



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO

**Generación de curvas de crecimiento y sobrevivencia de mazorcas de cacao
(*Theobroma cacao* L) de cuatro clones, para mejorar la estimación de cosecha en
finca en la zona húmeda de Costa Rica**

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y la Escuela de Posgrado
como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE
en Agroforestería y Agricultura Sostenible

Angie Rosalía Villatoro Canales

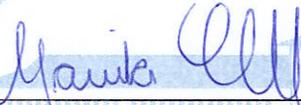
Turrialba, Costa Rica

Septiembre 2023

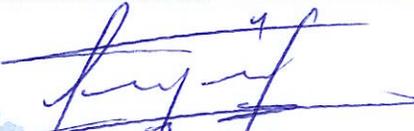
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA Y
AGRICULTURA SOSTENIBLE**

FIRMANTES:



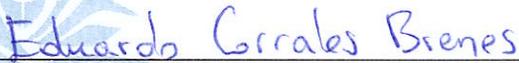
Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Codirectora de tesis



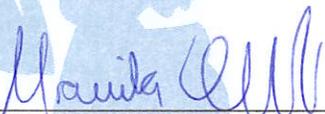
Luis Orozco Aguilar, Ph.D.
Codirector de tesis



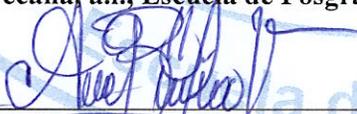
Adriana Arciniegas Leal, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Eduardo Corrales Brenes, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, a.i., Escuela de Posgrado



Angie Rosalia Villatoro Canales
Candidata

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía en todas las metas propuestas y sueños por cumplir.

A mi familia, en especial, a mi hijo Matteo que es mi motivación diaria.

A mi compañero de vida Carlos, quien me impulsa a crecer personal y profesionalmente.

A todos mis amigos y profesores consejeros, por todo su apoyo en este proceso.

Agradecimientos

Esta investigación no sería posible sin la colaboración, asesoramiento y apoyo de los siguientes actores:

Finca Rausch Cacao, gracias por abrir las puertas de sus instalaciones para desarrollar esta investigación y así aportar nuevos conocimientos al gremio cacaotero.

Elsa Hegmann Ph. D, gracias por confiar en mí y por brindarme toda su colaboración para que la investigación culminará con éxito.

Adrián Galiano y Rita Rojas, mis asistentes técnicos de campo; infinitamente agradecida por todo su apoyo en la recolección de datos.

Edward Pérez, muchas gracias por su apoyo logístico y por sus aportes para la investigación.

Luis Orozco Aguilar Ph. D, gracias por darme la oportunidad de realizar este estudio; gracias por su disposición a ayudar en todo momento y por sus conocimientos compartidos.

Eduardo Corrales M. Sc, infinitamente agradecida por todo su apoyo tanto en los análisis de la investigación como su colaboración en el documento.

Mariela E. Leandro Ph. D, por siempre estar dispuesta a ayudarme, por sus consejos y aportes en la investigación.

Adriana Arciniegas Leal M. Sc, muchas gracias por sus aportes, comprensión y por todo su apoyo brindado.

El Gobierno de Honduras, gracias por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

A la Red Latinoamericana de Bosques Modelo (RLABM), por brindarme el apoyo económico para la estadía en CATIE.

Al coordinador de maestría, Guillermo Detlefsen, por los conocimientos y el apoyo brindado.

Mis compañeros de maestría, gracias por los momentos compartidos, les deseo éxitos en sus vidas e infinitas bendiciones.

A todos mis amigos de CATIE, fue bonito coincidir con personas de corazón tan noble, personas que hacen de CATIE un lugar bonito y acogedor.

A mis compañeros de promoción 2022-2023, fue un placer compartir con todos y conocer un poco de la cultura y costumbres de sus respectivos países a través de ustedes. Éxitos y bendiciones siempre.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| ARTÍCULO 1 | 1 |
| Resumen | 1 |
| Abstract..... | 2 |
| 1. Introducción | 2 |
| 2. Materiales y métodos | 4 |
| 2.1 Localización del área de estudio | 4 |
| 2.2 Información general y manejo agronómico de la finca | 4 |
| 2.3 Diseño muestral | 5 |
| 2.4 Selección de clones | 6 |
| 2.5 Estructura de unidades observacionales | 6 |
| 2.5.1 Selección y medición de las variables de la arquitectura de los árboles | 6 |
| 2.5.2 Identificación de las mazorcas por árbol | 7 |
| 2.5.3 Identificación de la ubicación de la mazorca a lo largo del tronco | 8 |
| 2.5.4 Registro del estado de sanidad de la mazorca | 8 |
| 2.6 Estimación de cosecha | 9 |
| 2.7 Análisis de los datos | 10 |
| 2.7.1 Modelos de crecimiento..... | 10 |
| 2.7.2 Curvas de sobrevivencia de Kaplan-Meier..... | 12 |
| 2.7.3 Comparación de metodologías de estimación de cosecha..... | 12 |
| 3. Resultados | 13 |
| 3.1 Arquitectura general de los árboles | 13 |
| 3.2 Curvas de crecimiento | 14 |
| 3.3 Sobrevivencia..... | 21 |
| 3.3.1 Curvas de sobrevivencia..... | 22 |
| 3.4 Comparación de métodos de estimación | 25 |
| 4. Discusión..... | 27 |
| 5. Conclusiones | 30 |
| 6. Recomendaciones..... | 30 |
| 7. Implicaciones | 31 |
| 8. Bibliografía..... | 31 |
| 9. Anexos..... | 36 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación de la Finca Comercial de cacao Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica..... | 4 |
| Figura 2. Identificación de las mazorcas de cacao por clon evaluadas en la Finca Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica..... | 7 |
| Figura 3. Ilustración de las mediciones de longitud (cm) y diámetro (cm) de cada mazorca dentro del estudio | 8 |
| Figura 4. Estratos de la planta de cacao bajo (menos de 1,5m) y alto (mayor a 1,5m), sin sobrepasar los 2,5 m de altura efectiva | 8 |
| Figura 5. Modelo de crecimiento Gompertz. Parámetros del modelo: α , β , y γ | 11 |
| Figura 6. Curvas de crecimiento del diámetro de la mazorca de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) en función del tiempo en días para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565..... | 19 |
| Figura 7. Curvas de crecimiento de la longitud de la mazorca de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) en función del tiempo en días para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565..... | 20 |
| Figura 8. Representación del crecimiento longitudinal de la mazorca a través de tiempo (días) para cada clon. | 21 |
| Figura 9. Porcentaje de mazorcas cosechadas y afectadas por plagas y enfermedades para cada clon en la Finca Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica | 22 |
| Figura 10. Curvas de sobrevivencia de los clones CATIE -R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565 utilizando el análisis de Kaplan-Meier. | 23 |
| Figura 11. Representación gráfica del efecto del estrato del árbol sobre la probabilidad de sobrevivencia de las mazorcas del clon CATIE-R4 en función del tiempo (días). A=alto y B=Bajo..... | 24 |
| Figura 12. Representación gráfica del efecto de la topografía general (semiplano y loma) sobre la probabilidad de sobrevivencia de las mazorcas del clon CATIE-R6 en función del tiempo (días). Loma=21% Semiplano=12,7% | 25 |
| Figura 13. Gráficos de la probabilidad de sobrevivencia del clon CATIE-R1 considerando el estrato/posición de la mazorca y la topografía (loma y semiplano). | 37 |
| Figura 14. Gráfico de la probabilidad de sobrevivencia del clon CATIE-R4 considerando la topografía (loma y semiplano). | 37 |
| Figura 15. Gráfico de la probabilidad de sobrevivencia del clon CATIE-R4 considerando el estrato/posición de la mazorca. | 38 |
| Figura 16. Gráfico de la probabilidad de sobrevivencia del clon CATIE-R4 considerando el estrato/posición de la mazorca. Para este clon no hay gráfico para pendiente, ya que no se contó con otra parcela para hacer comparaciones en plano. | 38 |
| Figura 17. Formato de las condiciones agroclimáticas generales de la finca bajo estudio..... | 39 |
| Figura 18. Formato para registro de cada árbol por clon..... | 40 |
| Figura 19. Formato de campo para el registro de datos cada 15 días de las mazorcas por clon y por planta. | 41 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Manejo agronómico de la finca Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica | 5 |
| Tabla 2. Características agronómicas de los clones evaluados en la finca Rausch Cacao para la generación de curvas de crecimiento y sobrevivencia de mazorcas de cacao (Theobroma cacao L)..... | 6 |
| Tabla 3. Descripción de las variables de arquitectura de los árboles y su método de medición. | 7 |
| Tabla 4. Estados de sanidad de la mazorca usados para monitorear el complejo de PyE en los cacaotales de la Finca Comercial Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica. | 9 |
| Tabla 5. Estimación de rendimiento para cada área muestra (UTZ) | 10 |
| Tabla 6. Estructura aleatoria de los modelos no lineales mixtos ajustados en la interacción | 12 |
| Tabla 7. Estadísticas descriptivas de las variables de arquitectura de los árboles de cacao evaluados en la finca Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica | 14 |
| Tabla 8. Valores de AIC y BIC de los modelos de crecimiento de Gompertz para el diámetro y longitud de las mazorcas de cacao según clon. Modelos ajustados mediante máxima verosimilitud (ML) | 15 |
| Tabla 9. Crecimiento diamétrico y longitudinal de mazorca según modelo de crecimiento de Gompertz por clon (valores estimados de los parámetros y su error estándar, estadístico t y p-valor asociado) | 17 |
| Tabla 10. Valores log rank y p-valor asociado del efecto de estrato y pendiente según clon. (Curvas de sobrevivencia de mazorcas de cacao)..... | 24 |
| Tabla 11. Valores medios de los rendimientos obtenidos para cada uno de los clones. Método utilizado por la Certificadora UTZ. Método de las Curvas de Sobrevivencia por Clon (CSC) para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565 | 26 |
| Tabla 12. Tabla de probabilidad de sobrevivencia de Kaplan-Meier por clon..... | 36 |

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

| Sigla | Definición |
|--------------|--|
| °C | Grados Celsius |
| CC | Curvas de Crecimiento |
| CS | Curvas de Supervivencia |
| CATIE | Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza |
| Cm | centímetros |
| C.R | Costa Rica |
| CSC | Curvas de Supervivencia por Clon |
| ha | Hectáreas |
| IM | Índice de Mazorca |
| IS | Índice de Semilla |
| Kg | Kilogramo |
| KM | Kaplan-Meier |
| LARP | Longitud Acumulada de Ramas Productivas |
| M | metros |
| mm | milímetros |
| m.s.n.m | Metros sobre el nivel del mar |
| °N | Grados norte |
| PyE | Plagas y Enfermedades |
| PMG | Programa de Mejoramiento Genético |
| °S | Grados sur |
| T&T | Trinidad y Tobago |
| USD | Dólares americanos |

ARTÍCULO 1

Generación de curvas de crecimiento y sobrevivencia de mazorcas de cacao (*Theobroma cacao* L) de cuatro clones, para mejorar la estimación de cosecha en finca en la zona húmeda de Costa Rica

Angie Villatoro-Canales¹, Mariela E. Leandro-Muñoz¹, Luis Orozco-Aguilar², Eduardo Corrales¹, Adriana Arciniegas-Leal¹

¹ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² Consultor adjunto, Fundación NicaFrance, Finca La Cumplida, Matagalpa, Nicaragua.

Resumen

La estimación de cosecha es una acción clave en la gerencia de las fincas, ya que define decisiones técnicas, presupuestarias, laborales y de rentabilidad del cultivo. Por lo tanto, la presente investigación tiene el objetivo de proponer un método de estimación de cosecha de cacao partiendo de la generación de curvas de crecimiento y de sobrevivencia de mazorcas en cuatro clones. La investigación se realizó en la finca comercial Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica (680 m.s.n.m, 3.000-3.500 mm de lluvia anuales, humedad relativa del 80% y temperatura entre 22-29 grados). Los clones de cacao evaluados fueron CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6. En total se evaluaron 47 árboles a los que se les midió el diámetro, altura total, número de ramas y longitud de ramas productivas. Las curvas de crecimiento se realizaron a partir de mediciones quincenales de las variables diámetro y longitud de la mazorca para cada clon y se ajustaron con el modelo de crecimiento de Gompertz. Las curvas de sobrevivencia se construyeron a partir del monitoreo de la sanidad de mazorcas cada 15 días mediante el método de Kaplan Meier. El patrón de crecimiento de los cuatro clones describió una curva sigmoide y la curva promedio mostró tres fases de crecimiento. Asimismo, de las más de 1.000 mazorcas medidas durante 195 días, entre el 60%-80% fueron cosechadas y entre un 20%-40% se perdieron por afectación por plagas y enfermedades. En promedio, el 60% de la carga de mazorcas ocurrió por debajo de los 1,5 m del tronco y el restante 40% ocurrió por arriba de los 1,5 m. El análisis de Kaplan-Meier indicó que la sobrevivencia de las mazorcas fue estadísticamente diferente entre los clones (p-value \leq 0,0001). Las mazorcas del clon CATIE-R4 tuvieron mayor probabilidad de sobrevivencia (0,82), mientras que las mazorcas del clon CATIE-R1 tuvieron la menor probabilidad de sobrevivencia (0,62). La probabilidad de sobrevivencia en función de la posición de la mazorca a lo largo del tronco y la ubicación topográfica del árbol, fueron significativas para los clones CATIE-R4 (p-value=0,0272) y CATIE-R6 (p-value=0,0300), respectivamente. Por último, se comparó el estimado de cosecha por el método UTZ contra el estimado de cosecha usando la probabilidad de sobrevivencia de las mazorcas por clon y se determinó que el método UTZ consistentemente sobreestimó la cosecha de los clones CATIE-R1, CATIE-R6 y TSH-565 por el orden de 135%, 52% y 77%, respectivamente. Se sugiere desarrollar y aplicar factores de descuento por clon para mejorar la estimación de cosecha a nivel de finca.

Palabras clave: cacao, rendimientos, cosecha, clones, riesgo.

Abstract

Crop estimation is a key action in farm management since it defines technical, budgetary, labor and profitability decisions. Therefore, the objective of this research was to propose a method for estimating cocoa harvest based on the generation of growth and survival curves of cocoa pods in four clones. The research was carried out at the Rausch Cacao commercial farm, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica (680 m.a.s.l., 3,000-3,500 mm of annual rainfall, relative humidity of 80% and temperature between 22-29 degrees Celsius). The cocoa clones evaluated were CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6. A total of 47 trees were evaluated and their diameter, total height, number of branches and length of productive branches were measured. The growth curves were made from biweekly measurements of the variables diameter and ear length for each clone and were adjusted with the Gompertz growth model. Survival curves were constructed by monitoring ear health every 15 days using the Kaplan Meier method. The growth pattern of the four clones described a sigmoidal curve and the average curve showed three growth phases. Also, of the more than 1,000 ears measured during 195 days, 60%-80% were harvested and 20%-40% were lost to pests and diseases. On average, 60% of the cob load occurred below 1.5 m from the trunk and the remaining 40% occurred above 1.5 m. Kaplan-Meier analysis indicated that cob survival was statistically different among clones (p -value ≤ 0.0001). Cobs from clone CATIE-R4 had the highest probability of survival (0.82), whereas cobs from clone CATIE-R1 had the lowest probability of survival (0.62). The probability of survival as a function of ear position along the trunk and topographic location of the tree were significant for clones CATIE-R4 (p -value=0.0272) and CATIE-R6 (p -value=0.0300), respectively. Finally, the harvest estimate by the UTZ method was compared against the harvest estimate using the probability of cob survival by clone and it was determined that the UTZ method consistently overestimated the harvest of clones CATIE-R1, CATIE-R6 and TSH-565 by 135%, 52% and 77%, respectively. It is suggested to develop and apply clone discount factors to improve crop estimation at the farm level.

Key words: cocoa, yields, harvest, clones, risk.

1. Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo importante para las comunidades campesinas y los pequeños productores (Somarriba y López-Sampson 2018). Las semillas fermentadas y secas del cacao se utilizan como materia prima para diversos productos, en particular el chocolate. El cacao se cultiva en 10,2 millones de hectáreas e involucra más de 10 millones de cacaocultores que producen más de 4,47 millones de toneladas de grano seco al año (Vaast y Somarriba 2014).

