

**EVALUACIÓN DE LA BROTACIÓN EN YERBA MATE BAJO DISTINTOS NIVELES
NUTRICIONALES**

Matías Miguel Skromeda

**Trabajo de Tesis para ser presentado como
requisito parcial para optar al Título de
MAGISTER SCIENTIAE en PRODUCCIÓN VEGETAL**

Orientación en PRODUCCIÓN DE CULTIVOS

Área: Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
AGRARIAS**

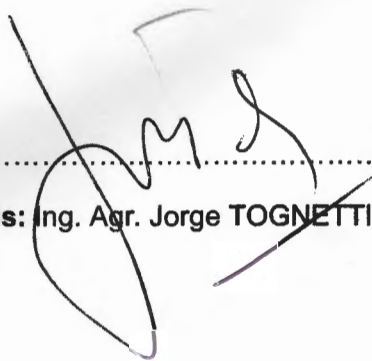
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

**Lugar de realización:
Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul, Misiones, INTA.**

**Balcarce, Argentina
Junio 2019**

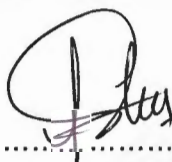
**EVALUACIÓN DE LA BROTAÇÃO EN YERBA MATE BAJO DISTINTOS NIVELES
NUTRICIONALES**

Matías Miguel Skromeda



.....
Director de Tesis: Ing. Agr. Jorge TOGNETTI, Dr. Profesor Asociado, FCA UNMdP.

.....
Co-Director: Ing. Agr. Marcelo R. MAYOL, M. Sc. Investigador INTA, EEA Cerro Azul;
Docente Titular, Fisiología Vegetal, USAL.



.....
Asesoría: Ing. Agr. Sandra P. MOLINA, Dra. Investigadora INTA, EEA Cerro Azul.

**EVALUACIÓN DE LA BROTACIÓN EN YERBA MATE BAJO DISTINTOS NIVELES
NUTRICIONALES**

Matías Miguel Skromeda

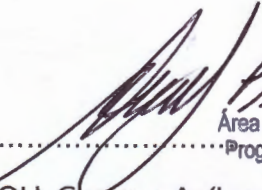
Aprobada por:


Dr. ANDRES D. ZAMBELLI
DIRECTOR
Área Cs. de las Plantas y Rec. Naturales
Programa de Posgrado en Cs. Agrarias

Evaluador/a: VILLAGRA, Mariana. (Lic. Cs. Biol., Dra.). CONICET / Instituto Biología Subtropical, UNMisiones.


Dr. ANDRES D. ZAMBELLI
DIRECTOR
Área Cs. de las Plantas y Rec. Naturales
Programa de Posgrado en Cs. Agrarias

Evaluador/a: PLOCHUK, Edmundo L. (Ing. Agr., M.Sc., Dr.) UBA, Facultad de Agronomía.


Dr. ANDRES D. ZAMBELLI
DIRECTOR
Área Cs. de las Plantas y Rec. Naturales
Programa de Posgrado en Cs. Agrarias

Evaluador/a: ORIOLI, Gustavo A. (Ing. Agr., M.Sc., Ph.D.) Profesor Extraordinario-Consulto, UNSur.

DEDICATORIA

A disposición y dedicación de todos los productores yerbateros del mundo, particularmente de Misiones y NE de Corrientes, Argentina, donde día a día se observa el esfuerzo que realizan para mejorar su producción y el empeño para mantenerla.

A mi familia, mis dos preciosos hijos, Malena y Francisco, a Carolina, mi compañera incondicional que me dio la posibilidad de formar una hermosa familia. A mis abuelos, padre, madre, hermanos, que son generaciones de productores yerbateros de la zona sur misionera, con un alma insaciable de trabajo, perseverancia y sacrificio. Y a la familia del corazón, aquellos amigos que siempre están presentes.

Para todos aquellos científicos, investigadores y colegas que les intriga saber sobre *Ilex paraguariensis* (St. Hil.), su cultivo, y se esmeran para obtener información de sus usos y aplicaciones.

A todos los estudiantes y demás personas que se inician en el sector agropecuario, tratando de que les sea útil la información concebida en este trabajo.

En especial a mi maestro, mentor y amigo, Ramón Marcelo Mayol[†], por los consejos y dedicación, por el profesionalismo, la paciencia y el compromiso. Porque, hasta último momento nos acompañaste en este trabajo, dando tu visto bueno final, como si fuera un adiós. Te mando un abrazo del alma y hasta siempre, te extrañaremos. Que en paz descanses.

[†] (21/08/1961-12/07/2018)

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias, y al equipo de trabajo de Fisiología vegetal de la Unidad Integrada Balcarce, por hacer posible la instrucción y brindar los medios para llevar a cabo el trabajo, como también la capacitación para su ejecución.

Por el apoyo incondicional a nivel personal, técnico y científico, ya que sin la guía de Jorge Tognetti (Director), Marcelo R. Mayol[†] (Codirector) y Sandra P. Molina (Asesora), no hubiese sido posible la realización de dicho trabajo.

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), a todo el personal de apoyo de la EEA Cerro Azul, por estar siempre disponible, como así al director de la EEA por las gestiones realizadas y recomendaciones, y además al C

R Misiones por colaborar en todo lo necesario.

