77^{c}	16.65^{c}	25.36^{d}	0.679^{***} (P3 vs P4)
EE (promedio)	1.40	1.27	1.27	1.28	
Valor F (ANOVA)	Clon: 13.46^{***}	Periodo: 677.72^{***}	Interacción: 7.80^{***}		

Medias de mínimos cuadrados (LS-Means). Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$). ρ de Spearman: Coeficientes de correlación de rangos respecto al año final. Efectos fijos del ANOVA (F): Clon (13.46^{***}), Periodo (677.72^{***}), Interacción (7.80^{***}). Significancia: *** $P < 0.001$.

(2021). La sensibilidad de la turgencia laticífera al potencial hídrico es un factor limitante crítico en el trópico húmedo; bajo estrés, la viscosidad del látex aumenta, lo que incrementa la tasa de obturación del panel de pica. La estabilidad clonal, por tanto, no es solo un valor estadístico, sino una propiedad fisiológica intrínseca; autores como Omokhafe y Alika (2003), y Omokhafe (2004), han señalado que la susceptibilidad al secamiento es una variable determinante para la estabilidad de la producción de látex. El comportamiento "Especialista Élite" del IRCA 41 versus la homeostasis ambiental del IAN 873 subraya la necesidad de diversificar las recomendaciones técnicas: el IAN 873 reduce el riesgo en regiones con marcada estacionalidad, mientras que el IRCA 41 es superior en ambientes controlados o con menor estrés hídrico.

Implicaciones para el mejoramiento genético

El hallazgo central de este estudio es la validación del umbral de selección a los 36 meses. El "ruido" fisiológico observado en la etapa P1, derivado de la dependencia del vigor del sitio, disminuye drásticamente a medida que el sistema laticífero madura. La consolidación del ranking productivo ($\rho = 0.679^{***}$), coincide con lo planteado por Chandrasekhar *et al*. (2007), respecto a la criticidad del tercer año de pica. Se concluye que la integración de modelos lineales mixtos (REML/BLUP), en el monitoreo multianual permite

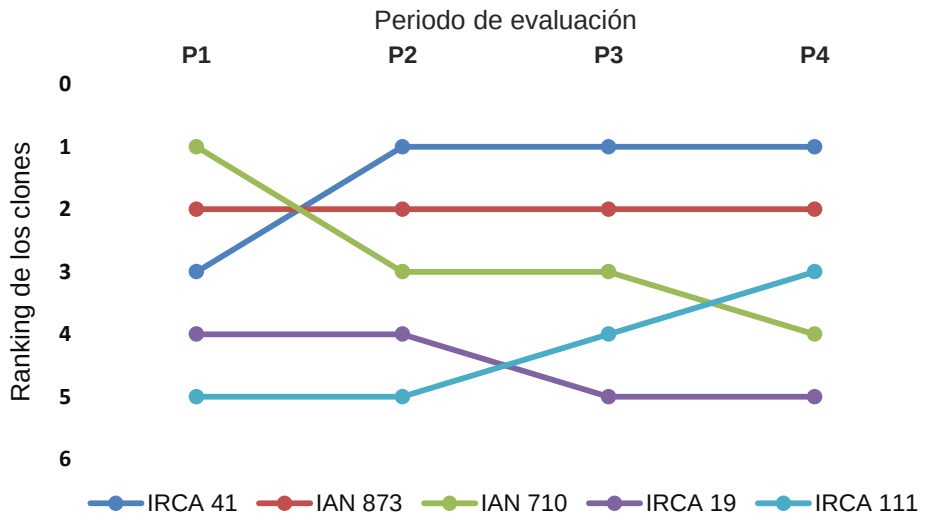


Figura 4. Evolución de la estabilidad jerárquica (Ranking), de la producción de caucho seco en cinco genotipos de *H. brasiliensis*. Se observa la consolidación del clon IRCA 41 en la primera posición a partir de los 36 meses de pica (P3).

reducir sustancialmente los ciclos de mejoramiento, proporcionando una herramienta robusta y estadísticamente confiable para la selección de genotipos en condiciones agroecológicas del trópico húmedo mexicano (Gouvêa *et al*., 2013a).

Conclusiones

Esta investigación demuestra que el origen genético es el determinante principal de la precocidad estructural en *Hevea brasiliensis*; genotipos como IAN 873 e IAN 710 permiten reducir el periodo improductivo hasta en 12 meses, acelerando significativamente la viabilidad económica de la plantación.