En cualquier sistema de producción de cultivos, como el cacao, es fundamental la estimación de cosecha (Ngoune y Mutengwa 2019), debido a que; la gestión de una plantación de cacao necesita estadísticas agrícolas oportunas que contribuyan con la toma de decisiones técnicas, de planificación presupuestaria y estrategias de comercialización con el fin de obtener rentabilidad. Sin embargo, es un gran desafío distinguir y determinar la producción real de cacao en un año calendario (dos Santos y Ramos 2016), ya que los

rendimientos obtenidos suelen ser inferiores al rendimiento esperado, debido a la alta presión de plagas y enfermedades (Wessel y Quist-Wessel 2015) como la moniliasis (*Moniliophthora roreri* Cif & Par), mazorca negra (*Phytophthora spp.*), escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*), entre otras; que ocasionan pérdidas entre el 50% y el 80% de los frutos a nivel mundial (Leandro-Muñoz *et al.* 2017; Phillips-Mora y Cerda 2011).

Una de las acciones tomadas para contrarrestar este efecto es la generación de clones resistentes a plagas y enfermedades (PyE). El Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE) desarrolló un Programa de Mejoramiento Genético de Cacao (PMG), a partir del cual, luego de ensayos de campo conducidos durante los últimos 15 años, liberó desde el año 2007, un policlon compuesto por 6 clones: CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6, CC-137, ICS-95, PMCT-58, los cuales son caracterizados por su buena producción, tolerancia a enfermedades y buena calidad de grano (Phillips-Mora *et al.* 2012). Sin embargo, y a pesar de poseer niveles altos de tolerancia a moniliasis y mazorca negra, no es una resistencia completa; por lo tanto, para combatir estas enfermedades de forma eficaz, duradera y económica es importante implementar un manejo agronómico apropiado (fertilización, podas, deshierbas, etc.). El rendimiento de estos clones está condicionado también por factores como la calidad del sitio, el diseño y densidad de siembra, el genotipo, la edad de la planta y el manejo de la sombra, entre otros (Phillips-Mora *et al.* 2012; González *et al.* 2015; Hoopen *et al.* 2012).

El rendimiento del cacao está determinado por tres componentes clave como son: el peso del grano por mazorca, el número de mazorcas por árbol y el número de árboles por hectárea. Existen varios métodos de estimación de cosecha (Tahi *et al.* 2007), sin embargo; para obtener el rendimiento de granos secos, uno de los métodos más utilizados para estimación de cosecha es el recuento de mazorcas en cada ronda de cosecha, y el índice de Mazorca (IM), que es el número de mazorcas necesarias para obtener un kilogramo (kg) de cacao seco. La precisión de este método de estimación de cosecha depende del correcto cálculo del IM por clon y picos de cosecha.

No obstante, los actuales métodos de estimación de cosecha solo consideran la incidencia de PyE en un sitio y momento dado. La principal limitante es la ausencia de una herramienta de estimación de cosecha que considere los riesgos que enfrentan las mazorcas de cacao durante su desarrollo y la probabilidad de sobrevivencia en el tiempo. En este sentido, una estrategia para mejorar la estimación de cosecha debe tomar en cuenta los factores antes mencionados para cada clon, mediante el entendimiento de las curvas de crecimiento (CC) y las curvas de sobrevivencia (CS). Las primeras permiten observar el comportamiento de cada clon hasta alcanzar su madurez fisiológica (aproximadamente 150 días) después de la floración (Niemenak *et al.* 2010), y las segundas estiman la probabilidad de que ocurra una enfermedad o plaga en distintos intervalos de tiempo (Rivas *et al.* 2014). Por consiguiente, este estudio propone una mejora del método más utilizado en la estimación de cosecha en finca partiendo de la construcción de CC y CS de las mazorcas de cuatro clones (CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565).

2. Materiales y métodos

2.1 Localización del área de estudio

La investigación se realizó en la finca comercial Rausch Cacao, entre los meses de noviembre 2022 a mayo 2023, la finca se ubica a 680 m.s.n.m. en el distrito de Tres Equis, cantón de Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica (Figura 1). El clima del sitio es tropical, con temperatura anual entre los 21,7 °C a los 29 °C, precipitación entre los 3.000-3.500 mm anuales y una humedad relativa del 88% (MINAE y PNUMA 2022).



Figura 1. Ubicación de la Finca Comercial de cacao Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica

2.2 Información general y manejo agronómico de la finca

La finca Rausch Cacao tiene aproximadamente 30 ha sembradas con cacao en sistema agroforestal, de las cuales 23 ha se encuentran en producción. La distancia de siembra del cacao es de 3x3m (1.111 plantas/ha). La edad de la plantación es de 6 años, fue establecida en diciembre del 2015; y se resembraron gradualmente varios árboles hasta noviembre de 2017. La finca cultiva 11 clones de cacao: CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6, TSH-565, ICS-95, PMCT-58, ICS-1, ICS-6, ICS 39, TSH-1188 y B1. El manejo agronómico del cacaotal se basa en podas, control de malezas, aplicación de fertilizantes y nivelación de pH (Tabla 1). Además, para mejorar la fertilidad e incrementar la materia orgánica del suelo dejan la hojarasca, las cáscaras de cacao trituradas y los restos de la poda del cacao, al mismo tiempo; los restos de los árboles maderables, leguminosas y frutales que forman parte del cacaotal.

Tabla 1. Manejo agronómico de la finca Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica

| Práctica agronómica | Frecuencia | Comentario |
|--------------------------------------|--|---|
| Poda | Dos veces al año 1: enero-febrero 2: agosto-septiembre | Tipos de poda: eliminación de chupones, poda de mantenimiento y poda sanitaria |
| Control de malezas | Cuatro veces al año | Aplicación de herbicidas gramínicos una vez al año y el uso de chapeadora. |
| Fertilización | Dos veces al año 1: mayo-junio 2: octubre | 270g/árbol de Unifert NPK (Ca-Mg-S) 10-5-15 (10-3-4,8) |
| Nivelación de pH | Una vez al año | Aplicación de cal al pie del árbol, 0,3 a 0,4 kg/árbol |
| Picos de cosecha | Dos al año | Principal: abril-mayo Secundaria: octubre-diciembre |
| Recolección de mazorcas sanas | Cada 15 días | La cosecha se realiza por lote, al momento de la quiebra de la mazorca se separan por clones y se toma el dato de peso fresco/clon. |
| Remoción de frutos enfermos | Tres veces al año | Se remueven los frutos y se sacan de cada lote en sacos para posteriormente enterrar los frutos. |
| Rendimiento | Año 2022 | 250 kg/ha/año |

2.3 Diseño muestral

Inicialmente, se seleccionó el área de estudio tomando en cuenta la ubicación de los clones de interés en los lotes de la finca y la topografía (loma y plano), seleccionando el lote B, para establecer las parcelas. Luego, se utilizó un muestreo sistemático, el cual consistió en seleccionar un árbol, dejando dos árboles de por medio por fila, teniendo como guía, el mapa de siembra de la finca. Se siguió la metodología planteada por Orozco *et al.* (2020), la cual indica los siguientes criterios generales:

1. Se debe contar con un registro confiable de la cosecha de los clones cultivados en la parcela.
2. Cada árbol debía tener el 100% de competitividad, es decir; que el árbol bajo estudio debía estar rodeado por árboles vecinos a los 4 lados en la medida de lo posible.
3. Las mazorcas seleccionadas debían tener un mínimo de 2,5 cm de longitud (3-4 semanas de edad), bajo el supuesto de que los frutos sobrevivieron al proceso fisiológico Cherrille Wilt.
4. Cada parcela bajo evaluación recibió el manejo agronómico regular.
5. La plantación bajo estudio debe tener como mínimo 5 años.

2.4 Selección de clones

Esta investigación se basó en el estudio de cuatro clones, de los cuales tres de ellos fueron desarrollados por el Programa de Mejoramiento Genético de Cacao del CATIE en el año 2007. Los clones estudiados fueron CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6, originarios de Costa Rica y el clon TSH-565 originario de Trinidad y Tobago. La principal característica de estos clones es su tolerancia a las principales enfermedades como la moniliasis (*Moniliophthora roreri* Cif & Par) y la mazorca negra (*Phytophthora spp.*). Además, estos clones poseen cualidades destacadas de producción y calidad (Tabla 2). Actualmente, existe una creciente expansión del uso de estos clones en Centroamérica, México y otros países, donde forman parte de diferentes iniciativas de fomento regionales, con el fin de modernizar plantaciones e impactar así en la calidad de vida de las familias productoras (Phillips-Mora *et al.* 2012; Phillips-Mora *et al.* 2017).

Tabla 2. Características agronómicas de los clones evaluados en la finca Rausch Cacao para la generación de curvas de crecimiento y sobrevivencia de mazorcas de cacao (*Theobroma cacao* L).

| Clon | Productividad ¹ (kg/árbol/año) | Compatibilidad | IM ² | IS ³ | Pérdida por Monilia (%) | Pérdida por Mazorca negra (%) |
|----------|--|------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------------|
| CATIE-R1 | 1,4 | Autocompatible | 29 | 1,3 | 15 | 6 |
| CATIE-R4 | 1,6 | Autoincompatible | 18 | 1,5 | 12 | 1 |
| CATIE-R6 | 1,4 | Autoincompatible | 24 | 1,4 | 4 | 0 |
| TSH-565 | 2,6 | Autoincompatible | 19 | 1,2 | S | S ⁴ |

Phillips *et al.* (2012)

¹ Producción promedio de 11 años. ² índice de mazorca: número de mazorcas que se necesitan para obtener 1 kg de cacao seco. ³ índice de semilla: peso promedio en gramos de 100 semillas fermentadas y secas tomadas al azar. ⁴ susceptible.

2.5 Estructura de unidades observacionales

2.5.1 Selección y medición de las variables de la arquitectura de los árboles

El estudio inició en el mes de noviembre de 2022, con la selección de 47 árboles de cacao; de los cuales 16 árboles fueron de CATIE-R1, 11 árboles del CATIE-R4, 10 árboles del CATIE-R6 y 10 árboles de TSH-565. Cada árbol seleccionado, se identificó con una cinta de color blanco, donde se anotó el clon y el número del árbol bajo evaluación, por ejemplo; CATIE R1-árbol 1. Con el fin de describir la arquitectura de los árboles, se midieron las variables diámetro, altura, número de ramas principales y longitud

acumulada de ramas productivas (LARP) (Tabla 3). Los datos de estas variables se midieron por una sola vez después de realizada la poda de mantenimiento.

Tabla 3. Descripción de las variables de arquitectura de los árboles y su método de medición.

| Variable** | Observación |
|------------------------------------|--|
| Altura(m) | Se midió con una vara calibrada hasta la última rama |
| Diámetro(cm) | Se midió con cinta diamétrica a 30cm del suelo |
| Número de ramas principales | Se determinó el número de ramas que presentó el árbol a nivel del verticilo |
| LARP*** | Se midió el tronco más las ramas cosecheras (ramas productivas del árbol) en segmentos hasta un diámetro no menor de 2,5cm y una altura máxima de 2,5m |

Variables medidas una vez al inicio del estudio. *Longitud Acumulada de Ramas Productivas (medido desde el punto de ramificación del árbol).

2.5.2 Identificación de las mazorcas por árbol

En cada árbol seleccionado, se identificaron todas las mazorcas encontradas con cintas de color blanco, rojo y amarillo (Figura 2). En cada cinta o etiqueta se especificó el número de árbol y el número de mazorca (1:1 árbol 1, mazorca 1), con el fin de resguardar su identidad y facilitar la toma de datos en campo durante su ciclo de cosecha. Finalmente, para cada mazorca se midió el diámetro (cm) al centro de la mazorca y la longitud (cm) desde la base hasta el ápice. Las mediciones se realizaron con una forcípula forestal (Figura 3). Estas variables se midieron cada 15 días hasta que la mazorca alcanzó su período de madurez fisiológica y fue eventualmente cosechada. Al mismo tiempo, con el fin de visualizar la evolución de los cambios físicos en la mazorca, se fotografió una mazorca por clon en cada fecha de medición para reconstruir las fases de crecimiento.



Figura 2. Identificación de las mazorcas de cacao por clon evaluadas en la Finca Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica

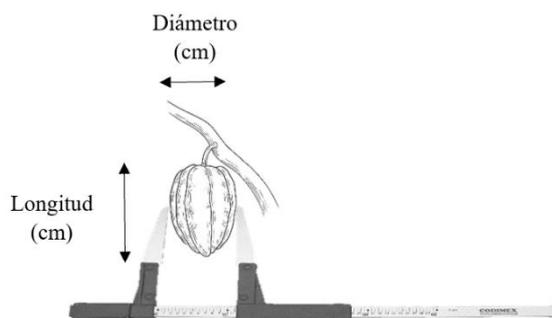


Figura 3. Ilustración de las mediciones de longitud (cm) y diámetro (cm) de cada mazorca dentro del estudio

2.5.3 Identificación de la ubicación de la mazorca a lo largo del tronco

Se identificó la posición de la mazorca en el árbol teniendo en cuenta dos estratos (A=Alto y B=Bajo) (Figura 4), sin sobrepasar los 2,5 m de altura efectiva del árbol, dicha división se aplicó con el fin de identificar en cuál de los dos estratos, existe mayor riesgo o susceptibilidad de las mazorcas al ataque de a PyE. Para su registro en campo se colocó una columna en el formato de campo, donde se especificaba para cada mazorca: A para estrato alto y B para estrato bajo.

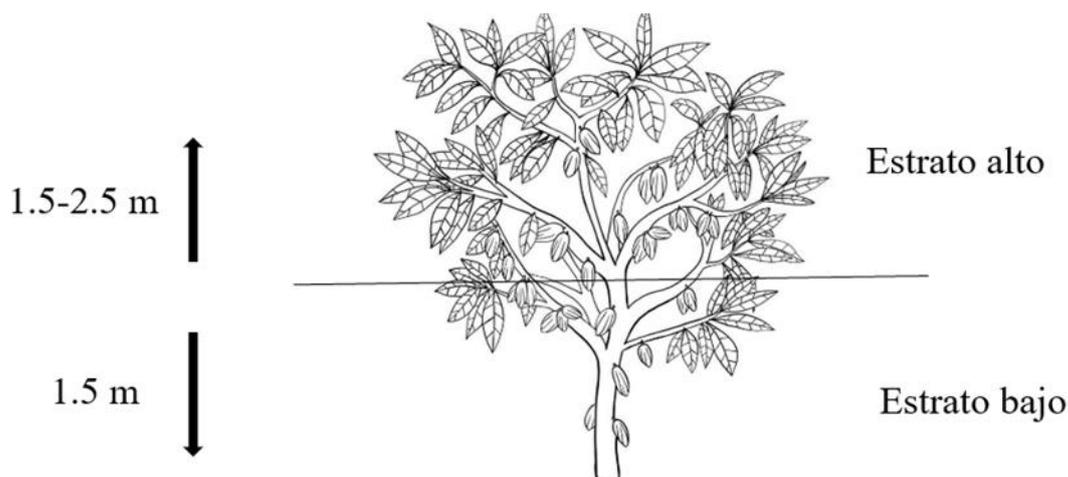


Figura 4. Estratos de la planta de cacao bajo (menos de 1,5m) y alto (mayor a 1,5m), sin sobrepasar los 2,5 m de altura efectiva

2.5.4 Registro del estado de sanidad de la mazorca

El estado sanitario de cada mazorca identificada se registró cada vez que se realizaron las mediciones de diámetro y longitud, es decir, cada 15 días. Para tal efecto, se asignaron ocho estados de sanidad (Tabla 4). Una vez que la mazorca sufrió una afectación o ataque de PyE, se identificó y registró la fecha del evento y se removió del árbol, con el fin de mantener el manejo regular de la finca. Para el registro del estado, se utilizó un formato de campo, donde se identificó el estado de la mazorca (sana o enferma), así como su condición (0: viva, 1: muerta y 2: cosechada). La moniliasis no se evaluó (*Moniliophthora roreri* Cif & Par), debido a que, según el personal técnico y gerencial de la finca, no se

ha detectado brote de esta enfermedad en las plantaciones (Dra. Elsa Hegmann y Ing. Edward Pérez 2022, comunicación personal).