A todo el equipo de trabajo de “Yerba Mate y Té” de la EEA Cerro Azul, Misiones. Este trabajo fue financiado por el Proyecto Nacional de Manejo Integrado de los cultivos industriales (PNIND-1108073) y Proyecto específico, Introducción de variabilidad y mejoramiento genético continuo de los cultivos industriales (PNIND-1108062), del Programa Nacional de Cultivos Industriales, Proyecto Regional con enfoque Territorial en el área sur de la provincia de Misiones (PRET MSNES-1242101) y especialmente por la “Beca de Formación”, por solventar los viajes y cursos de capacitación, gastos e insumos para poder culminar dicho trabajo.

Y sobre todo a mi familia, Padres, Hermanos, Esposa, hijos y amigos, que estuvieron presentes en todo momento brindando fuerzas y cariños en los momentos más difíciles.

INDICE

PRIMERA PORTADA.....	i
SEGUNDA PORTADA	ii
TERCERA PORTADA	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
INDICE	vi
INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS	x
RESÚMEN	xvi
ABSTRACT.....	xviii
I. INTRODUCCION.....	1
A. Hipótesis.....	4
B. Objetivos.	4
1. General.....	4
2. Específicos.....	4
C. Alcances y limitaciones.	5
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	6
A. Características de la especie.	6
1. Introducción, historia y usos.....	6
2. Clasificación taxonómica.....	8
3. Descripción Botánica.....	9
B. Zona de distribución geográfica y ambiente.....	11
C. El cultivo de yerba mate.	12
1. Material genético.....	12
2. Recolección de frutos y acondicionamiento de las semillas.....	12
3. Siembra	13
4. Germinación y repique.....	14
5. Producción de plantines	14
6. Consideraciones para la Plantación.	16
7. Suelos aptos para el cultivo.	17
8. Distancias de plantación y densidades.	18
9. Métodos de plantación y épocas.	20
10. Cuidados posteriores a la plantación.....	20

D.	Podas, tipos y aplicaciones.	21
1.	Poda de formación.	22
2.	Poda de producción o cosecha.	23
	Tipos de poda de producción o cosecha.	26
3.	Poda de limpieza.	27
4.	Poda de renovación o rejuvenecimiento.	27
E.	Aspectos ecofisiológicos.	28
1.	Luz y temperatura.	28
2.	Condiciones nutricionales.	31
3.	Crecimiento: Teorías nutricional y hormonal.	35
4.	Patrones fenológicos.	38
5.	Fenología y brotación en Yerba Mate.	40
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	43
A.	Lugar, fechas y condiciones iniciales.	43
B.	Tratamientos y conducción del experimento.	44
C.	Variables meteorológicas, edáficas y manejo sanitario.	47
D.	Parámetros evaluados.	48
1.	Altura.	48
2.	Diámetro.	48
3.	Brotación.	49
4.	Ramificaciones.	49
5.	Hojas.	49
a.	Cantidad.	49
b.	Área foliar.	50
c.	Largo y ancho.	50
6.	Raíces.	51
a.	Longitud.	51
b.	Volumen.	52
7.	Peso seco.	52
8.	Hidratos de carbono solubles totales (HCST).	53
E.	Análisis de crecimiento.	54
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	56
A.	Variables meteorológicas.	56
B.	Análisis de suelos.	57

C.	Parámetros evaluados.....	58
1.	Altura.....	58
a.	Altura según variaciones de P (ΔP).....	60
b.	Altura según variaciones de N (ΔN).....	61
c.	Incrementos de altura.....	62
2.	Diámetro.....	64
3.	Brotación.....	65
4.	Ramificaciones.....	69
	Arquitectura de la Yerba mate.....	72
5.	Hojas.....	75
a.	Producción de Hojas.....	75
b.	Área foliar.....	76
c.	Largo y ancho.....	78
d.	Análisis foliar:.....	79
6.	Raíces.....	80
a.	Volumen.....	80
b.	Longitud.....	81
7.	Peso seco.....	82
D.	Análisis de crecimiento.....	86
E.	Hidratos de carbono solubles totales (HCST).....	91
1.	Variación de HCST con la poda.....	92
2.	Relación de HCST con N y P.....	95
3.	Relación de HCST con la brotación.....	99
F.	Respuestas esperadas en plantas adultas.....	101
V.	CONCLUSIONES.....	103
VI.	BIBLIOGRAFIA.....	104
VII.	APÉNDICE.....	121
i.	Temperaturas.....	124
ii.	Humedad relativa.....	127
iii.	Contenido hídrico de suelo.....	127
iv.	Radiación solar.....	128

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distancias de plantación y densidades en Yerba mate con un manejo tradicional.	18
Tabla 2. Distancias de plantación y densidades en Yerba mate con un manejo mecanizado.	19
Tabla 3. Distancias de plantación y densidades en Yerba mate con Manejo de cultivos intercalares anuales.	19
Tabla 4. Tratamientos, combinación de nitrógeno y fósforo en distintas dosis (1:dosis completa; ½:media dosis y 0:sin aplicación; respecto a cantidades consideradas óptimas para el cultivo de Yerba mate)	45
Tabla 5. Parámetros de crecimiento, con sus siglas y traducción en inglés, relaciones o significado de cada parámetro y unidades.	54