Se identificó una divergencia metabólica fundamental: mientras los materiales de la serie brasileña priorizan el vigor vegetativo, el clon IRCA 41 canaliza los asimilados preferencialmente hacia la biosíntesis de látex, consolidándose como el ideotipo de alta eficiencia productiva bajo condiciones óptimas. Esta capacidad está supeditada a la resiliencia ambiental, donde el déficit hídrico actúa como el modulador más crítico; ante este factor, la homeostasis observada en el IAN 873 lo posiciona como un material robusto frente a la estacionalidad climática.

Finalmente, la validación estadística de la jerarquía productiva a partir del tercer año (36-48 meses), constituye un hito metodológico para la región. Este hallazgo permite optimizar los programas de mejoramiento al reducir drásticamente los ciclos de evaluación, pasando de protocolos tradicionales de 15 años a esquemas de selección precoz altamente confiables y escalables para el trópico húmedo.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Se agradece el apoyo técnico del personal del Campo Experimental El Palmar y la colaboración académica de la Universidad Autónoma Chapingo en el marco del programa de estancia sabática del primer autor.

Referencias

Ajith, S.V., Nair, N.N., Sathik, M.B.M., Meenakumari, T. 2022. "Breeding for low-temperature stress tolerance in *Hevea brasiliensis*: screening of newly developed clones using latex biochemical parameters". *Journal of Rubber Research*, 24(1): 63–76, ISSN: 2510-1498, DOI: 10.1007/s42464-021-00143-2.

Bombonato, T., Silva, P.H.S., Pisaroglo de Carvalho, M., Gouvêa, L.R.L., Verardi, C.K., Gonçalves, P.S. 2015. "Rubber tree ortet-ramet genetic correlation and early selection efficiency to reduce rubber tree breeding cycle". *Industrial Crops and Products*, 77: 855–860, DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.09.020.

Chandrasekhar, T.R., Marattukalam, J.G., Mercykutty, V.C., Priyadarshan, P.M. 2007. "Age of yield stabilization and its implications for optimising selection and shortening breeding cycle in rubber (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.)". *Euphytica*, 156(1-2): 67–75, DOI: 10.1007/s10681-006-9352-8.

Finlay, K.W., Wilkinson, G.N. 1963. "The analysis of adaptation in a plant-breeding programme". *Australian Journal of*

Agricultural Research, 14(6): 742–754, DOI: 10.1071/AR9630742.

Gonçalves, P. de S., Bortoletto, N., Cardinal, Á.B.B., Gouvêa, L.R.L., Costa, R.B., Moraes, M.L.T. 2005. "Age-age correlation for early selection of rubber tree genotypes in São Paulo State, Brazil". *Genetics and Molecular Biology*, 28(4): 758–764, DOI: 10.1590/S1415-47572005000500018.

Gonçalves, P. de S., Moraes, M.L.T., Bortoletto, N., Costa, R.B., Gonçalves, E.C.P. 2005. "Genetic variation in growth traits and yield of rubber trees (*Hevea brasiliensis*) growing in the Brazilian state of São Paulo". *Genetics and Molecular Biology*, 28(4): 765–772, DOI: 10.1590/S1415-47572005000500019.

Gonçalves, P. de S., Scaloppi Júnior, E.J., Martins, M.A., Moreno, R.M.B., Branco, R.B.F., Gonçalves, E.C.P. 2011. "Assessment of growth and yield performance of rubber tree clones of the IAC 500 series". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(12): 1643–1649, DOI: 10.1590/S0100-204X2011001200009.

Gouvêa, L.R.L., Silva, G.A.P., Verardi, C.K., Oliveira, A.L.B., Gonçalves, P.S. 2013a. "Rubber tree early selection for yield stability in time and among locations". *Euphytica*, 189(3): 343–350, DOI: 10.1007/s10681-013-0874-6.

Gouvêa, L.R.L., Silva, G.A.P., Verardi, C.K., Oliveira, A.L.B., Gonçalves, P.S. 2013b. "Simultaneous selection of rubber yield and girth growth in young rubber trees". *Industrial Crops and Products*, 50: 39–43, DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.06.040.

IUSS Working Group WRB., 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106, Rome: FAO.

Jacob, J., Gitz, V., Gohet, E., *et al*., 2022. "Natural rubber contributions to adaptation to climate change". In: *XV World Forestry Congress*, 2–6 de mayo, Seúl, Corea del Sur. *(Nota: En congresos suele aceptarse et al. si el comité es muy extenso)*.