Tabla 4. Estados de sanidad de la mazorca usados para monitorear el complejo de PyE en los cacaotales de la Finca Comercial Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica

| Estado | Sanidad |
|---------------|--|
| 1 | Sana |
| 2 | Cherelle Wilt |
| 3 | Mazorca negra (<i>Phytophthora</i>) |
| 4 | Ardilla |
| 5 | Pizote |
| 6 | Pájaro carpintero |
| 7 | Insecto (<i>Monalonion</i> spp) |
| 8 | Cosechada |

2.6 Estimación de cosecha

Para la estimación de rendimiento de cacao se compararon los resultados de dos metodologías, la utilizada por la certificadora UTZ (UTZ 2016) y el método del factor de descuento según las Curvas de Supervivencia por Clon (CSC) propuesto en esta investigación. A continuación, se describe cada metodología:

- **Metodología de la UTZ**

Consiste en tres pasos como se detalla a continuación:

Paso 1: consiste en establecer las áreas de muestreo, áreas representativas de la finca en términos de densidad, edad de los árboles y calidad del suelo. Estas áreas de muestreo no deben estar dominadas por campos recién plantados y campos abandonados (sin producción), así como campos con árboles viejos (producción en declive).

Paso 2: consiste en contar los árboles productores, las mazorcas maduras y grandes (mazorcas verdes que ya alcanzaron su longitud completa, pero no su volumen completo), sin contar las mazorcas que estaban infectadas por PyE. Una vez que se cuentan las mazorcas, se clasifican los árboles en tres categorías: alto rendimiento (≥ 20 mazorcas/árbol), rendimiento medio (11-20 mazorcas árbol) y bajo rendimiento (≤ 10 mazorcas/árbol). Después se multiplican por los respectivos factores de conversión de acuerdo con la carga de mazorcas por árbol (Tabla 5).

Paso 3: se calcula el volumen de cacao seco kg/año para el total de árboles muestreados y se multiplica por la densidad de árboles por hectárea para obtener el rendimiento por hectárea. Finalmente, sugiere utilizar un factor de descuento de cosecha del 20% por efecto del complejo de PyE en la plantación.

Tabla 5. Estimación de rendimiento de cacao para cada área muestreada (UTZ)

| Método UTZ | | | | | | | |
|--------------------------|------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Categoría De rendimiento | # mazorcas/árbol | # de árboles muestreados | Factor de conversión (kg/año) * | Volumen de grano (kg seco) | Rendimiento (kg/árboles) | Factor de descuento por PyE (%) | Rendimiento cacao (kg/ha/año) |
| Alto | ≥20 | | ±1 | | | 20% | |
| Medio | 11-20 | | ±0.6 | | | | |
| Bajo | ≤10 | | ±0.20 | | | | |
| Total | | árboles | | kg | | | |

*Factores de conversión a partir de la carga de mazorcas por árbol

▪ Metodología del factor de descuento según la CSC

El método CSC desarrollado en esta investigación implica dos mejoras en la precisión de estimación de cosecha a nivel de finca:

La primera consistió en realizar el conteo de mazorcas mayores a 14 cm en este caso para lograr contrastar con el método UTZ, luego se dividió por el IM de cada clon, para obtener el rendimiento de granos secos para los árboles dentro de parcela (Tahi *et al.* 2007), el resultado de esta operación se multiplica por la densidad de siembra para obtener el rendimiento por superficie (kg/ha).

El segundo paso consiste en multiplicar el rendimiento obtenido por la probabilidad de sobrevivencia condicionada de cada clon de acuerdo con el período de maduración. Para calcular la probabilidad de sobrevivencia condicionada se utilizaron los valores de la tabla de sobrevivencia derivada de Kaplan-Meier, dividiendo el valor de sobrevivencia del tiempo final de maduración de cada clon entre el valor de sobrevivencia al momento que se realizó el conteo de la mazorca (3 meses). Por último, se multiplica el rendimiento (kg/ha) por la probabilidad de sobrevivencia resultante para generar el volumen de granos (kg/ha).

2.7 Análisis de los datos

Se realizó análisis descriptivo como una medida de control de calidad a la base de datos, en los casos en los que se identificaron inconsistencias se revisaron las hojas de campo y se realizaron las correcciones. El análisis de las dimensiones de árboles de cacao (diámetro, altura, número de ramas principales y LARP) se analizó mediante medidas resumen, con el fin de describir la arquitectura general de los árboles para cada clon.

2.7.1 Modelos de crecimiento

Con el objetivo de generar las curvas de crecimiento para cada clon, primero se identificaron las mazorcas con un mínimo de 9 mediciones (135 días después de anthesis), con el fin de tener mazorcas en las que se pueda evaluar el crecimiento (Niemenak *et al.* 2010). Las curvas de crecimiento se ajustaron con el modelo de crecimiento de Gompertz, utilizado para describir el crecimiento a lo largo del tiempo (Mangueira *et al.* 2022; da Silva y Savia 2019, Hidalgo *et al.* 2021). El modelo Gompertz se caracteriza por estimar tres parámetros: α , β y γ (Hoopen *et al.* 2012), cada uno de ellos tiene su correspondiente interpretación biológica. El parámetro α es la asíntota superior (límite donde la mazorca

alcanza el mayor crecimiento), β es la constante relacionada con los diámetros o longitudes iniciales de la mazorca y γ es una tasa constante del crecimiento (Hidalgo *et al.* 2021) (Figura 5). El modelo de crecimiento en longitud o diámetro para una mazorca se expresa de la siguiente forma:

$$y_m = \alpha \exp(-\beta \exp(-\gamma t_m)) + e_m \quad m = 1, \dots, T$$

Donde:

y_m = longitud o diámetro de la mazorca en el tiempo t_m

α = longitud máxima de la mazorca

β = constante relacionada con la longitud inicial de la mazorca

γ = constante de crecimiento en longitud de la mazorca

t_m = m -ésimo tiempo después de anthesis (dda)

e_m = error aleatorio distribuido normal con media cero y varianza σ^2 . Además, se supone que $cov(e_m, e_{m'}) = 0 \forall m \neq m'$

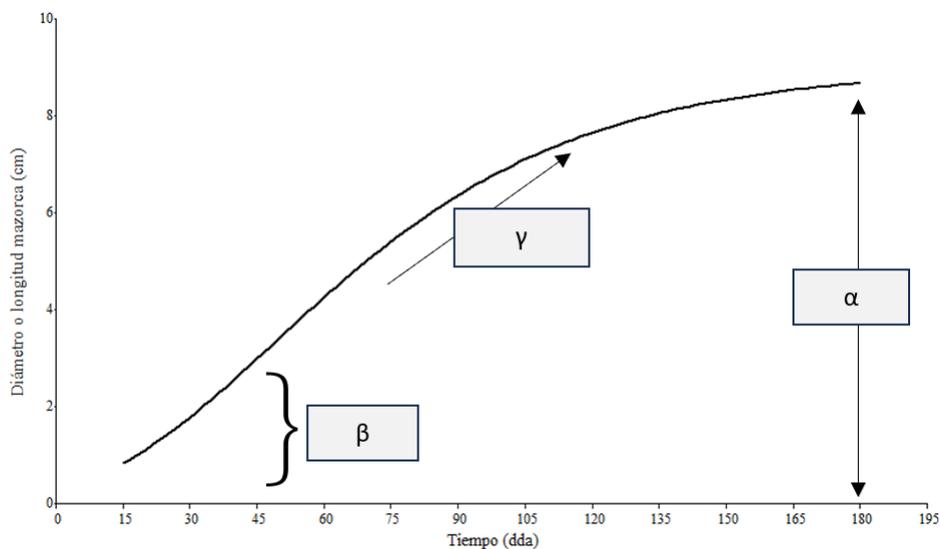


Figura 5. Modelo de crecimiento Gompertz. Parámetros del modelo: α , β , y γ

Este modelo se puede ajustar para cada una de las mazorcas que provienen de los clones, obteniendo así tantos modelos y curvas como mazorcas se hayan medido. Sin embargo, en esta investigación, se estimó un único modelo para cada clon, utilizando todas las mazorcas con 9 mediciones o más y se especificó el efecto de la mazorca como un efecto aleatorio que puede incidir en cualquiera de sus parámetros (α , β , y γ) o en alguna de sus posibles combinaciones. También se evaluó, por medio de los gráficos diagnóstico, la falta de independencia inducida por las mediciones realizadas sobre una misma mazorca a través del tiempo, así como el problema de heteroscedasticidad, que se deriva de dicha estructura. En este caso, la estrategia de modelación para cada clon consistió en:

1. Ajustar todos los modelos posibles con diferente estructura aleatoria (Tabla 6), partiendo de los tres parámetros del modelo Gompertz.

Tabla 6. Estructura aleatoria de los modelos no lineales mixtos ajustados en la interacción

| Modelos | |
|----------------|---|
| 1 | No efectos aleatorios |
| 2 | Efecto aleatorio sobre alfa |
| 3 | Efecto aleatorio sobre beta |
| 4 | Efecto aleatorio sobre gamma |
| 5 | Efecto aleatorio sobre alfa y beta |
| 6 | Efecto aleatorio sobre alfa y gamma |
| 7 | Efecto aleatorio sobre beta y gamma |
| 8 | Efecto aleatorio sobre alfa, beta y gamma |

2. Seleccionar el modelo con la mejor estructura aleatoria: para la selección del mejor modelo se utilizaron los criterios de información penalizada de Akaike (AIC) y Schwarz (BIC), en ambos casos, mientras menor sea el valor del criterio, mejor es el ajuste del modelo (Hidalgo *et al.* 2021).
3. Modelar la estructura de correlación temporal y varianzas heterogéneas: con el mejor de los modelos seleccionado en el punto anterior, se validan los supuestos distribucionales de los errores mediante los gráficos diagnóstico, y cuando se sospechó el incumplimiento de alguno, se realizó el ajuste de modelos con diferente estructura de correlación (simetría compuesta, autorregresivo de orden 1, sin estructura), así como modelos que declaran varianzas heterogéneas. Finalmente, y al igual que en el punto anterior, se seleccionó el mejor modelo a partir de los criterios de información penalizada.

2.7.2 Curvas de sobrevivencia de Kaplan-Meier

El primer paso para construir las curvas de sobrevivencia consiste en obtener el tiempo de sobrevivencia para cada una de las mazorcas, así como su condición (0: viva, 1: muerta y 2: cosechada) (Balzarini *et al.* 2008) y cada uno de estos datos clasificados según topografía donde crece el árbol muestreado, así como clon, posición/estrato de la mazorca en dicho árbol. Luego, se estiman las curvas de sobrevivencia de Kaplan – Meier, en las cuales se obtiene la probabilidad de sobrevivencia (Etikan *et al.* 2017; Goel *et al.* 2010; Kleinbaum *et al.* 2012) para cada tiempo según el clon, topografía, y/o posición/estrato de la mazorca. Además, este análisis implica una prueba de hipótesis basada en el estadístico log rank, el cual sigue una distribución Chi-Cuadrado. Finalmente, a partir del p-valor asociado se concluyó sobre la significancia estadística del efecto del clon, topografía y/o posición de la mazorca sobre la probabilidad de sobrevivencia.

2.7.3 Comparación de metodologías de estimación de cosecha

Para comparar entre las metodologías UTZ y CSC se tomaron en cuenta algunos supuestos y condiciones:

- Al momento de hacer el conteo de las mazorcas, se tomaron en cuenta solamente mazorcas grandes (aproximadamente 3 meses de edad) en línea con el paso 2 de la metodología de la UTZ, que indica que *“las mazorcas que se deben contar son grandes (mazorcas verdes que han alcanzado su longitud completa, pero no su volumen completo), maduras y listas”*.
- Para realizar la comparación entre métodos se utilizaron los mismos datos adecuados en las respectivas tablas de cada método, con la excepción de que el método UTZ contempla que *“sin un control de PyE se espera que se pierda hasta un 20% del cultivo”*, mientras que el método CSC utilizó la probabilidad condicional de sobrevivencia de acuerdo con el período de maduración de cada clon, para mazorcas de 3 meses de edad en este análisis.
- El método UTZ utiliza factores de conversión de acuerdo con la carga de mazorcas por árbol, mientras que el método CSC utiliza el IM respectivo de cada clon o variedad. El objetivo de este ejercicio comparativo fue cuantificar la magnitud en que la metodología UTZ puede sobre o subestimar la cosecha respecto a la metodología del factor de descuento según CSC. Es decir, cuando se utiliza únicamente un factor estándar de descuento (20%) para todos los clones en la finca en lugar de un factor de descuento por clon generado a partir de la probabilidad de sobrevivencia de las mazorcas monitoreadas en el tiempo.

3. Resultados

3.1 Arquitectura general de los árboles

Se evaluaron un total de 47 árboles de los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565. Los clones CATIE-R4 y CATIE-R6 presentaron los valores más altos en diámetro, altura y LARP, seguido de TSH-565 y CATIE-R1 con los valores promedios más bajos. Asimismo, los cuatro clones presentaron un máximo de entre tres y cuatro ramas (Tabla 7). Además, todos los árboles tuvieron un 100% de competencia, es decir; cada árbol evaluado tuvo 4 árboles vecinos de igual tamaño y vigor.

Tabla 7. Estadísticas descriptivas de las variables de arquitectura de los árboles de cacao evaluados en la finca Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica

| Variables | Valor | Clon | | | |
|----------------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | | CATIE-R1 n=16 | CATIE-R4 n=11 | CATIE-R6 n=10 | TSH-565 n=10 |
| Diámetro (cm)¹ | Media | 7,44 | 9,21 | 9,24 | 8,05 |
| | D.E. ³ | 1,21 | 1,40 | 1,96 | 1,03 |
| | E.E. ⁴ | 0,30 | 0,42 | 0,62 | 0,33 |
| | CV ⁵ | 16,21 | 15,25 | 21,18 | 12,82 |
| | Mínimo | 6,10 | 7,10 | 5,70 | 6,50 |
| | Máximo | 11,00 | 12,30 | 12,60 | 10,30 |
| Altura (m) | Media | 2,32 | 2,87 | 3,05 | 2,52 |
| | D.E. ³ | 0,22 | 0,27 | 0,20 | 0,27 |
| | E.E. ⁴ | 0,06 | 0,08 | 0,06 | 0,09 |
| | CV ⁵ | 9,68 | 9,38 | 6,52 | 10,81 |
| | Mínimo | 1,88 | 2,50 | 2,70 | 2,00 |
| | Máximo | 2,70 | 3,36 | 3,37 | 2,80 |
| LARP(m)² | Media | 13,97 | 19,39 | 21,47 | 12,73 |
| | D.E. ³ | 1,78 | 1,49 | 3,64 | 4,48 |
| | E.E. ⁴ | 0,44 | 0,45 | 1,15 | 1,42 |
| | CV ⁵ | 12,73 | 7,68 | 16,95 | 35,15 |
| | Mínimo | 9,67 | 17,60 | 17,20 | 5,36 |
| | Máximo | 17,89 | 21,68 | 28,13 | 18,98 |
| Número de ramas | Media | 2,25 | 2,18 | 2,40 | 2,40 |
| | D.E. ³ | 0,45 | 0,40 | 0,70 | 0,97 |
| | E.E. ⁴ | 0,11 | 0,12 | 0,22 | 0,31 |
| | CV ⁵ | 19,88 | 18,54 | 29,13 | 40,25 |
| | Mínimo | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 1,00 |
| | Máximo | 3,00 | 3,00 | 4,00 | 4,00 |

¹a 30cm del suelo; ²Longitud acumulada de ramas productivas (suma de todos los segmentos de las ramas productivas del árbol, medido desde el punto de ramificación del árbol hasta una altura máxima de 2.5 m); ³Desviación Estándar; ⁴Error Estándar; ⁵Coefficiente de Variación.

3.2 Curvas de crecimiento

Se identificaron 33, 23, 18 y 32 mazorcas para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565 respectivamente, con al menos 9 mediciones consecutivas de diámetro y longitud, con este set de datos se ajustaron las curvas de crecimiento. Para el crecimiento en diámetro, el modelo con mejor ajuste en los clones CATIE-R1, CATIE-R4 y CATIE-R6, fue el que tiene efecto aleatorio sobre los parámetros α y β (modelo 5), mientras que para el clon TSH-565, el mejor modelo tiene efecto aleatorio sobre los tres parámetros (modelo 8). Por otro lado, para el crecimiento longitudinal, en los cuatro clones, el modelo con mejor ajuste resultó ser el modelo que tiene efecto aleatorio sobre α y β (modelo 5) (Tabla 8).