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplares, masculino (a) y femenino (b) , de <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba mate) en su hábitat natural, San Vicente, Misiones, Argentina. Altura promedio estimada en ambos ejemplares, de 22 m y dap 0,40 m. (Foto: Ing. Agr. Matías M. Skromeda).....	10
Figura 2. Cultivo de <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate) en líneas simples, de 10 años de edad, en plena brotación, Cerro Azul, Misiones, Argentina. (Foto: Ing. Agr. Matías M. Skromeda).....	19
Figura 3. Plantas de <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate), de 6 meses de edad, luego del trasplante en macetas.	43
Figura 4. Plantas de <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate), luego de la poda a los 12 cm de altura.....	44
Figura 5. Plantas de <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate), en plena brotación, luego de las podas (a y b).....	46
Figura 6. Croquis con distribución de tratamientos (1-6) en plantas de <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate), disposición del sistema de riego por goteo y plantas ausentes al final del experimento debido a mortandad.	47
Figura 7. Data logger instalado en el ensayo midiendo variables ambientales (Temperatura ambiente, humedad relativa, radiación fotosintéticamente activa y contenido hídrico de suelo).	47
Figura 8. Medición de altura en plantas de <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate) con flexómetro.....	48
Figura 9. Ramificaciones de plantas de <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate), con hojas (a) y sin hojas (b)	49
Figura 10. Disposición de las hojas sobre papel, con referencia milimetrada, para la determinación de área foliar en plantas de <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate).....	50
Figura 11. Fotografía procesada con software de imágenes (ImageJ®) para la determinación de área foliar (a), largo y ancho de cada hoja (b), en <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate).....	51
Figura 12. Limpieza con agua (a) y determinación de largo de raíces (b) , en <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate).....	51
Figura 13. Método de la probeta para la determinación del volumen de raíces en <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate).....	52
Figura 14. Balanza de precisión (a) y estufa (b) , para la determinación de peso seco en <i>Ilex paraguariensis</i> (Yerba Mate).....	53

- Figura 15.** Imagen satelital de la ubicación de la estación meteorológica e invernáculo, en Cerro Azul, Misiones; Centro de imagen: 27°39'23.16" S; 55°26'28.45" O (Fuente: Google Earth Pro, Google Inc. 2018)..... 56
- Figura 16. a)** Altura acumulada de plantas en los distintos tratamientos; **b)** dosis de fósforo constante (P_1) y solo varía la dosis de nitrógeno y **c)** dosis de nitrógeno constante (N_1) y solo varía la dosis de fosforo, desde el inicio del ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda). 59
- Figura 17.** Altura total, sumatoria antes (159 dda) y después de la poda (253 dda), letras distintas representan diferencias estadísticas significativas (Test de Tukey ($p \leq 0.05$)). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 60
- Figura 18.** Valores medios de altura de plantas a los 159 dda, previo a la poda. Letras distintas representan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Test de Tukey ($p \leq 0.05$)). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 61
- Figura 19.** Valores medios de altura de plantas, después de la poda, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 62
- Figura 20. a)** Incrementos de altura (cm día^{-1}) en los distintos tratamientos, **b)** dosis de fósforo constante (P_1) y solo varía la dosis de nitrógeno y **c)** dosis de nitrógeno constante (N_1) y solo varía la dosis de fosforo, desde el inicio del ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda). 63
- Figura 21.** Diámetro a la altura del cuello en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 64
- Figura 22.** Diámetro a la altura de cuello en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 65
- Figura 23. a)** Número de brotes por planta en los distintos tratamientos, **b)** dosis de fósforo constante (P_1) y solo varía la dosis de nitrógeno y **c)** dosis de nitrógeno

constante (N_1) y solo varía la dosis de fósforo, desde el inicio del ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda). 66

Figura 24. Número de brotes acumulado por planta en los distintos tratamientos..... 67

Figura 25. Número total de brotes por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos..... 68

Figura 26. Ramificaciones en los tratamientos 3 (N_1+P_0) (**a**), 4 ($N_{1/2}+P_1$) (**b**) y en planta adulta (**c**), donde se puede observar el tipo de ramificación natural en *Ilex paraguariensis* Yerba mate). 69

Figura 27. Número de ramificaciones totales por planta en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos..... 70

Figura 28. Número de ramificaciones totales por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos..... 70

Figura 29. a) Número de ramificaciones en los distintos tratamientos, **b)** dosis de fósforo constante (P_1) y solo varía la dosis de nitrógeno y **c)** dosis de nitrógeno constante (N_1) y solo varía la dosis de fósforo, desde el inicio del ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda). 71

Figura 30. Número de ramificaciones en los tratamientos T_3 y T_4 con respecto al (T_1) testigo, antes y después de la poda (159 dda). 72

Figura 31. a. Ramificación en *Ilex paraguariensis* (Yerba mate), se puede observar una zona de entrenudos cortos (braquiblasto) y otra zona libre de ramas con entrenudos largos, que conforman la unidad de crecimiento típica para la especie. **b.** Rama de planta adulta sin podas, se observan los pisos o estratos que forman las ramas. (**Bq**: Zona de ramificación, Braquiblasto. **El**: entrenudos largos, poca o nula ramificación, **Uc**: unidad de crecimiento, **Pg**: piso o grupo de ramas)..... 74

Figura 32. a) Número de hojas aparecidas acumulado por planta en los distintos tratamientos, **b)** dosis de fósforo constante (P_1) y solo varía la dosis de nitrógeno y **c)** dosis de nitrógeno constante (N_1) y solo varía la dosis de fósforo, desde el inicio del

ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda). 75

Figura 33. Área foliar (dm^2) promedio por planta en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 76

Figura 34. Área foliar (dm^2) por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales los extremos representan valores máximos y mínimos respectivamente y los puntos valores extremos. 77

Figura 35. Área foliar (dm^2) total por planta, en los distintos tratamientos. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente. 78

Figura 36. Volumen radical (cm^3) por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 80

Figura 37. Longitud de la masa radical (cm) por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 81

Figura 38. Peso seco (g) promedio, de hojas, tallo y raíces en los distintos tratamientos a los 253 dda (T_1 : Testigo; T_2 : N_0+P_1 ; T_3 : N_1+P_0 ; T_4 : $N_{1/2}+P_1$; T_5 : $N_1+P_{1/2}$; T_6 : N_1+P_1), luego de las podas. 82

Figura 39. Peso seco (g) por planta en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 83

Figura 40. Peso seco (g) por planta en los distintos tratamientos luego de la poda, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas

horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales los extremos representan valores máximos y mínimos respectivamente. 84

Figura 41. Peso seco (g) de la biomasa total por planta, en los distintos tratamientos durante todo el experimento. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 84

Figura 42. Diagrama de sectores, valores medios de proporciones de raíces, tallos y hojas, respecto a la biomasa total, en plantas de yerba mate con 14 meses de edad. 85

Figura 43. Relación entre RGR, tasa de crecimiento relativo (por sus siglas en inglés, "Relative growth rate" en $g\ g^{-1}\ día^{-1}$) y NAR, tasa de asimilación neta (por sus siglas en inglés, "Net assimilation rate" en $g\ cm^{-2}\ día^{-1}$) indicando cada tratamiento. 89

Figura 44. Relación entre RGR, tasa de crecimiento relativo (por sus siglas en inglés, "Relative growth rate" en $g\ g^{-1}\ día^{-1}$) y LAR, relación de área foliar (por sus siglas en inglés, "Leaf area ratio" en $cm^2\ g^{-1}$) indicando cada tratamiento. 90

Figura 45. Hidratos de carbono solubles totales en tallo, expresado en miligramos por gramo de muestra seca, promedio total por planta en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 92

Figura 46. Diagrama de cajas, hidratos de carbono solubles totales en tallo, expresado en miligramos por gramo de muestra seca, promedio total por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos. 93

Figura 47. Diferencia entre el contenido de hidratos de carbono solubles totales en tallo (HCST) antes y después de la poda, expresado en miligramos por gramo de muestra seca, valores promedio total para cada tratamiento. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). 94

Figura 48. Relación entre hidratos de carbono solubles totales en tallo (HCST), expresado en $mg\ g^{-1}$ de muestra seca y N foliar (%), valores de media por planta incluyendo tratamientos y fechas (159 dda y 253 dda), quedan exceptuados valores extremos. 96

Figura 49. Relación entre hidratos de carbono solubles totales en tallo (HCST), expresado en $mg\ g^{-1}$ de muestra seca y P foliar (%), valores de media por planta

incluyendo tratamientos y fechas (159 dda y 253 dda), quedan exceptuados valores extremos..... 97

Figura 50. Relación entre hidratos de carbono solubles totales en tallo (HCST), expresado en mg g^{-1} de muestra seca y N/P foliar, valores promedio por planta incluyendo tratamientos y fechas (159 dda y 253 dda), quedan exceptuados valores extremos..... 98

RESÚMEN

La Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), familia de las Aquifoliáceas, es un árbol que crece en sotobosque del Paraguay, noreste de Argentina y sur de Brasil. Es adaptado al cultivo por medio de podas, alcanzando 2-4 m de altura, con la arquitectura adecuada para la cosecha de hojas y ramas finas. Su crecimiento, presenta un periodo de receso invernal y otro de crecimiento primavero-estival con tres picos de brotación, donde las variables ambientales, en particular las condiciones edáficas, contribuyen con un rol importante en el nivel de nutrientes y reservas carbonadas que las plantas utilizan para la brotación. Hay referencias que sustentan la promoción de la brotación de yemas laterales inducidas por Nitrógeno (N) y Fósforo (P), mediada por niveles incrementados de la disponibilidad de asimilados, principalmente sacarosa, que además del sustrato necesario para el crecimiento de los nuevos brotes, es una molécula señal que estaría implicada en la división celular y el desarrollo de nuevos órganos. El objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia de la disponibilidad de N y P sobre la brotación y el crecimiento; y evaluar en qué medida estas respuestas se vinculan con los niveles de disponibilidad de reservas carbonadas en los tallos. El estudio comenzó en setiembre de 2015, en invernáculo con media sombra y riego, utilizando plantines de yerba mate (progenie 538 INTA: cv.1/74 x cv. 8/74) con 6 meses de edad. En octubre se aplicaron los tratamientos, T₁ (Testigo); T₂ (P1+N0); T₃ (N1+P0); T₄ (P1+½N); T₅ (N1+½P) y T₆ (N1+P1) y luego de 5 meses se realizó una poda a 12 cm de altura, finalizando en junio de 2016. Las mediciones al inicio (0 dda²), en poda (159 dda) y final (253 dda) fueron: área foliar, diámetro, peso fresco, peso seco, volumen y largo de raíces, hidratos de carbono solubles totales (HCST) en tallo y contenido de nutrientes en hojas; y cada dos semanas: altura, número de hojas, número de brotes, ramificaciones y análisis de crecimiento. Los resultados indican que el crecimiento y la brotación fueron afectados por los tratamientos, con adelantamiento y prolongación de los ritmos de crecimiento respecto al testigo, además de un aumento en la biomasa total producida. T₃, T₄ y T₅ tuvieron las mejores respuestas, corroborando la importancia de ambos nutrientes. El N aumentó el número de hojas y área foliar, en tanto el P, incrementó la cantidad de ramas y brotación posterior a las podas. Los niveles de HCST demuestran que la combinación de ambos nutrientes es fundamental para lograr mayores niveles de