Kalpani, K.L.M., Withange, S.P., Palihakkara, I.R. 2020. "Selection of superior genotypes at early stage of the rubber (*Hevea brasiliensis*) breeding cycle". *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 7(4): 146–154, DOI: 10.31033/ijrasb.7.4.17.

Lopes, U.V., Marques, J.R.B., Monteiro, W.R. 1999. "Estimates of genetic parameters in rubber tree (*Hevea* spp). 1. General combining ability in juvenile seedlings". *Agrotrópica*, 11(3): 163–168.

Madigasekara, M.M.S.K., Withanage, S.P., Liyanage, K.K., Dharmarathne, T.T.D., Meegahakumbura, M.K. 2025. "Precise selection of superior *Hevea* genotypes from 2014 hand-pollinated progeny". *Tropical Agricultural Research & Extension*, 28(2), DOI: 10.4038/tare.v28i2.5779.

Omokhafe, K.O., Alika, J.E. 2003. "Clonal stability of latex yield in eleven clones of *Hevea brasiliensis* (Muell. Arg.)". *Genetics and Molecular Biology*, 26(3): 313–317, DOI: 10.1590/S1415-47572003000300016.

Omokhafe, K.O. 2004. "Clonal stability of tree dryness in *Hevea brasiliensis* Muell. Arg.". *Genetics and Molecular Biology*, 27(2): 242–244, DOI: 10.1590/S1415-47572004000200019.

Ortiz, E.C. 2017. "Establecimiento y manejo de plantaciones de hule". In: Zamora-Martínez, M. C., Sánchez C., R., Zamora M., B. P., & Nieto de Pascual P., Ma. C. del C. (comps.), *Paquete Tecnológico para el Cultivo del Hule*, México: Cenid-Comef, INIFAP, pp. 11–45.

Peres Silva, G.A., Gezan, S.A., Pisaroglo de Carvalho, M., Gouvêa, L.R.L., Verardi, C.K., Bombonato de Oliveira, A.L., Gonçalves, P.S. 2014. "Genetic parameters in a rubber tree population: heritabilities, genotype-by-environment interactions and multi-trait correlations". *Tree Genetics & Genomes*, 10(6): 1601–1614, DOI: 10.1007/s11295-014-0766-5.

Peres Silva, G.A., Gouvêa, L.R.L., Verardi, C.K., Bombonato de Oliveira, A.L., Gonçalves, P.S. 2014. "Annual growth increment and stability of rubber yield in the tapping phase in rubber tree clones: Implications for early selection". *Industrial Crops and Products*, 52: 801–808, DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.12.010.

Peres Silva, G.A., Gouvêa, L.R.L., Verardi, C.K., Resende, M.D.V., Scaloppi-Junior, E.J., Gonçalves, P.S. 2013. "Genetic parameters and correlation in early measurement cycles in rubber trees". *Euphytica*, 189: 343–350, DOI: 10.1007/s10681-012-0751-8.

Priyadarshan, P.M. 2011. *Biology of Hevea Rubber*. Wallingford, UK: CABI, 350 p.

Priyadarshan, P.M. 2017. "Refinements to *Hevea* rubber breeding". *Tree Genetics & Genomes*, 13(1): 1–17, DOI: 10.1007/s11295-017-1101-8.

Priyadarshan, P.M., Clément-Demange, A. 2004. "Breeding *Hevea* rubber: Formal and molecular genetics". In: Hall, J. C., Dunlap, J. C., & Friedmann, T. (eds.), *Advances in Genetics*, vol. 52, Elsevier, pp. 51–115, DOI: 10.1016/S0065-2660(04)52003-8.

SAS Institute., 2014. *SAS/STAT® 13.1 User's Guide*. Cary, N.C., USA: SAS Institute Inc., Available: http://support.sas.com/documentation/onlinedoc/stat/index.html.

Suwanchana, S., Phumichai, C., Jenweerawat, S., Koonawootrittriron, S., Phumichai, T., Teerawatnasuk, K. 2020. "Estimation of genetic parameters for rubber yield and girth growth in a synthetic population". *Agriculture and Natural Resources*, 54(6): 603–608, DOI: 10.34044/j.anres.2020.54.6.05.

Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D.L., Carroll, C. 2016. "Locally downscaled and spatially customizable climate data for historical and future periods for North America". *PLOS ONE*, 11(6): e0156720, DOI: 10.1371/journal.pone.0156720.