Tabla 8. Valores de AIC y BIC de los modelos de crecimiento de Gompertz para el diámetro y longitud de las mazorcas de cacao según clon. Modelos ajustados mediante máxima verosimilitud (ML)

| Variable | Clon | Criterio | Modelo | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------------|--------|---------------|----|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Diámetro | CATIE-R1 | AIC | 917,44 | 777,35 | 678,83 | 687,77 | 188,92 | 521,76 | 553,76 | NC | |
| | | BIC | 932,54 | 796,17 | 697,65 | 706,59 | 422,37 | 548,11 | 580,12 | NC | |
| | CATIE-R4 | AIC | 538,93 | 506,52 | 469,43 | 484,70 | 329,20 | 385,61 | 426,53 | NC | |
| | | BIC | 552,47 | 523,38 | 486,29 | 501,56 | 352,80 | 409,21 | 450,12 | NC | |
| | CATIE-R6 | AIC | 503,02 | 428,89 | 419,99 | 400,52 | 255,04 | NC | NC | NC | |
| | | BIC | 515,58 | 444,50 | 435,61 | 416,14 | 276,91 | NC | NC | NC | |
| | TSH-565 | AIC | 1068,85 | 905,45 | NC | 729,56 | 443,66 | 696,41 | NC | 420,59 | |
| | | BIC | 1083,65 | 923,91 | NC | 748,01 | 469,49 | 722,24 | NC | 457,50 | |
| | Longitud | CATIE-R1 | AIC | 1284,26 | 1140,66 | 1131,75 | 1100,85 | 792,10 | 899,56 | 949,68 | NC |
| | | | BIC | 1299,36 | 1159,49 | 1150,58 | 1119,68 | 818,46 | 925,92 | 976,04 | NC |
| CATIE-R4 | | AIC | 908,94 | 805,90 | NC | 836,32 | 587,34 | 670,54 | 719,36 | NC | |
| | | BIC | 922,75 | 822,75 | NC | 853,18 | 610,94 | 694,14 | 742,96 | NC | |
| CATIE-R6 | | AIC | 743,21 | 595,46 | NC | 623,25 | 410,35 | 499,88 | NC | NC | |
| | | BIC | 755,78 | 611,08 | NC | 638,87 | 432,22 | 521,75 | NC | NC | |
| TSH-565 | | AIC | 1587,44 | 1397,36 | NC | 1279,41 | 1020,41 | 1247,31 | NC | NC | |
| | | BIC | 1602,24 | 1415,81 | NC | 1297,86 | 1046,24 | 1273,14 | NC | NC | |

Modelos: 1: No efectos aleatorios, 2: α , 3: β , 4: γ , 5: α y β , 6: α y γ , 7: β y γ , 8: α , β y γ . NC: no convergen. Marcados en negrita significa mejor modelo.

Una vez seleccionado el modelo con la mejor estructura aleatoria, y debido a la naturaleza del evento en estudio en el que se realizan evaluaciones de la misma mazorca a través del tiempo (violación al supuesto de independencia), se ajustaron modelos con diferente estructura de correlación temporal.

Para el clon CATIE-R1, el modelo final de crecimiento en diámetro contempla estructura de correlación sin estructura, esta misma estructura se seleccionó para el clon CATIE-R4 en cuanto al crecimiento longitudinal. Luego, el crecimiento longitudinal del clon TSH-565 resultó con estructura de correlación (sin estructura) y una función de varianza varpower sobre la media. Con respecto a los clones CATIE-R1 (longitud), CATIE-R4 (diámetro), CATIE-R6 (diámetro y longitud) y TSH-565 (diámetro), el mejor de los modelos no requirió la especificación de alguna estructura de correlación temporal y/o modelación de la varianza de los errores.

Finalmente, se presentan las estimaciones para los modelos de crecimiento en diámetro y longitud, donde se puede observar que los parámetros estimados para los modelos seleccionados resultaron significativos ($p < 0,0001$) (Tabla 9). Se observa que las mazorcas del clon TSH-565 alcanzan diámetros mayores (9,59 cm) en comparación con las mazorcas de los clones CATIE-R1 (8,34 cm), CATIE-R4 (8,64 cm) y CATIE-R6 (8,80 cm), los cuales alcanzan diámetros similares. En cuanto al crecimiento longitudinal; el clon TSH-565 se mantiene en el primer lugar, sus mazorcas llegaron a alcanzar longitudes de 24,47 cm, seguido por el clon CATIE-R4 con 16,90 cm, luego, el CATIE-R1 con 16,28 cm y, por último, el CATIE-R6 con 15,57 cm de longitud.

Al observar el parámetro β , el cual representa la tasa de crecimiento en edades iniciales, se confirma que la mazorca del clon TSH-565 es más grande en comparación con los demás clones. Sin embargo, este clon obtuvo mayor valor de β en comparación con la asíntota (α) para el crecimiento en diámetro, lo que indica que el diámetro de la mazorca de este clon tiende a crecer más rápido (mayor valor de β) y tiende a estabilizarse más rápido (menor valor de la asíntota α) en comparación a las mazorcas de los otros clones. Por último, el parámetro γ , es una constante relacionada con crecimiento sobre la curva para diámetro y longitud de la mazorca, obteniendo valores similares para los cuatro clones, sin embargo; se evidencia que el clon TSH-565 crece más rápido en comparación con los clones CATIE-R1, CATIE-R4 y CATIE-R6.

Tabla 9. Crecimiento diamétrico y longitudinal de mazorca según modelo de crecimiento de Gompertz por clon (valores estimados de los parámetros y su error estándar, estadístico t y p-valor asociado)

| Variable | Clon | α | | | | β | | | | γ | | | |
|-----------------|----------|----------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|
| | | Valor | E. E.* | t-valor | p-valor | Valor | E. E.* | t-valor | p-valor | Valor | E. E.* | t-valor | p-valor |
| Diámetro | CATIE-R1 | 8,3430 | 0,1045 | 79,8656 | <0,0001 | 3,1919 | 0,1551 | 20,5765 | <0,0001 | 0,0265 | 0,0004 | 71,4139 | <0,0001 |
| | CATIE-R4 | 8,8070 | 0,2180 | 40,3981 | <0,0001 | 2,8194 | 0,2177 | 12,9494 | <0,0001 | 0,0260 | 0,0008 | 32,8668 | <0,0001 |
| | CATIE-R6 | 8,6423 | 0,2817 | 30,6801 | <0,0001 | 2,9073 | 0,2776 | 10,4734 | <0,0001 | 0,0256 | 0,0009 | 29,8889 | <0,0001 |
| | TSH-565 | 9,5987 | 0,1690 | 56,8097 | <0,0001 | 11,8097 | 1,4317 | 8,2486 | <0,0001 | 0,0334 | 0,0010 | 34,5294 | <0,0001 |
| Longitud | CATIE-R1 | 16,2889 | 0,3028 | 53,7952 | <0,0001 | 2,5307 | 0,1856 | 13,6383 | <0,0001 | 0,0281 | 0,0006 | 46,7862 | <0,0001 |
| | CATIE-R4 | 16,9093 | 0,4610 | 36,6815 | <0,0001 | 2,0389 | 0,1584 | 12,8698 | <0,0001 | 0,0299 | 0,0003 | 90,4055 | <0,0001 |
| | CATIE-R6 | 15,5670 | 0,6369 | 24,4417 | <0,0001 | 1,9925 | 0,1970 | 10,1144 | <0,0001 | 0,0275 | 0,0008 | 34,0952 | <0,0001 |
| | TSH-565 | 24,4751 | 0,3810 | 64,2429 | <0,0001 | 5,0549 | 0,3957 | 12,7754 | <0,0001 | 0,0301 | 0,000001 | 40553.01 | <0,0001 |

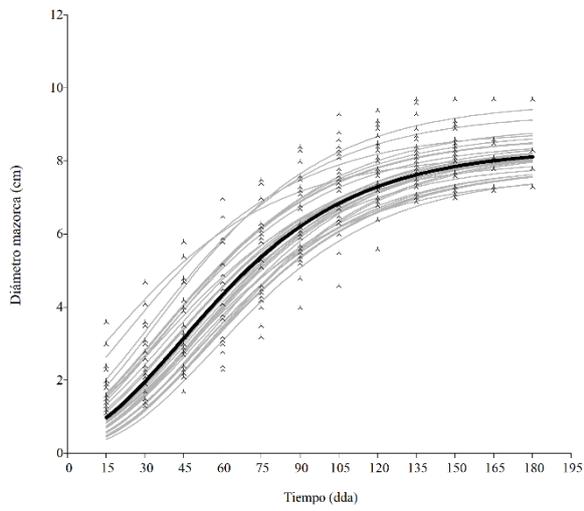
*E.E.: Error estándar

Finalmente, se graficaron las curvas de crecimiento de las mazorcas de cacao de los cuatro clones, donde los tiempos máximos que se presentan son de 180, 165, 165 y 195 para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565 respectivamente (Figura 6 y 7). Asimismo, es importante mencionar que estos tiempos no indican el tiempo en que la mazorca llegó a su madurez fisiológica, ya que algunas mazorcas iniciaron en tiempos posteriores a la medición inicial, es decir, después de los 15 días. Por esto mismo, se obtuvo diferente cantidad de curvas para cada clon.

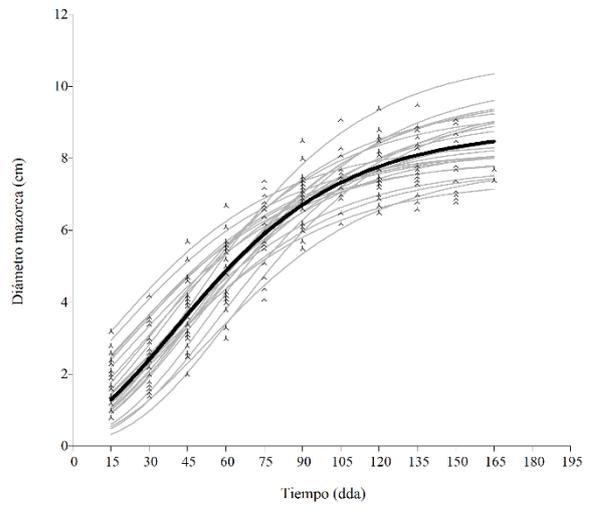
El patrón de crecimiento de los cuatro clones describió una curva de forma sigmoideal. Las curvas promedio muestran un incremento del crecimiento en centímetros a lo largo del tiempo (días), el cual se estabiliza a medida que se acerca el final del tiempo de evaluación, es decir; comienza con un crecimiento lento los primeros 30 a 45 días, luego un crecimiento rápido desde el día 60 hasta el día 105 o 120 aproximadamente y; finalmente, el crecimiento comienza a estabilizarse entre 4 a 6 semanas (dependiendo del clon) hasta que la mazorca es cosechada.

Las mazorcas del clon CATIE-R1 alcanzaron un valor estimado del diámetro al momento de la cosecha de 8,34 cm (Figura 6 a) y de 16,28 cm (Figura 7 a) a los 180 días. Para el clon CATIE-R4, se observa que el mismo alcanzó 8,80 cm (Figura 6 b) y 16,90 cm (Figura 7 b) a los 165 días. Mientras que el clon CATIE-R6 alcanzó 8,64 cm (Figura 6 c) y una longitud de 15,56 cm a los 165 días (Figura 7 c) y, por último, el clon TSH-565 con 9,59 cm de diámetro (Figura 6 d) y 24,47 cm de longitud a los 195 días (Figura 7 d). Estos valores están relacionados con los valores de α (asíntota superior de la curva) estimados para los distintos modelos. El parámetro β describe la relación con el valor del diámetro y longitud a los 30 días y el parámetro γ representa la velocidad de crecimiento del diámetro y la longitud.

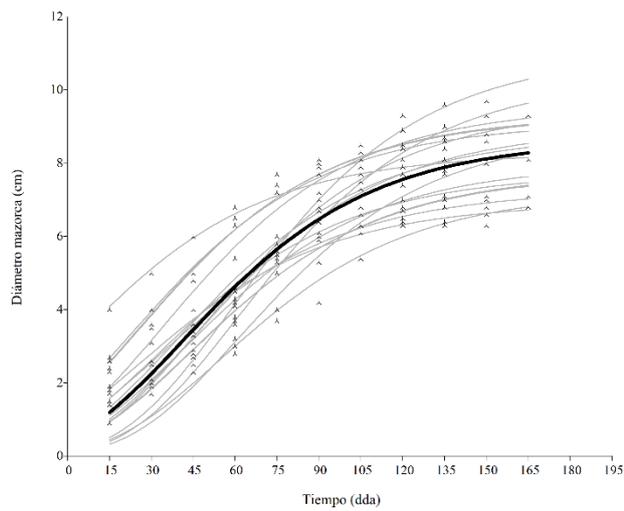
a) CATIE-R1



b) CATIE-R4



c) CATIE-R6



d) TSH-565

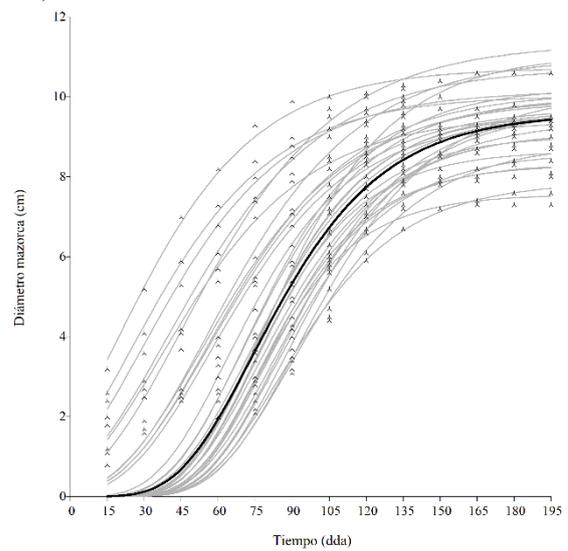


Figura 6. Curvas de crecimiento del diámetro de la mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) en función del tiempo en días para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565

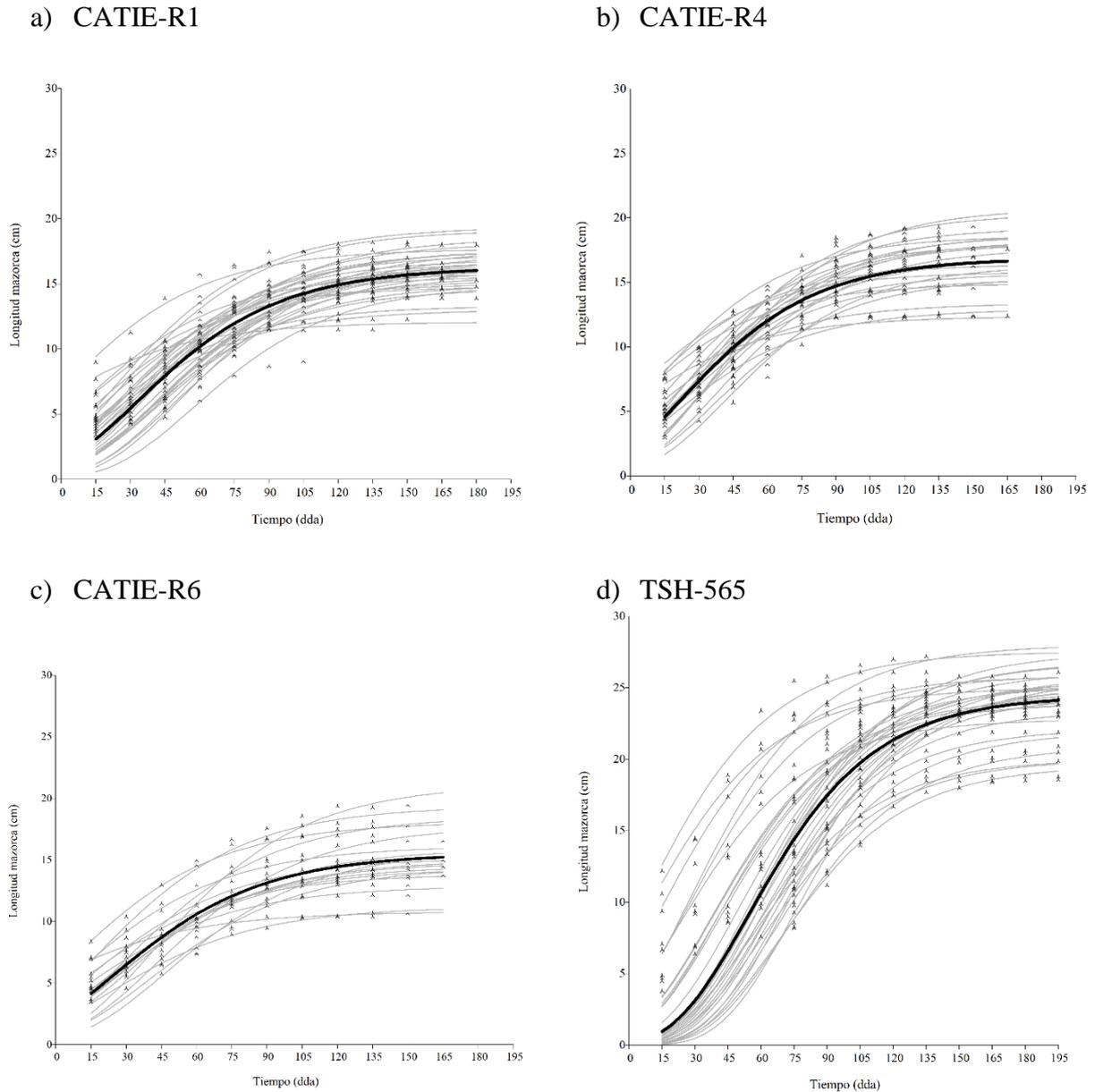


Figura 7. Curvas de crecimiento de la longitud de la mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) en función del tiempo en días para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565.