² dda: días después de la aplicación.

reservas carbonadas antes de la poda, las cuales se relacionan con mayor capacidad de brotación de las plantas. El análisis de crecimiento exhibió un leve aumento en la RGR, donde las plantas presentaron una adecuación fisiológica, más que morfológica, ante la presencia de nutrientes.

Palabras clave: *Ilex paraguariensis*, nitrógeno, fósforo, sacarosa, crecimiento, desarrollo.

ABSTRACT

Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), Family Aquifoliáceas, is a tree that grows in undergrowth of Paraguay, northeastern Argentina and southern Brazil. It is adapted to the crop though of pruning, reaching 2-4 m in height, with the appropriate architecture for harvesting leaves and thin branches. Its growth presents a period of winter recess and another of spring-summer growth with three buds of sprouting, where the environmental variables, in particular the edaphic conditions, contribute with an important role in the level of nutrients and carbon reserves that the plants use for sprouting. There are references that support the promotion of lateral bud budding induced by Nitrogen (N) and Phosphorus (P), measured by increased levels of availability of assimilates, mainly sucrose, which in addition to the necessary substrate for the growth of new shoots, it is a signal that would be involved in cell division and the development of new organs. The objective of this work was to study the influence of the availability of N and P on the sprouting and growth of the outbreaks; and evaluate the extent to which these responses are linked to the availability levels of carbonated reserves in the stems. The study began in september 2015, in a greenhouse with half shade and irrigation, using yerba mate seedlings (progenies 538 INTA: cv.1 / 74 x cv. 8/74) with 6 months of age. In october the treatments were applied, T1 (Witness); T2 (P1+N0); T3 (N1+P0); T4 (P1+½N); T5 (N1+½P) y T6 (N1+P1) and after 5 months a pruning was done at 12 cm height, ending in june 2016. The measurements at the beginning (0 dda), in pruning (159 dda) and final (253 dda) were: leaf area, diameter, fresh weight, dry weight, volume and length of roots and total soluble carbohydrates (HCST) in stem; and every two weeks: height, number of leaves, number of shoots and branches, plus a growth analysis. The results indicate that the growth and sprouting were affected by the treatments, with advance and prolongation of the rhythms of growth with respect to the control, in addition to an increase in the total biomass produced. T3, T4 and T5 had the best answers, corroborating the importance of both nutrients. The N increased the number of leaves and foliar area, while the P increased the number of branches and sprouting after the pruning. HCST levels show that the combination of both nutrients is essential to achieve higher levels of carbonated reserves before pruning, which are related to greater sprouting capacity of plants. The growth analysis showed an increase in the RGR, where the plants presented a physiological, rather than morphological, adequacy to the presence of nutrients.

Keywords: *Ilex paraguariensis*, nitrogen, phosphorus, sucrose, growth, development.

I. INTRODUCCION

La producción de *Ilex paraguariensis* St. Hil. (Yerba Mate) tiene gran importancia socio-económica en Sudamérica debido a la comercialización del producto para el preparado de infusiones, como el “mate”³ o “tereré”⁴, utilizándose además en cosmética, gastronomía y para fines medicinales. En la actualidad hay una creciente demanda en el mercado local y en mercados emergentes de América del Norte, Europa y Asia (Filip, 2011; Mayol *et al.*, 2014; INYM, 2017). A nivel mundial, Argentina aporta el 62 % de la producción, seguido por Brasil y Paraguay con un 38% entre ambos (Mayol *et al.*, 2014). Argentina producía hasta el 2013, 300 mil toneladas anuales en promedio de hoja verde⁵, cultivándose el 90% de la superficie en la provincia de Misiones y el 10% restante en el nordeste de la provincia de Corrientes (INYM, 2014). Del año 2013 a la actualidad, la superficie cultivada en Argentina se incrementó a 165.327 ha, de las cuales el 87 % se encuentra en Misiones y el 13 % restante en Corrientes, con 18615 productores, 95,5% en la provincia de Misiones y el 4,5% restante en Corrientes (INYM, 2017; Yacovich, 2017). En este mismo período, la producción promedio ascendió a 778 mil toneladas, sin incluir datos del año 2017. La yerba mate elaborada, representa 250 mil toneladas como yerba mate “canchada”⁶, valores promedio 2013-2016. Del total de la producción de Argentina, el 85% se destina al mercado interno y el 15% restante se exporta a países como Siria (57%), Chile (12%), Brasil (9%), Unión Europea (6%), Uruguay (3%), EEUU (3%) y otros en menor medida (Mayol *et al.*, 2014; INYM, 2017).

La Yerba Mate es un árbol originario de Sudamérica que pertenece a la familia de las Aquifoliáceas. Crece en ambiente de sotobosque, en el noreste de Argentina, Paraguay y sur de Brasil, pudiendo alcanzar 25 metros de altura en su estado natural. El hombre ha domesticado la especie, para optimizar la producción de hojas y ramas finas, que son el producto comercializable. Para esto, a través de sucesivas podas de las plantas debe lograrse una arquitectura adecuada que asegure el mantenimiento productivo durante los años. Estas podas de producción y la posterior brotación inciden directamente en los rendimientos del cultivo y dependen del tipo de corte a realizar, época, estado de la planta y fertilidad del suelo, entre otros (Kurtz y Mayol, 2011; Medina y Burgos, 2017).

³ mate: Bebida o infusión que se prepara con agua caliente y yerba mate.

⁴ tereré: Bebida preparada con agua fría, aguas saborizadas o jugos y yerba mate.

⁵ hoja verde: producto de cosecha, hojas y ramas finas de *Ilex paraguariensis*, sin industrialización.

⁶ yerba mate canchada: producto elaborado de hoja verde, seca y con molienda gruesa.

En el desarrollo vegetativo, la planta de Yerba Mate, posee un meristema apical con potencial para funcionar indefinidamente, con un crecimiento preferentemente monopodial. También muestra una periodicidad de elongamiento marcada, controlada de manera endógena, perteneciendo al grupo de vegetales con crecimiento rítmico (Rakocevic *et al.*, 2006^a, 2006^b, Rakocevic y Picarelli, 2011).

El crecimiento rítmico de la yerba mate, también es mencionado por Sansberro *et al.* (2000), quienes describen una alternancia de períodos de crecimiento activo y cese del mismo (dormición), aún en condiciones supuestamente favorables para el crecimiento. Además mencionan que, en las condiciones agroclimáticas del NE Argentino, la Yerba Mate presenta tres períodos de brotación perfectamente definidos en primavera, verano y otoño, en los cuales, no todas las plantas brotan al mismo tiempo, generando una notable disminución en la producción y pudiendo observarse diferentes intensidades y duraciones según los años.

Dentro de las variables ambientales, las condiciones edáficas presentan un rol importante, en particular el nivel de nutrientes, relacionado directamente con el nivel de nutrición de las plantas y las reservas que se utilizan para la brotación. Uno de los primeros estudios sobre dosis y época de fertilización nitrogenada en Yerba Mate fueron publicados por Errecaborde (1973), en el cual hace referencia a la importancia del nitrógeno para el aumento de producción en suelos erosionados y agotados, donde se determinó que la relación nutritiva 4-1-1 (nitrógeno-fósforo-potasio) era la más adecuada para el cultivo. Posteriormente, Sosa (1992, 1994) analizó los requerimientos del cultivo basado en distintas condiciones nutricionales de suelo y planta, proponiendo una fertilización de reposición más un 25% con respecto a lo que el cultivo extrae en cosecha.

Por otro lado, las prácticas de cultivo determinan, en mayor o menor medida, la posterior brotación de las ramas de Yerba Mate y por ende la producción. Por este motivo, es de fundamental importancia conocer los mecanismos fisiológicos que participan en la brotación, para poder predecir respuestas de las plantas a distintas prácticas de cultivo y ambiente.

De acuerdo con Melgarejo (2010), el crecimiento de los diferentes órganos de las plantas es un proceso fisiológico complejo, que depende directamente de la fotosíntesis, la respiración, la división celular, la elongación y la diferenciación, entre otros procesos, y que además está influenciado por factores como temperatura, intensidad de luz, densidad de población, disponibilidad de agua y de nutrientes.

Existen sólidas evidencias de que la competencia por nutrientes juega un papel importante en la regulación de la dominancia apical (Beveridge *et al.*, 1997; Berleth *et al.*, 2004; Taiz y Zeiger, 2006^a, 2006^b; Gomez, 1988; Ferguson y Beveridge, 2009; Dun *et al.*, 2012; Rameau *et al.*, 2014, Tomás *et al.*, 2015). Gregory y Veale (1957) mostraron que en *Linum sp.*, el grado de dominancia apical podría ser controlado con bastante precisión mediante la variación de la nutrición nitrogenada y el suministro de hidratos de carbono. Estudios posteriores (Mc-Intyre, 2001), sobre la influencia de la nutrición en el control de la brotación, en una amplia gama de especies, han proporcionado pruebas sustanciales de que el nitrato en interacción con el nivel hídrico, tiene un papel importante en el control del crecimiento por una combinación de efectos osmóticos y nutricionales. Estas investigaciones mostraron que el aumento del suministro de nitrato era muy eficaz en la liberación de yemas laterales en varios cultivos como *Linum usitatissimum* L. y *Euphorbia esula* L.