La colección de fotografías tomadas en este estudio permitió reconstruir las fases de crecimiento de cada clon (Figura 8) y observar los cambios morfológicos de una mazorca por clon en el tiempo. La mazorca del clon CATIE-R1 alcanzó su madurez fisiológica a los 150 días (Figura 8 a), CATIE-R4 a los 165 días (Figura 8 b), CATIE-R6 a los 120 días (Figura 8 c) y, por último, la mazorca del clon TSH-565 alcanzó su madurez a los 135 días aproximadamente (Figura 8 d). Sin embargo, se debe tomar en cuenta que estos datos pueden variar entre mazorcas del mismo clon según condiciones de sombra.

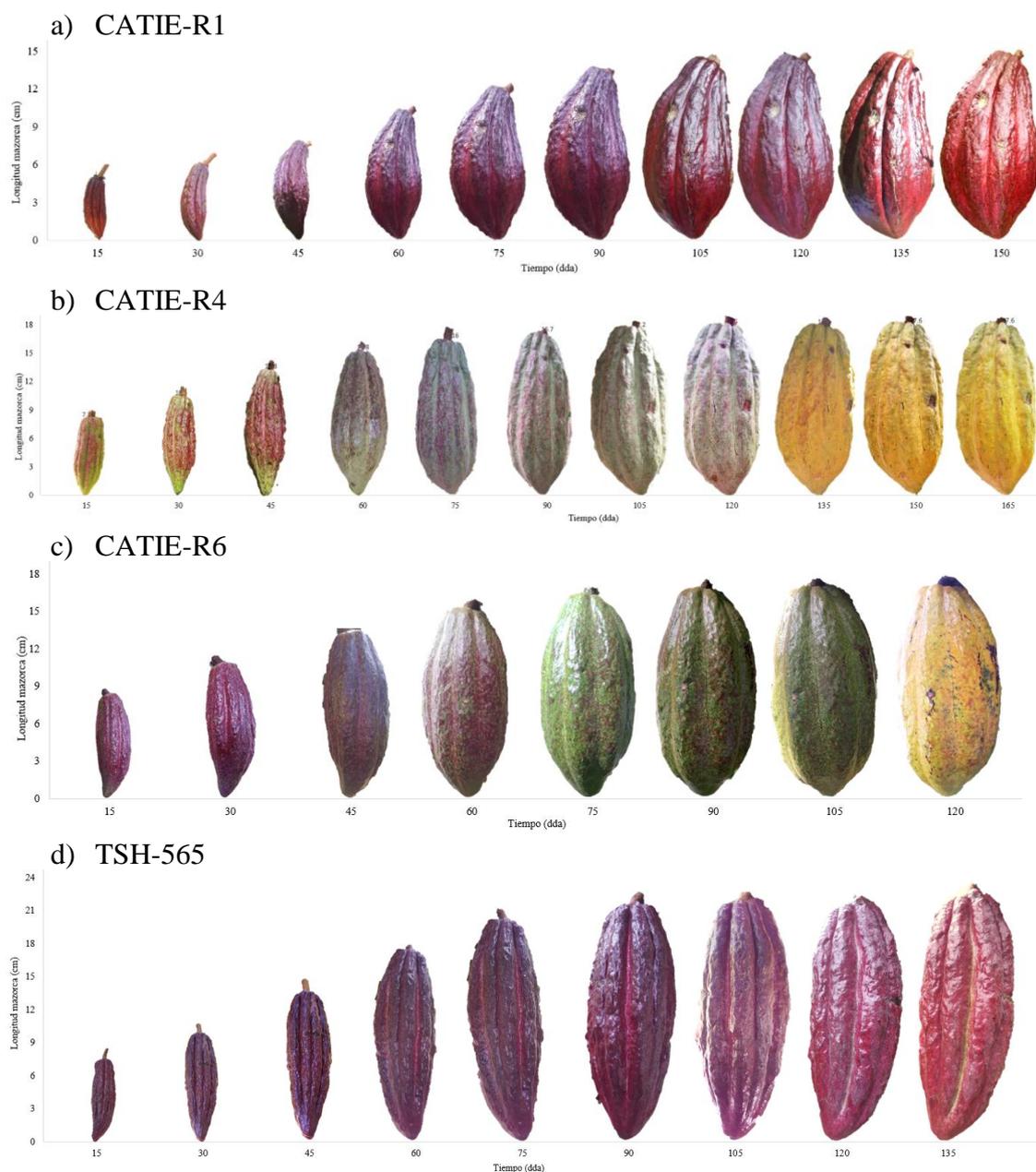


Figura 8. Representación del crecimiento longitudinal de la mazorca a través de tiempo (días) para cada clon.

3.3 Supervivencia

Se identificaron y midieron un total de 1005 mazorcas para los cuatro clones durante 195 días. Del total de mazorcas, se cosecharon 521 (52%) y 231 fueron afectadas (23%) por un complejo de PyE (ardilla, cherelle, insectos, pájaro carpintero, pizotes y *Phytophthora spp.*), las restantes 253 mazorcas se mantuvieron vivas y sanas (25%) al momento de finalizar el estudio.

La mayor afectación estuvo dada por cherelle y el ataque de ardillas y pizotes (Figura 9). Además, sobresale la afectación por ataque de pizotes en el clon TSH-565, así como el ataque por ardilla en el clon CATIE-R6 y la afectación por cherelle en los clones CATIE-R1 y CATIE-R4. También se encontró que el 60% de la carga de mazorcas ocurrió por debajo de los 1,5 m del tronco y el restante 40% ocurrió por arriba de los 1,5 m.

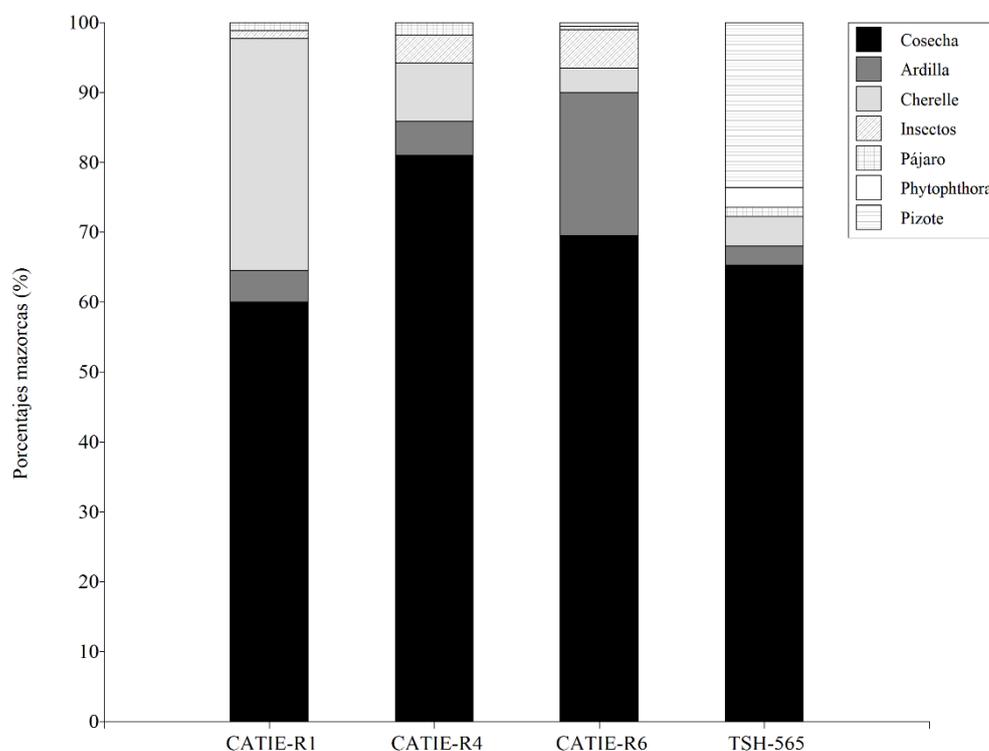


Figura 9. Porcentaje de mazorcas cosechadas y afectadas por plagas y enfermedades para cada clon en la Finca Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica

3.3.1 Curvas de sobrevivencia

Para evaluar la sobrevivencia de las mazorcas de cacao se realizaron curvas de sobrevivencia de Kaplan-Meier (KM) con las 1005 mazorcas estudiadas, de las cuales 326 son del con CATIE-R1, 281 de CATIE-R4, 274 de CATIE-R6 y 124 del clon TSH-565.

Primero, se estimaron las curvas de sobrevivencia según clon, encontrándose diferencias significativas ($p\text{-valor} \leq 0,0001$). En las curvas se puede observar que al inicio del estudio todos los clones tienen una probabilidad de sobrevivencia del 100%, pero a medida transcurre el tiempo (días) esa probabilidad va disminuyendo. También, se observó que, en los primeros días, el clon CATIE-R1 se separa rápidamente de los demás clones, disminuyendo su probabilidad de sobrevivencia a cerca de 0,8 a los 30 días y se mantiene por debajo de los demás durante todo el tiempo de evaluación, logrando una sobrevivencia de 0,62 desde el día 75 hasta el final del estudio.

En términos generales, el clon CATIE-R4 mostró mayor probabilidad de sobrevivencia, 0,82 al finalizar el estudio, manteniéndose por encima de los demás a partir de los 60 días. Por último, los clones CATIE-R6 y TSH-565 se separan del CATIE-R4 a los 60 días, mostrando una probabilidad de sobrevivencia intermedia, aunque a los 90 días el clon CATIE-R6 se separa mostrando menor probabilidad de sobrevivencia en comparación con los otros clones, quedando con una probabilidad de sobrevivencia de 0,70 aproximadamente al final del estudio y el clon TSH-565 con una probabilidad de sobrevivencia de 0,77 aproximadamente (Figura 10).

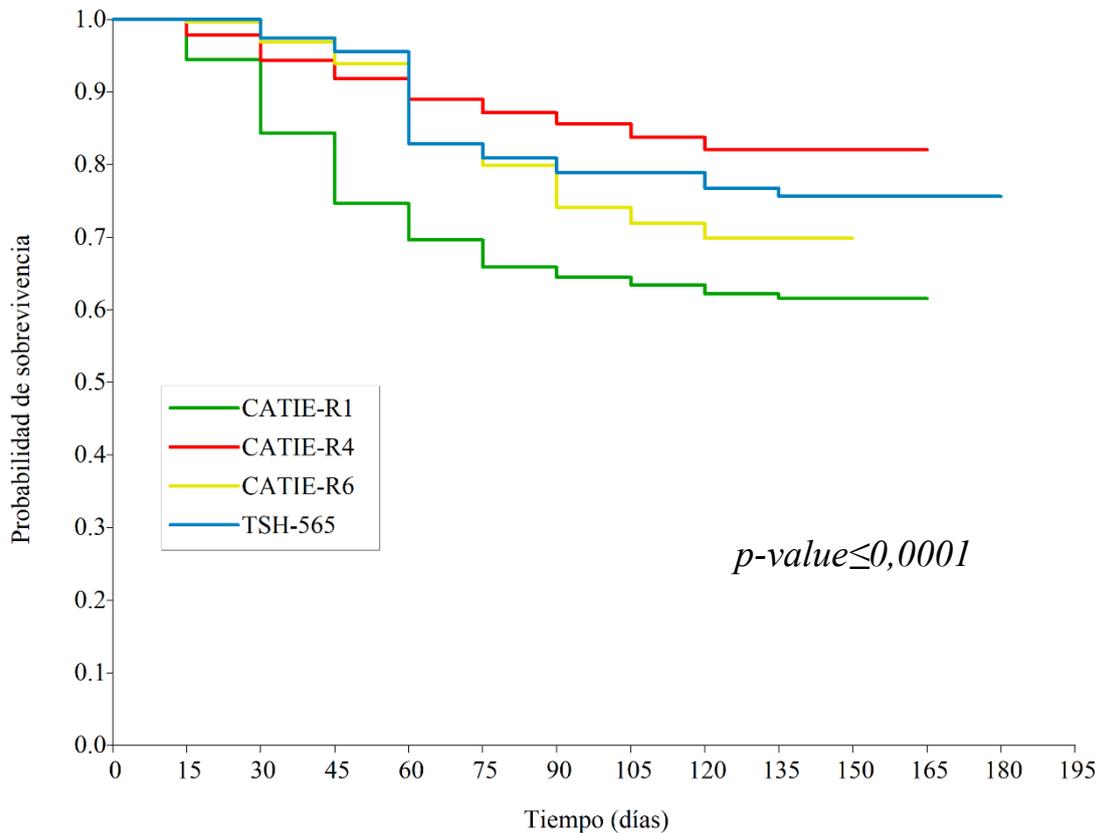


Figura 10. Curvas de sobrevivencia de los clones CATIE -R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565 utilizando el análisis de Kaplan-Meier.

Por otra parte, se exploró el efecto de la ubicación de la mazorca a lo largo del tronco (estrato alto y bajo) y de la topografía general del terreno (loma vrs semiplano) donde crece el árbol evaluado sobre la sobrevivencia de la mazorca por clon. Se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) de estrato para el clon CATIE-R4 ($p\text{-value} = 0,0272$), por otro lado, en cuanto a la topografía, se encontró diferencias significativas para el clon CATIE-R6 ($p\text{-value} = 0,0300$) (Tabla 10).

Tabla 10. Valores log rank y p-valor asociado del efecto de estrato y pendiente según clon. (Curvas de supervivencia de mazorcas de cacao)

| Clon | Estrato | | Topografía | |
|----------|----------|---------|------------|---------|
| | Log rank | p-valor | Log rank | p-valor |
| CATIE-R1 | 1,219 | 0,2695 | 1,933 | 0,1644 |
| CATIE-R4 | 8,982 | 0,0272 | 1,158 | 0,2819 |
| CATIE-R6 | 0,738 | 0,3903 | 4,706 | 0,0300 |
| TSH-565 | 0,333 | 0,5638 | NA | NA |

NA: No Aplica, este clon está ubicado en sitio plano del terreno de la finca Rausch Cacao

La supervivencia de las mazorcas ubicadas en el estrato bajo del árbol del clon CATIE-R4 mostró un valor de 0,9, superior al valor de supervivencia de aquellas mazorcas ubicadas en el estrato alto del árbol (Figura 11).

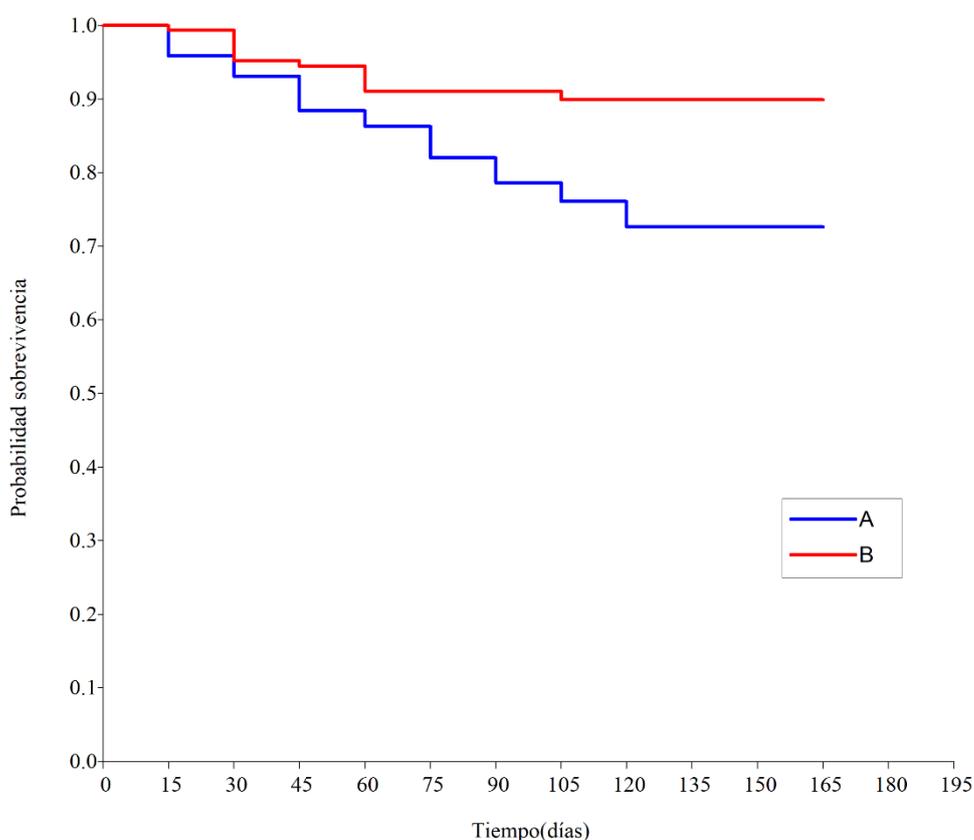


Figura 11. Representación gráfica del efecto del estrato del árbol sobre la probabilidad de supervivencia de las mazorcas del clon CATIE-R4 en función del tiempo (días). A=alto y B=Bajo.

El cuanto al clon CATIE-R6, se evidencia que luego de los 60 días, la probabilidad de supervivencia disminuyó en aquellas mazorcas que se encontraban en árboles ubicados en sitio semiplano (0,62), mientras que las mazorcas que se encontraron en árboles ubicados en loma tuvieron mayor probabilidad de supervivencia (0,75) (Figura 12).

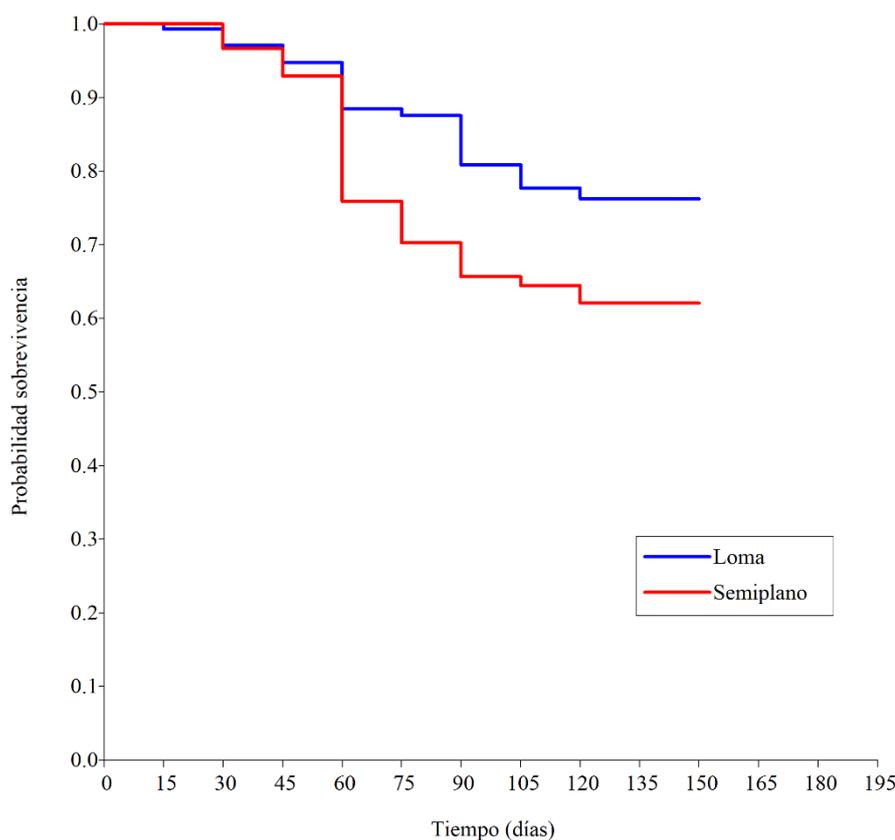


Figura 12. Representación gráfica del efecto de la topografía general de la parcela (semiplano y loma) sobre la probabilidad de supervivencia de las mazorcas del clon CATIE-R6 en función del tiempo (días).

3.4 Comparación de métodos de estimación

Se realizó la comparación entre los métodos UTZ y CSC, tomando en cuenta los supuestos mencionados anteriormente. Para su comparación se unieron las tablas, donde se identifica cada método y el clon en el caso del método CSC, el cual considera el IM y el clon, mientras que el método UTZ se basa en la carga de mazorcas por árbol y utiliza factores de conversión de mazorcas a grano seco. El método CSC se realizó con la misma cantidad de árboles, pero consistió en dividir el número total de mazorcas entre el IM correspondiente al clon para obtener el volumen de grano, luego se multiplicó por el número de árboles de ese clon creciendo en 1 ha de terreno según registros de la finca. Finalmente, este valor se multiplica por la probabilidad condicionada al tiempo 90, cuando la mazorca tiene una edad fisiológica de unos tres meses de edad, esto con el fin de realizar la comparación con el método UTZ. En términos generales, el método de estimación de cosecha UTZ comparado con el método CSC en la finca Rausch Cacao consistentemente sobreestima la proyección de cosecha para los clones CATIE-R1, CATIE-R6 y TSH-565 por el orden de 135,4%, 52,1% y 77,4% respectivamente (Tabla 11). Para el caso del clon CATIE-R4, UTZ subestima la cosecha en un 38,9%.

Tabla 11. Valores medios de los rendimientos obtenidos para cada uno de los clones. Método utilizado por la Certificadora UTZ. Método de las Curvas de Supervivencia por Clon (CSC) para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565

| Método UTZ | | | | | | | | Clon CATIE-R1 | | | | | | |
|-------------|------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------------|--|-------------------------|
| Método UTZ | | | | | | | | Método CSC | | | | | | |
| Categoría | # mazorcas/árbol | # de árboles muestreados | Factor de conversión (kg/año) | Volumen de grano (kg seco) | Rendimiento (kg/ha/total de árboles) * | Factor de descuento por PyE (%) | Rendimiento cacao (kg/ha/año) | # de árboles muestreados | # mazorcas totales | Índice de mazorca (IM) | Volumen de grano (kg seco) | Rendimiento (kg/ha) ¹ | Probabilidad condicionada de supervivencia | Rendimiento (kg/ha/año) |
| Alto rend. | ≥20 | 0 | ±1 | 0 | 45,9 | 20% | 36,72 | 16 | 42 | 29 | 1,45 | 18,5 | 0,95 | 15,6 |
| Rend. medio | 11-20 | 1 | ±0,6 | 1x0,6=0,6 | | | | | | | | | | |
| Bajo rend. | ≤10 | 15 | ±0,20 | 15x0,20=3 | | | | | | | | | | |
| Total | | 16 árboles | | 3,6 kg | | | | | | | | | | |
| Método UTZ | | | | | | | | Clon CATIE-R4 | | | | | | |
| Método UTZ | | | | | | | | Método CSC | | | | | | |
| Categoría | # mazorcas/árbol | # de árboles muestreados | Factor de conversión (kg/año) | Volumen de grano (kg seco) | Rendimiento (kg/ha/total de árboles) * | Factor de descuento por PyE (%) | Rendimiento cacao (kg/ha/año) | # de árboles muestreados | # mazorcas totales | Índice de mazorca (IM) | Volumen de grano (kg seco) | Rendimiento (kg/ha) ² | Probabilidad condicionada de supervivencia | Rendimiento (kg/ha/año) |
| Alto rend. | ≥20 | 0 | ±1 | 0 | 35 | 20% | 28 | 11 | 54 | 18 | 3 | 47,7 | 0,96 | 45,8 |
| Rend. medio | 11-20 | 0 | ±0,6 | 0 | | | | | | | | | | |
| Bajo rend. | ≤10 | 11 | ±0,20 | 11x0,20=2,2 | | | | | | | | | | |
| Total | | 11 árboles | | 2,2 kg | | | | | | | | | | |
| Método UTZ | | | | | | | | Clon CATIE-R6 | | | | | | |
| Método UTZ | | | | | | | | Método CSC | | | | | | |
| Categoría | # mazorcas/árbol | # de árboles muestreados | Factor de conversión (kg/año) | Volumen de grano (kg seco) | Rendimiento (kg/ha/total de árboles) * | Factor de descuento por PyE (%) | Rendimiento cacao (kg/ha/año) | # de árboles muestreados | # mazorcas totales | Índice de mazorca (IM) | Volumen de grano (kg seco) | Rendimiento (kg/ha) ³ | Probabilidad condicionada de supervivencia | Rendimiento (kg/ha/año) |
| Alto rend. | ≥20 | 0 | ±1 | 0 | 31 | 20% | 24,8 | 10 | 27 | 24 | 1,12 | 17,36 | 0,94 | 16,3 |
| Rend. medio | 11-20 | 0 | ±0,6 | 0 | | | | | | | | | | |
| Bajo rend. | ≤10 | 10 | ±0,20 | 10x0,20=2 | | | | | | | | | | |
| Total | | 10 árboles | | 2 kg | | | | | | | | | | |
| Método UTZ | | | | | | | | Clon TSH-565 | | | | | | |
| Método UTZ | | | | | | | | Método CSC | | | | | | |
| Categoría | # mazorcas/árbol | # de árboles muestreados | Factor de conversión (kg/año) | Volumen de grano (kg seco) | Rendimiento (kg/ha/total de árboles) * | Factor de descuento por PyE (%) | Rendimiento cacao (kg/ha/año) | # de árboles muestreados | # mazorcas totales | Índice de mazorca (IM) | Volumen de grano (kg seco) | Rendimiento (kg/ha) ⁴ | Probabilidad condicionada de supervivencia | Rendimiento (kg/ha/año) |
| Alto rend. | ≥20 | 0 | ±1 | 0 | 49 | 20% | 39,2 | 10 | 18 | 19 | 0,94 | 23,03 | 0,96 | 22,1 |
| Rend. medio | 11-20 | 0 | ±0,6 | 0 | | | | | | | | | | |
| Bajo rend. | ≤10 | 10 | ±0,20 | 10x0,20=1,8 | | | | | | | | | | |
| Total | | 10 árboles | | 2 kg | | | | | | | | | | |

¹204 árboles en 1 ha; ²175 árboles en 1ha; ³155 árboles en 1 ha; ⁴245 árboles en 1 ha. Estos valores son en base al arreglo establecido en la finca. *Este resultado en hectáreas.

4. Discusión

4.1 Arquitectura de los árboles

Los árboles de los clones CATIE-R4 y CATIE-R6 se encuentran clasificados en el catálogo de clones de cacao seleccionados por el CATIE para siembras comerciales como árboles de porte intermedio y follaje denso y proceden de los mismos padres (“UF-273 T1 X PA-169”), por lo tanto, se comportan similar (Phillips-Mora *et al.* 2012). Esto se confirma con los datos obtenidos por Arciniegas (2005), donde indica que valores altos en variables como diámetro tienen como progenitores en algunos de los casos al PA-169. Por otra parte, los árboles de los clones CATIE-R1 y TSH-565 son clasificados como árboles de porte bajo con follaje moderado. Esta descripción de la arquitectura de árboles coincide con las medidas de tamaño/ forma de los árboles de cacao evaluados y cultivados en la finca Rausch Cacao.

4.2 Crecimiento de las mazorcas de cuatro clones de cacao

El modelo de crecimiento de Gompertz logró describir la longitud y el diámetro de la mazorca de cacao en el tiempo para todos los clones. La modelación de la falta de independencia permitió validar los supuestos distribucionales de los errores para mejorar la calidad de ajuste y proporcionar estimaciones consistentes de los parámetros. Asimismo, Prado *et al.* (2013) en la descripción de los frutos de coco de la variedad enana y Muniz *et al.* (2017) evaluaron el crecimiento de la mazorca de cacao, y encontraron estimaciones más precisas de los parámetros de los modelos logístico y Gompertz, considerando autocorrelación de residuos; también indican que tomar en cuenta esta estructura de correlación temporal, cuando es necesario, conduce a una reducción significativa de la desviación estándar residual, lo que hace que las estimaciones sean más confiables. Además, el modelo de Gompertz ha sido utilizado por muchos autores como Hoopen *et al.* (2012), Vieira da Silva y Savia (2019) y Goudsmit *et al.* (2023).

Al analizar el patrón de crecimiento de las CC (Figuras 6 y 7), se encontró que describe una curva de tipo sigmoideal (Parés-Casanova y Kucherova 2014) y que el desarrollo de la mazorca de cacao comienza con una fase de crecimiento lento (entre 30 a 60 dda, división y desarrollo del embrión), seguido de una fase de crecimiento rápido o acelerado (crecimiento del embrión) hasta que el embrión consume rápidamente el endospermo gelatinoso del óvulo (varió entre clones, 120 a 150 días) (Niemenak *et al.* 2010) y cesa el crecimiento del embrión, dando paso a la maduración, la cual varió entre los clones de cacao (Hoopen *et al.* 2012) y finalmente, la curva se estabiliza hasta que la mazorca es cosechada (Muniz *et al.* 2017). Esta es una característica muy común en estudios de crecimiento realizadas en el tiempo, donde el valor de la variable dependiente se aproxima a una constante que no es cero (Mangueira *et al.* 2022; Vieira da Silva y Savia 2019).

En investigaciones recientes Vieira da Silva y Savia (2019), registraron valores máximos de 9,47 cm para diámetro y 11,26 cm para longitud para el parámetro α . Igualmente, Muniz *et al.* (2017), en su investigación, reportan valores del crecimiento de la mazorca

de cacao de 11,04 cm para longitud y 8,95 cm para diámetro, con el modelo Gompertz. Mientras que Hoopen *et al.* (2012) obtuvieron que la longitud de la mazorca varió de 14,2 cm a 18,3 cm y el diámetro varió de 7,69 cm a 8,96 cm. La mayoría de estos valores se encuentran dentro de los rangos obtenidos en este estudio, con excepción de la longitud en algunos casos. En cuanto al parámetro β , Vieira da Silva y Savia (2019) obtuvieron longitudes de 3,21 cm y 4,26 cm de diámetro, encontrándose dentro de los distintos valores encontrados para los diferentes clones en este estudio que variaron entre 1,99 cm a 5,05 para longitud y de 2,81 cm a 11,81 cm para diámetro. Otros autores registraron que el parámetro γ está relacionado con la velocidad de crecimiento (Hidalgo *et al.* 2021; Hoopen *et al.* 2012; Muniz *et al.* 2017).

4.3 Incidencia de Plagas y Enfermedades (PyE)

Las pérdidas de mazorcas registradas en este estudio fueron ocasionadas mayormente por plagas como ardillas, pizotes, insectos, pájaros, lo cual estuvo fuertemente influenciado por las condiciones del micrositio, así como la proximidad a parches de bosque (hábitats de roedores y pájaros), por lo tanto, no pueden extrapolarse a otras fincas. En cuanto a las enfermedades, los resultados demuestran que se registró una baja incidencia de mazorca negra (5%) en las mazorcas del clon TSH-565, difiriendo con los resultados obtenidos por Ramírez *et al.* (2016), que encontró que el porcentaje de incidencia de esta enfermedad y para el mismo clon fue de un 23%. Cabe resaltar, que aún no se reportan en la finca, enfermedades como la moniliasis (*Moniliophthora roreri* Cif & Par), escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*), llaga estrellada o podredumbre negra de la raíz (*Rosellinia pepo*), entre otras; que ocasionan pérdidas entre el 50% y el 80% de los frutos a nivel mundial (Leandro-Muñoz *et al.* 2017; Phillips-Mora y Cerda 2011). Sin embargo, la mazorca negra se ha registrado como una amenaza de gran importancia (Takan *et al.* 2013; Ramírez 2016). En resumen, los clones CATIE-R1, CATIE-R4 y CATIE-R6 evidencian su resistencia a mazorca negra (Phillips-Mora *et al.* 2012).