Otros estudios demuestran la importancia del control apical en la regulación de la ruptura de yemas a lo largo del eje, bajo la dependencia de factores ambientales (suministro de luz y nitrógeno) (Huché-Théliér *et al.*, 2011; Furet *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2015). El control apical, es definido como la inhibición del crecimiento del brote axilar basal por un eje axilar de crecimiento activo superior, cuya regulación es poco conocida, pero difiere notablemente de la dominancia apical. Trabajos realizados por Huché-Théliér *et al.* (2011) en rosales, demostraron que la disponibilidad de nitrógeno contribuyó al establecimiento del control apical, que solo operó en niveles bajos de nitrato, mientras que todos los brotes a lo largo del tallo crecieron cuando la planta recibió un alto nivel de nitrato. La deficiencia de nitrógeno, aumentó las proporciones de brotes de yemas en las zonas media y basal de la rama primaria y retrasó el rebrote en la zona apical. Por lo tanto, el control apical y también la dominancia apical contribuyen a la arquitectura de la planta, modulados por el ambiente, como en este caso, a través de nutrientes.

También, existen indicios de que la promoción de la brotación de yemas laterales inducidas por nitrógeno y fósforo estaría mediada por niveles incrementados de la disponibilidad de asimilados, principalmente sacarosa, que además del sustrato necesario para el crecimiento de los nuevos brotes, es una molécula señal que estaría implicada en la división celular y el desarrollo de nuevos órganos.

Estos efectos estarían comprendidos dentro de la hipótesis nutricional de control de la dominancia apical, en contraposición con la hipótesis hormonal, que centra el

control en los niveles relativos de auxinas y citocininas (Taiz y Zeiger, 2006^b; Assuero y Tognetti, 2010; Krouk *et al.*, 2011; Tognetti *et al.*, 2013; Rameau *et al.*, 2014; Mason *et al.*, 2014; Van Den Ende, 2014; Buskila *et al.*, 2016).

El conocimiento de la respuesta de la brotación de la planta de Yerba Mate, es de fundamental importancia para poder manejar y optimizar la producción de hojas y tallos finos de las futuras cosechas. Este trabajo pretende analizar la influencia de la disponibilidad de nitrógeno y fósforo sobre el número de brotes y el crecimiento de los mismos, y evaluar en qué medida estas respuestas se vinculan con los niveles de disponibilidad de reservas carbonadas en los tallos de las plantas de Yerba Mate.

A. Hipótesis.

- La disponibilidad de nitrógeno y fósforo modifica la relación de dominancia apical y la brotación de yemas laterales. Se espera que la adición de N y P, en suelo, a plantas de Yerba Mate, determine mayor número de brotes, con más hojas, con mayor vigor de crecimiento, altura y diámetro.
- Las reservas carbonadas de las plantas están involucradas en la brotación posterior después de una poda. Se espera una mayor brotación en las plantas que posean mayor cantidad de hidratos de carbono solubles totales en tallo al momento de la poda.

B. Objetivos.

1. General

- Evaluar la brotación y reservas carbonadas en tallos, con diferentes aplicaciones de nutrientes en plantas de Yerba Mate.

2. Específicos

- Determinar la incidencia de la aplicación de nitrógeno y fósforo sobre la brotación, mediante la producción de materia seca a través de un análisis clásico de crecimiento.
- Verificar la posible relación entre la brotación y la disponibilidad de reservas de hidratos de carbono solubles totales del tallo, en plantas cultivadas bajo diferentes disponibilidades de nitrógeno y fósforo.
- Estudiar variables relacionadas al crecimiento y analizar cómo éstas dependen de las variaciones y combinaciones de fósforo-nitrógeno.

C. Alcances y limitaciones.

Debido a la escasa información actual, la investigación pretende en primer lugar, tener un enfoque ecofisiológico, observando la incidencia de diferentes nutrientes y el origen de las reservas carbonadas que la planta utiliza, brindando información básica y fundamental para comprender el comportamiento de la especie respecto a su brotación. En segundo lugar, intenta establecer un alcance práctico que pueda servir de herramienta para la toma de decisiones en los campos de cultivo, al momento de realizar la aplicación de nutrientes y podas de cosecha, contribuyendo a los aumentos de producción y su sostenibilidad.

Se pretende comenzar a entender fisiológicamente el rol de las podas y posteriores brotaciones en el cultivo de yerba mate, generando información y aporte para otros estudios, que ayuden a comprender en un futuro, las relaciones planta-ambiente de este cultivo y como el hombre interviene en dicho equilibrio.

Las limitaciones, implican poca información base respecto al cultivo, referente a su desempeño fisiológico, en donde se puedan recabar experiencias que ayuden al trabajo desarrollado. Por otra parte, los instrumentales requeridos y procedimientos para otros alcances se ven fuera del presupuesto de trabajo.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

A. Características de la especie.

1. Introducción, historia y usos.

El género *Ilex* es el más importante desde el punto de vista cuantitativo de las Aquifoliáceas, ya que cuenta con aproximadamente 350 especies de distribución mundial (**Apéndice I**) (Oceanía, Europa, Asia, América y África) (Prat Kricun, 2011). Otros autores afirman que el número de especies asciende a 405 (Stevens, 2001, 2008) y hasta 600, de las cuales alrededor de 250 se encuentran en Sudamérica (Loizeau, 1994; Giberti, 1995, 1998). Se puede considerar como el único género de la familia con cierta importancia económica, sobre todo la especie *I. paraguariensis* en Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay.