4.4 Probabilidad de sobrevivencia de las mazorcas

Por otra parte, se encontraron diferencias estadísticas (p -valor $\leq 0,0001$) en las curvas de sobrevivencia de las mazorcas por clon utilizando el estimador de Kaplan-Meier (KM), indicando que algunos clones tienen mayor probabilidad de sobrevivir a lo largo del tiempo que otros. Kaplan-Meier es un método estadístico muy utilizado en el análisis de datos de tiempo hasta el evento en particular (Etikan *et al.* 2017), no obstante; es poca la información de la aplicación de este método para la sobrevivencia de mazorcas de cacao, pese a esto; es aplicado en estudios relacionados con la planta de cacao. Anokye *et al.* (2021), son un claro ejemplo; explorando el impacto del potasio aplicado en el crecimiento y las funciones fisiológicas de un conjunto diverso de variedades de cacao bajo estrés por humedad, mediante estimación de curvas de sobrevivencia de las plántulas de cacao, demostraron que la aplicación de potasio es más importante para la sobrevivencia de las plantas bajo sequía que el efecto de las variedades (p -valor = 0,2301).

Asimismo, este método es utilizado para análisis de sobrevivencia en pacientes con cáncer u otra enfermedad (Rivas-Ruiz *et al.* 2014); así como para la mortalidad de plantas en otros cultivos. García (2012), lo aplicó en un estudio de la mortalidad en injertos realizados en plantas de inchi (*Caryodendron orinocense* Karsten) en Venezuela, debido a que observó alta mortalidad en los injertos y requería identificar el nivel de cada factor evaluado sobre la mortalidad, obteniendo que el sexo de la planta donadora no tiene efecto sobre la mortalidad ($p = 0,6093 > 0,05$).

Además, el análisis KM utiliza la prueba de hipótesis basada en el estadístico log rank, la cual sigue una distribución chi-cuadrado, esta prueba proporciona una comparación general de las curvas graficadas, ya sea por cada una de las categorías o a veces para todo el conjunto de datos que se están analizando (Kleinbaum y Klein 2012), en este estudio se obtuvo un valor log-rank test=35,258 asociado al p-valor de las curvas de sobrevivencia de los cuatro clones.

Por último, el análisis KM brinda la tabla de las probabilidades de sobrevivencia, las cuales tienen un aporte práctico importante al momento de aplicar el método de estimación de cosecha propuesto en este estudio: Curvas de Sobrevivencia por Clon (CSC). La probabilidad condicional indica la probabilidad de que una mazorca sobreviva en el final del intervalo condicionada a que es un sobreviviente en el comienzo de este (Kleinbaum y Klein 2012), es decir, que se puede conocer la probabilidad de sobrevivir en el tiempo 90, que es cuando la mazorca tiene aproximadamente 3 meses de edad y así sucesivamente para el tiempo de interés (Tabla 12).

4.5 Método propuesto para mejorar la estimación de cosecha en finca

El método propuesto les facilitará a los productores, equipos técnicos y gerentes de fincas comerciales obtener una estimación de cosecha con mayor precisión, ya que el método se basa en la probabilidad de sobrevivencia de cada uno de los clones establecidos. Asimismo, contribuirá a la planificación de las actividades logísticas y operativas, y apoyará la toma de decisiones con respecto a los factores de producción y requerimiento de mano de obra y logística de comercialización.

De momento, no se realizó la validación del método CSC contra datos reales de registros de cosecha por clon y lote, por lo tanto, será una de las recomendaciones, debido a la importancia de la información fiable, siendo un elemento esencial en cualquier actividad, especialmente en la cacaocultura, donde los riesgos y las incertidumbres son elevados (dos Santos y Ramos 2016). Sin embargo, se plantean una serie de mejoras al método para lograr replicarlo en otros sitios, como entrenamiento de personal, tener un registro confiable de la cosecha por clon y de la cantidad de plantas establecidas por hectárea y llevar un registro de las variables climáticas de la zona (temperatura, humedad relativa y precipitación) para correlacionar la dinámica productiva de los clones a lo largo del ciclo agrícola.

5. Conclusiones

Con los resultados de esta investigación se puede inferir que el conocimiento de las curvas de crecimiento de la mazorca de cacao de los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565 ayudan a predecir con suficiente antelación, el tamaño de los frutos al momento de la cosecha y por ende la producción para planear estrategias de comercialización tanto para el mercado interno como externo (Hidalgo *et al.* 2021). También brindan información para mejorar el momento y la frecuencia de las aplicaciones de los fertilizantes (Hoopen *et al.* 2012), así como a conocer el tiempo de maduración de las mazorcas de cacao, el cual puede variar según el clon.

Por otra parte, la afectación general de mazorcas por el complejo de PyE resultó cercano al factor de descuento utilizado en la metodología UTZ, sin embargo; quedó un remanente de mazorcas vivas y sanas al finalizar el estudio que no se le dio seguimiento. Por lo tanto, es importante aclarar, que esto puede variar de acuerdo con las características y condiciones ambientales propias de cada finca, por consiguiente; los datos obtenidos en este estudio no pueden extrapolarse a otras fincas, debido a la variabilidad de las condiciones agroclimáticas y manejo agronómico en cada sitio.

Por otro lado, las curvas de sobrevivencia por clon permiten obtener ese factor de descuento clon-específico para utilizar la metodología CSC en combinación con el IM, así como conocer las probabilidades de sobrevivencia utilizando otros factores como la posición de la mazorca en el árbol o la topografía donde se encuentran los árboles, entre otras variables que sean de interés. La metodología CSC en comparación con la metodología UTZ, resultó ser un instrumento fácil de aplicar en campo y muy flexible, ya que permite estimar la cosecha según el momento de interés, mediante la utilización de la probabilidad condicionada de sobrevivencia y sobre todo apunta a mejorar ese factor de descuento utilizado por la UTZ.

6. Recomendaciones

Los resultados obtenidos a partir de esta investigación no pueden generalizarse a otros ambientes, ni a otras fincas, por lo cual se recomienda corroborar los mismos bajo condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa, precipitación, altitud, entre otros.) diferentes a la zona de estudio. Al mismo tiempo, se sugiere evaluar las variables climáticas y en la medida de lo posible realizar la evaluación tanto de estas variables como de la sobrevivencia de las mazorcas por un año o dos años consecutivos si es posible, debido a el comportamiento de las enfermedades ante los cambios de estación.

Por otra parte, al momento de hacer uso del método factor de descuento por CSC, es necesario conocer el IM por clon (Sánchez-Mora *et al.* 2014). Por lo tanto, se plantean dos sugerencias tomando en cuenta las fincas que conocen los materiales que tienen establecidos y las fincas que los desconocen. Para el primer caso, se sugiere calcular el IM para cada clon y en cada pico de cosecha; y si se requiere mayor precisión ajustar en función de la edad de la planta. Para el segundo caso, se recomienda calcular un IM

general para todos genotipos de la finca y en la medida de lo posible realizarlo por cada pico de cosecha. También, es importante tomar en cuenta el tipo de cultivar, es decir; si se trata de un híbrido o un clon, ya que la diferencia en términos de productividad es notoria entre ambos.

El método propuesto sugiere realizar en campo el conteo de mazorcas en dos ocasiones, la primera durante el pico de cosecha principal y la segunda durante el pico secundario y luego aplicar el factor de descuento derivado de la CSC.

Por último, se propone validar el método propuesto contra registros reales de cosecha a nivel de finca y lote y se insta a las certificadoras y otros actores de la cadena a apoyar este tipo de estudios en otras zonas con otros clones, para ajustar los métodos actuales de estimación de cosecha a diferente agro-ambientes y cacaotales.

7. Implicaciones

Las curvas de crecimiento de los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y TSH-565 se convierten en una herramienta para los productores de cacao de la zona de estudio, para la estimación del momento óptimo de cosecha, lo que a su vez va a mejorar la fase de fermentación y calidad sensorial del producto final. Asimismo, permitirán al productor conocer y planificar las labores fitosanitarias del cacao que le permitirá tomar medidas preventivas para proteger las mazorcas y lograr cosecharlas, por ende; mejorar el rendimiento de su finca.

8. Bibliografía

- Anokye, E; Lowor, S; Dogbatse, JA; Padi, FK. 2021. Potassium Application Positively Modulates Physiological Responses of Cocoa Seedlings to Drought Stress. *Agronomy* (11) 563:2-19p. DOI: [10.3390/agronomy11030563](https://doi.org/10.3390/agronomy11030563) Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/350145661>
- dos Santos, LP; Ramos, R. 2016. MÉTODO DE ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE CACAU NO ANO CIVIL NA REGIÃO CACAUEIRA BAIANA. Centro de Pesquisas do Cacau, Ilhéus, Bahía, Brasil. *Agrotrópica* 28(3): 247-252p. DOI 10.21757/0103-3816.2016v28n3p247-252
- Etikan, I; Abubakar, S; Alkassim, R. 2017. The Kaplan Meier Estimate in Survival Analysis. *Biometrics & Biostatistics International Journal* 5(2):55-59p. DOI:10.15406/bbij.2017.05.00128. Disponible en <https://medcraveonline.com/BBIJ/BBIJ-05-00128.pdf>
- Fountain, AC; Hütz-Adams, F.2022. 2022 Cocoa Barometer. Disponible en <https://cocoabarometer.org/wp-content/uploads/2022/12/Cocoa-Barometer-2022.pdf>

- García, JJ. 2012. Análisis de supervivencia aplicado al estudio de la mortalidad en injertos de inchi (*Caryodendron orinocense* Karsten). Revista Científica UDO Agrícola 12 (4):759-769p. Disponible en <http://www.bioline.org.br/pdf?cg12087>
- Goel, MK; Khanna, P; Kishore, J. 2010. Understanding survival analysis: Kaplan-Meier estimate. International Journal of Ayurveda Research 1(4):274-278p. DOI:10.4103/0974-7788.76794. Disponible en <file:///C:/Users/Administrator/Downloads/LECTURAS%20TESIS/IJAR-1-274.pdf%20KUMAR%20ET%20AL.%202011.pdf>
- González, J; Rodríguez, O; De La Cruz, J; Almonte, J. 2015. Evaluación de tres densidades de plantación de cacao y dos arquitecturas provenientes de reproducción asexual. Revista APF 4(2): 7-12. Disponible en http://www.sodiaf.org.do/revista/sodiaf/vol4_n2_2015/ARTÍCULO/07_12_APF_V04_N02_2015.pdf
- Goudsmit, E; Rozendaal, DMA; Tosto, A; Slingerland, M. 2023. Effects of fertilizer application on cacao pod development, pod nutrient content and yield. ELSEVIER Scientia Horticulturae Vol. 313:1-15p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111869>
- Hidalgo, MJ; Bóbeda, GRR; Chabbal, MD; Ponce de León, LM; Giménez, LI. 2021. Modelos de Crecimiento de Frutos de Limonero 'Eureka' de la Provincia de Corrientes, Argentina. Agrotecnia 31: 23-30p. ISSN: 2545 - 8906 DOI: <http://dx.doi.org/10.30972/agr.0315812>
- Hegmann, E; Pérez, E. 2022. Comunicación personal. Gerente general y personal técnico de la Finca Rausch Cacao, Tres Equis, Turrialba, Costa Rica.
- Hoopen, GM; Deberd, P; Mbenoun, M; Cilas, C. 2012. Modelling cacao pod growth: implications for disease control. Annals of Applied Biology 160:260–272. ISSN 0003-4746. Doi:10.1111/j.1744-7348.2012.00539.x. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/258241090>
- Hütz-Adams, F; Campos, P; Fountain, AC. 2022. Latin America Baseline Cocoa Barometer 2022. Disponible en <https://voicenetwork.cc/wp-content/uploads/2022/09/220923-Cocoa-Barometer-Americas.pdf>
- Kleinbaum, DG; Klein, M. 2012. Survival Analysis. Springer. USA. ISBN 978-1-4419-6645-2. DOI 10.1007/978-1-4419-6646-9. Disponible en https://www.academia.edu/43332155/Survival_Analysis_A_Self_Learning_Text_Third_Edition
- Leandro-Muñoz, ME; Tixier, P; Germon, A; Rakotobe, V; Phillips-Mora, W; Maximova, S, Avelino, J. 2017. Effects of microclimatic variables on the symptoms and signs onset of *Moniliophthora roreri*, causal agent of *Moniliophthora* pod rot in cacao. PLoS ONE 12(10): e0184638. Costa Rica. Disponible en <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184638>

- Mangueira, RA; Silva, V; Martins, W. 2022. Description of the growth curve of the biquinho-type pepper plant under water stress. *Ciencia Natura*. ISSN 2179-460X. DOI <https://doi.org/10.5902/21799460x65803/>
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica); PNUMA (Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2022. PLAN DE ACCIÓN PARA LA ADAPTACIÓN CLIMÁTICA CANTÓN TURRIALBA. 200 p. Consultado 3 diciembre 2022. Disponible en [https://www.muniturrialba.go.cr/docs/emergencias/Informes%20Tecnicos/210209 PlanA_RT-1 Turrialba.pdf](https://www.muniturrialba.go.cr/docs/emergencias/Informes%20Tecnicos/210209%20PlanA_RT-1_Turrialba.pdf)
- Muniz, JA; Silva, M; Fernandes, TJ. 2017. NONLINEAR MODELS FOR DESCRIPTION OF CACAO FRUIT GROWTH WITH ASSUMPTION VIOLATIONS. *Revista Caatinga* 30(1): 250-257p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n128rc>
- Niemenak, N; Cilas, C; Rohsio, C; Bleiholder, H; Meier, U; Lieberei, R. 2010. Phenological growth stages of cacao plants (*Theobroma* sp.): codification and description according to the BBCH scale. *Research Gate*. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/227664839>
- Ngoune, L; Mutengwa, C. 2019. Estimation of Maize (*Zea mays* L.) Yield Per Harvest Area: Appropriate Methods. *Agronomy* 10(29):1-18p. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy1001002>
- Orozco-Aguilar, L; Ayestas, E; Lopez, A; Leandro, M; Laube, G; Hidalgo, Z; Bordeaux, M; Cerda, R; Mata, A; Dessauw, D; Martorell, J; Cacao, R; Rojas, L; Ramirez, O; Rojas, J. 2020. Evaluación de curvas de sobrevivencia de mazorcas (Cocoa Yield). Protocolo. 17p. Disponible en <https://www.researchgate.net/profile/Luis-Orozco-Aguilar/publications>
- Parés-Casanova, PM; Kucherova, I. 2014. COMPARISON OF NONLINEAR MODELS TO DESCRIBE GROWTH CURVES IN THE CATALAN GOAT. *Rev Inv Vet Perú* 25(3): 390-398. Disponible en <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/veterinaria/article/view/10117/8857>
- Phillips-Mora, W; Arciniegas-Leal, A; Mata-Quirós, A; Motamayor-Arias, JC. 2012. Catálogo de clones de cacao seleccionados por el CATIE para siembras comerciales. Serie técnica. Manual técnico no.105. 1 ed. ISBN 978-9977-57-571-1. Turrialba, C.R. Disponible en [https://www.cacaonet.org/fileadmin/templates/CacaoNet/Uploads/publications/Catalogo Clones ESPAN%CC%83OL.pdf](https://www.cacaonet.org/fileadmin/templates/CacaoNet/Uploads/publications/Catalogo_Clones_ESPAN%CC%83OL.pdf)
- Phillips-Mora, W; Cerda, R. 2011. Catálogo enfermedades del cacao en Centroamérica. Serie técnica. Manual técnico no. 93. Turrialba, C.R. ISBN 978-9977-57-501-8. 24p. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/H20-10877.PDF>
- Phillips-Mora, W; Mata-Quirós, A; Arciniegas-Leal, A. 2017. GENERATION OF CACAO CLONES WITH DURABLE RESISTANT AGAINST FROSTY POD

- ROT (Moniliophthora roreri (Cif. & Par.) Evans et al.). ResearchGate. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/325908471>
- Prado, TK ; Savian, T ; Muniz, J. 2013. Ajuste dos modelos Gompertz e Logístico aos dados de crescimento de frutos de coqueiro anão verde The fit Gompertz and Logistic models to the growth data of green dwarf coconut fruits. *Ciência Rural*, Santa Maria 43(5) : 803-809p. ISSN 0103-8478. Disponible en <https://www.scielo.br/j/cr/a/RH4VF3XhBNV4vwf5jW8WPkb/?lang=pt>
- Ramírez, JG. 2016. Pérdidas económicas asociadas a la pudrición de la mazorca del cacao causada por *Phytophthora* spp., y *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans et al., en la hacienda Theobroma, Colombia. *Rev. Protección Veg.* Vol. 31(1):42-49p. ISSN: 2224-4697. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/rpv/v31n1/rpv06116.pdf>
- Rivas-Ruiz, R; Pérez-Rodríguez, M; Palacios, L; Talavera, JO. 2014. Clinical research XXI. From the clinical judgment to survival analysis. México. *Rev Med Inst Mex Seguro Soc.* 52(3):308-15. Disponible en <https://www.medigraphic.com/pdfs/imss/im-2014/im143o.pdf>
- Sánchez-Mora, F; Zambrano,J; Vera, J; Ramos, R; Gárces, F; Vásconez, G. 2014. PRODUCTIVIDAD DE CLONES DE CACAO TIPO NACIONAL EN UNA ZONA DEL BOSQUE HÚMEDO TROPICAL DE LA PROVINCIA DE LOS RÍOS, ECUADOR. *Ciencia y Tecnología* 7(1): 33-41p. ISSN 1390-4051 impreso; ISSN 1390-4043 electrónico. Disponible en <file:///C:/Users/Administrator/Downloads/Dialnet-ProductividadDeClonesDeCacaoTipoNacionalEnUnaZonaD-5070159.pdf>
- Somarriba, E; Beer, J; Alegre-Orichuela, J; Andrade, HJ; Cerda, R; DeClerck, F; Detlefsen, G; Escalante, M; Giraldo, LA; Ibrahim, M; Krishnamurthy, L; Mena-Mosquera, VE; Mora-Degado, JR; Orozco, L; Scheelje, M; & Campos, JJ. 2012. Mainstreaming agroforestry in Latin America. In P. K. R. Nair & D. Gerrity (eds.), *Agroforestry- The Future of Global Land Use, Advances in Agroforestry* 9. Springer: 429-453p. DOI 10.1007/978-94-007-4676-3_21 Disponible en https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4676-3_21
- Somarriba, E; López-Sampson, A. 2018. Coffee and Cocoa Agroforestry Systems: Pathways to Deforestation, Reforestation, and Tree Cover Change. 49p. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/332591520_Coffee_and_Cocoa_Agroforestry_Systems_Pathways_to_Deforestation_Reforestation_and_Tree_Cover_Change
- Tahi, GM; N’Goran, JAK; Souunigo, O; Lachenaud, P; Eskes, AB. 2007. Efficacy of Simplified Methods to Assess Pod Production in Cocoa Breeding Trials. *INGENIC Newsletter* Issue No. 11. Disponible en https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=543863
- Takan, P; Ndong, EP; Gwet, H; Ndoumbe-Nkeng, M. 2013. Smooth estimation of a lifetime distribution with competing risks by using Regular Interval Observations: Application to Cocoa Fruits Growth. *Journal of the Royal Statistical Society*

Series C: Applied Statistics 62(5): 741-760 p. DOI: <https://doi.org/10.1111/rssc.12019>

UTZ. 2016. DOCUMENTO GUÍA UTZ ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN CERTIFICADO. 12 p. Disponible en <https://docplayer.es/56082714-Documento-guia-utz-estimacion-del-volumen-certificado.html>

Vaast, P; Somarriba, E. 2014. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforest System* (88):947–956. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9762-x>

Vieira Silva, P; Savian, T. 2019. Chanter model:nonlinear modeling of the fruit growth of cocoa. *Ciencia Rural*. ISSN 1678-4596. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20190409>

9. Anexos

Tabla 12. Tabla de probabilidad de supervivencia de Kaplan-Meier por clon

| Clon | Tiempo | Expuestos | Muertos | Probabilidad de supervivencia | E.E. |
|-----------------|---------------|------------------|----------------|--------------------------------------|-------------|
| CATIE-R1 | 15 | 326 | 18 | 0.9448 | 0.0123 |
| CATIE-R1 | 30 | 289 | 31 | 0.8434 | 0.0196 |
| CATIE-R1 | 45 | 243 | 28 | 0.7463 | 0.0241 |
| CATIE-R1 | 60 | 180 | 12 | 0.6965 | 0.0286 |
| CATIE-R1 | 75 | 167 | 9 | 0.6590 | 0.0298 |
| CATIE-R1 | 90 | 143 | 3 | 0.6451 | 0.0321 |
| CATIE-R1 | 105 | 122 | 2 | 0.6346 | 0.0347 |
| CATIE-R1 | 120 | 102 | 2 | 0.6221 | 0.0379 |
| CATIE-R1 | 135 | 94 | 1 | 0.6155 | 0.0394 |
| CATIE-R1 | 165 | 61 | 0 | 0.6155 | 0.0489 |
| CATIE-R4 | 15 | 281 | 6 | 0.9786 | 0.0085 |
| CATIE-R4 | 30 | 248 | 9 | 0.9431 | 0.0143 |
| CATIE-R4 | 45 | 228 | 6 | 0.9183 | 0.0174 |
| CATIE-R4 | 60 | 195 | 6 | 0.8901 | 0.0211 |
| CATIE-R4 | 75 | 189 | 4 | 0.8712 | 0.0227 |
| CATIE-R4 | 90 | 172 | 3 | 0.8560 | 0.0248 |
| CATIE-R4 | 105 | 141 | 3 | 0.8378 | 0.0284 |
| CATIE-R4 | 120 | 99 | 2 | 0.8209 | 0.0349 |
| CATIE-R4 | 165 | 64 | 0 | 0.8209 | 0.0434 |
| CATIE-R6 | 15 | 274 | 1 | 0.9964 | 0.0036 |
| CATIE-R6 | 30 | 256 | 7 | 0.9691 | 0.0106 |
| CATIE-R6 | 45 | 229 | 7 | 0.9395 | 0.0153 |
| CATIE-R6 | 60 | 187 | 22 | 0.8290 | 0.0251 |
| CATIE-R6 | 75 | 165 | 6 | 0.7988 | 0.0279 |
| CATIE-R6 | 90 | 153 | 11 | 0.7414 | 0.0305 |
| CATIE-R6 | 105 | 132 | 4 | 0.7189 | 0.0332 |
| CATIE-R6 | 120 | 107 | 3 | 0.6988 | 0.0371 |
| CATIE-R6 | 150 | 76 | 0 | 0.6988 | 0.0440 |
| TSH-565 | 30 | 116 | 3 | 0.9741 | 0.0145 |
| TSH-565 | 45 | 105 | 2 | 0.9556 | 0.0197 |
| TSH-565 | 60 | 98 | 13 | 0.8288 | 0.0346 |
| TSH-565 | 75 | 84 | 2 | 0.8091 | 0.0386 |
| TSH-565 | 90 | 82 | 2 | 0.7894 | 0.0400 |
| TSH-565 | 120 | 73 | 2 | 0.7677 | 0.0433 |
| TSH-565 | 135 | 67 | 1 | 0.7563 | 0.0456 |
| TSH-565 | 180 | 52 | 0 | 0.7563 | 0.0518 |

CATIE-R1

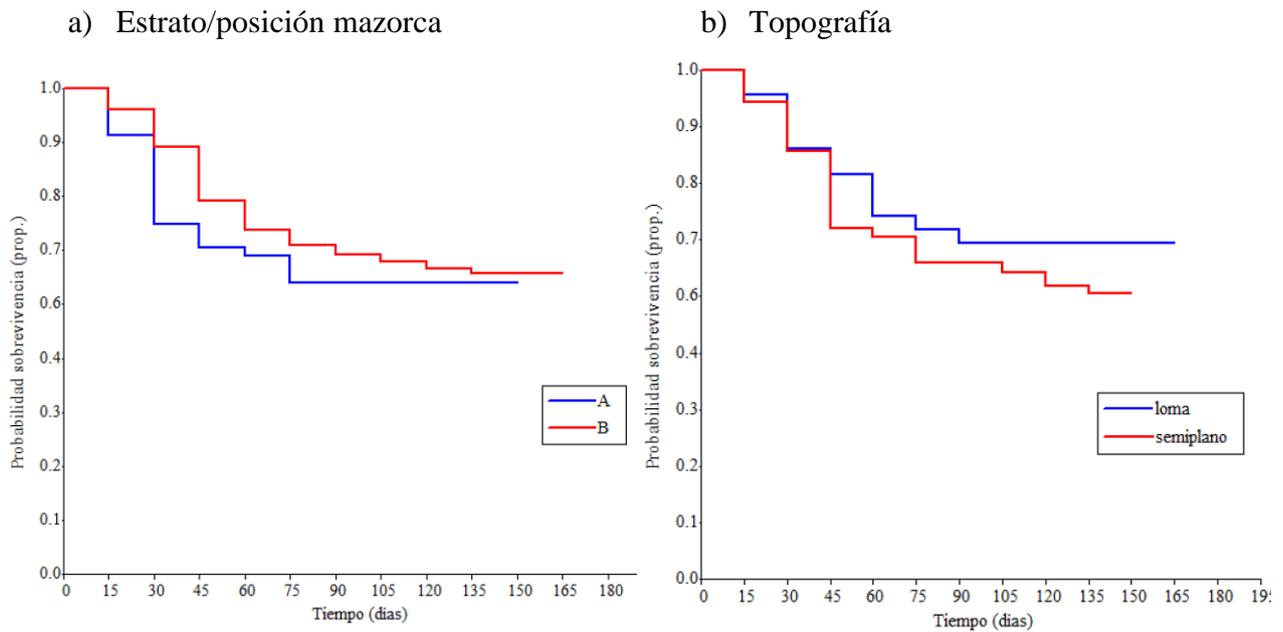


Figura 13. Gráficos de la probabilidad de supervivencia del clon CATIE-R1 considerando el estrato/posición de la mazorca y la topografía (loma y semiplano).

CATIE-R4

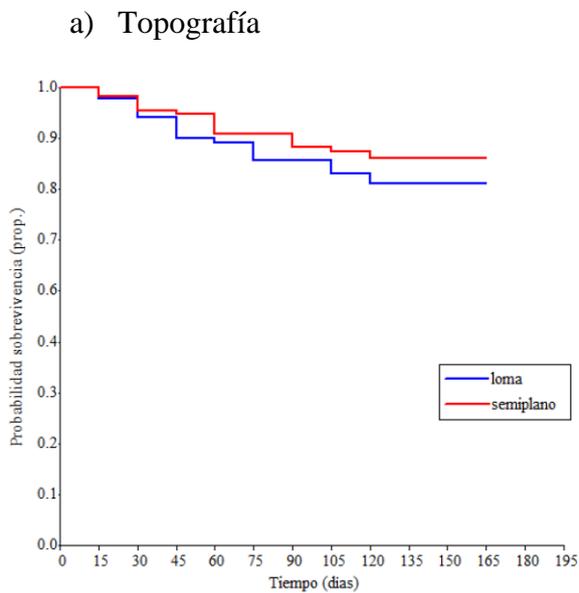


Figura 14. Gráfico de la probabilidad de supervivencia del clon CATIE-R4 considerando la topografía (loma y semiplano).

CATIE-R6

a) Estrato/posición mazorca

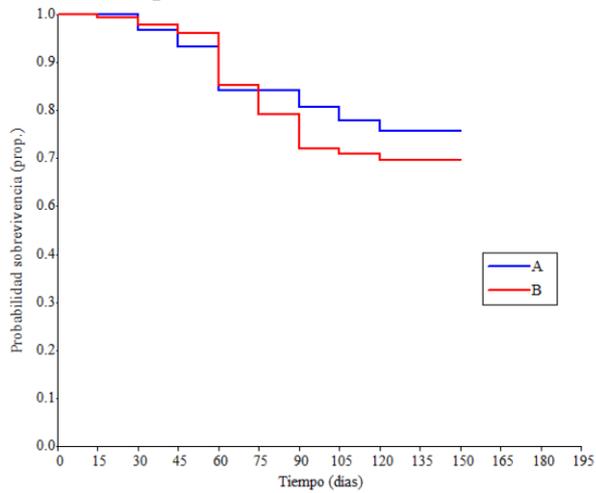


Figura 15. Gráfico de la probabilidad de supervivencia del clon CATIE-R4 considerando el estrato/posición de la mazorca.

TSH-565

a) Estrato/posición mazorca

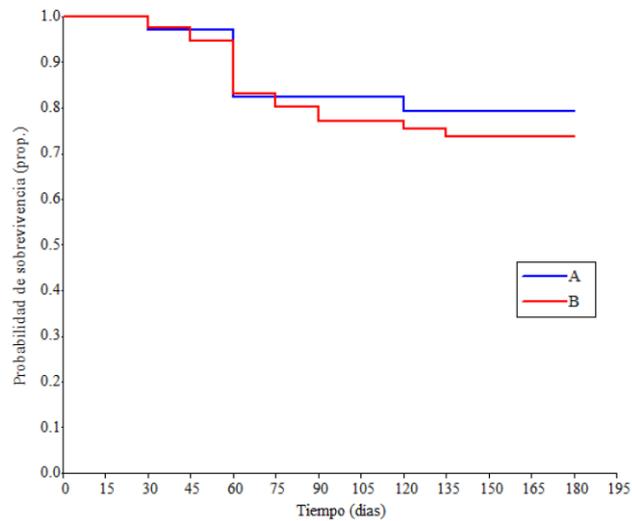


Figura 16. Gráfico de la probabilidad de supervivencia del clon CATIE-R4 considerando el estrato/posición de la mazorca. Para este clon no hay gráfico para pendiente, ya que no se contó con otra parcela para hacer comparaciones en plano.

FORMATO DE LAS CONDICIONES AGROCLIMATICAS GENERALES DE LA FINCA BAJO ESTUDIO

País: _____, Sitio/Comunidad: _____

Altitud del sitio (m): _____, Coordenadas GPS: _____

Temperatura media anual (C): _____

Rango de temperatura (C): Valor mínimo _____, Valor Máximo: _____

Precipitación media anual (mm): _____

Rango de lluvia (mm): Valor mínimo _____, Valor Máximo: _____

Humedad relativa: Media _____, Valor mínimo _____, Valor máximo _____

Brillo solar (horas/día): Media _____, Valor mínimo _____, Valor máximo _____

Numero de meses secos (menos de 100 mm de lluvia): _____, Listar meses: _____

Problemas con viento: SI _____, NO _____, Listar meses ventosos: _____

Alta nubosidad: SI _____, NO _____, Listar meses nubosos: _____

Orden de suelo: _____, pH: _____, Profundidad (m): _____, Textura: _____

Fertilidad del sitio: Excelente: _____ Buena _____, Regular: _____, Mala _____

Uso de suelo anterior: Potrero _____, Tacotal: _____, Barbecho _____, Cafetal _____, Granos básicos _____, Otro _____

Topografía sitio: Plano _____, Ondulado: _____, Quebrado: _____, Inclinado: _____ Pendiente (%): _____

Figura 17. Formato de las condiciones agroclimáticas generales de la finca bajo estudio.

FORMATO PARA REGISTRO DE PLANTAS POR CLON

Clon _____ Núm. árbol _____ Edad parcela(años) _____

Lote _____ Diámetro árbol (30 cm suelo) _____ Competencia (%) _____

Medición de ramas productivas por árbol

| Rama | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S12 | S14 | S15 | S16 |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |

Clon _____ Núm. árbol _____ Edad parcela(años) _____

Lote _____ Diámetro árbol (30 cm suelo) _____ Competencia (%) _____

Medición de ramas productivas por árbol

| Rama | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S12 | S14 | S15 | S16 |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |

Clon _____ Núm. árbol _____ Edad parcela(años) _____

Lote _____ Diámetro árbol (30 cm suelo) _____ Competencia (%) _____

Medición de ramas productivas por árbol

| Rama | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S12 | S14 | S15 | S16 |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 18. Formato para registro de cada árbol por clon