Las especies *I. aquifolium*, *I. cornuta*, *I. verticillata*, *I. opaca* y otras del hemisferio norte poseen valor como ornamentales, con un importante desarrollo económico durante las fiestas navideñas. Las demás especies del género, basan su importancia en la elaboración de bebidas e infusiones estimulantes, que deben su acción fisiológica a las metil-xantinas (cafeína, teobromina y teofilina) presentes. A excepción de *I. yunnanensis* de Asia, las demás especies son todas de origen americano. En América del norte se destaca *I. vomitoria* (casina, black drink, té de los Apalaches, yaupon tea) empleado por los indios de la Florida con fines ceremoniales y empleado durante la guerra de Secesión Americana como sucedáneo del té negro, por su contenido de cafeína. Otra especie empleada por los indígenas en los países andinos, posiblemente empleada como medicinal, estimulante, alucinógeno o ritual (Prat Kricun, 2011) y actualmente como cultivo en desarrollo, es la *Ilex guayusa* (Collahuezo, 2012).

De las *Ilex* sps. localizadas en la Selva Paranaense y Litoral Atlántico, la Yerba mate es la más conocida por su amplio empleo como infusión por los indígenas Guaraníes, su adaptación y cultivo, en las misiones jesuíticas y su posterior adopción por la población durante la época colonial, hábito que sigue hasta la actualidad (Prat Kricun, 2011).

Hasta el presente, han sido citadas para la Argentina seis especies nativas (Giberti, 1979, 1989, 1994, 1995, 1998; Prat Kricun y Belingheri, 1995) distribuidas en las provincias fitogeográficas de las Yungas y Paranaense (Cabrera, 1971). Durante el aprovechamiento de la yerba mate en la selva, se recolectaban además otras *Ilex* sps., que constituían las acompañantes más frecuentes de la especie, desde la Serra do

Mar hasta el centro de la actual República del Paraguay. Entre éstas, las más destacadas eran *I. theezans*, *I. brevicuspis* e *I. dumosa*, con la presencia de *I. affinis*, *I. amara* e *I. brasiliensis* en la región del Cerrado, e *I. taubertiana*, *I. integerrima*, *I. microdonta* e *I. chamaedryfolia* en las zonas de altura en particular en los “planaltos” y en la costa atlántica *I. pseudobuxus* (Prat Kricun, 2011, Burgos y Medina, 2017 a).

Desde épocas coloniales se conocen diversos adulterantes y sucedáneos de la yerba mate (Giberti, 1989). Uno de éstos involucra a la especie *Ilex dumosa* (Reissek) y a sus variedades botánicas (*I. dumosa* var. *dumosa* (Reissek) e *I. dumosa* var. *guaranina* (Loes).; Loesener, 1901; Giberti, 1994) vulgarmente denominadas “yerba señorita”, “caá-berá”, “caá-chiri”, “congonilla”, “erva piriquita”, etc. No obstante, el Código Alimentario Argentino ha aceptado el uso de *I. dumosa* para la elaboración de infusiones equivalentes a la yerba mate, aunque con bajo contenido de cafeína (Prat Kricun, 2011).

La explotación de yerba mate nativa consistía en efectuar el reconocimiento de la zona donde se ubicaban los rodales dentro de la selva junto a especies afines. Luego los “tareferos”⁷, trepaban a los árboles y cortaban toda la masa foliar, dejando solo troncos y ramas. A continuación se efectuaba el “sapecado”⁸ en el lugar y con posterioridad se trasladaba al campamento base para su secado final y posterior “canchado”⁹. Esta operación agresiva de defoliación completa, era superada por la mayoría de las especies, que luego de dos o tres años recuperaban todo su follaje. Atentos a este sistema de explotación peligroso y oneroso, los sacerdotes jesuitas consideraron la posibilidad de efectuar plantaciones de dichas especies en los terrenos de las reducciones. Las especies elegidas por sus excelentes características fueron: la Yerba mate y la *I. dumosa*. La primera, tuvo al inicio problemas para su propagación por semillas, solucionados con posterioridad, no así la segunda, de fácil propagación por el trasplante de sus plantas jóvenes o por semillas (Prat Kricun, 2009).

Las especies mencionadas comparten ciertas características biológicas como la de ser árboles dioicos con polinización mediada por insectos y la de poseer el mismo número cromosómico diploide ($2n=40$) (Barral *et al.*, 1995; Greizerstein *et al.*, 2004). Por otra parte, los estudios sobre la composición fitoquímica en ambas especies

⁷ tareferos: operarios que se encargan de la cosecha de hoja verde de yerba mate.

⁸ sapecado: proceso que implica el contacto directo con el fuego de hojas y ramas finas de yerba mate, para frenar los procesos enzimáticos, biológicos y extraer agua.

⁹ canchado: proceso de trituración de la yerba mate seca para la obtención de yerba mate canchada.

hallaron diferencias significativas en cuanto al contenido, entre otros compuestos, de cafeína, teobromina, y teofilinas (Filip *et al.*, 1999, 2001; Reginatto *et al.*, 1999; Heck y Mejia, 2007). A estas diferencias se le suma como interés adicional, el hecho de que las plantas de *I. dumosa* presentan una mejor adaptación de suelos y exhiben una mayor tolerancia al frío y al insecto *Gyropsylla spegazziana* (“rulo de la yerba mate”) que constituye la principal plaga del cultivo de yerba mate (Prat Kricun, 2009). En la actualidad es de destacar cómo en algunas zonas de Brasil se siguen utilizando estas cosechas extractivas de los rodales nativos, siendo reemplazados cada vez más por las cosechas de plantaciones comerciales.

2. Clasificación taxonómica.

Especie clasificada por el naturalista francés Auguste de Saint Hilaire, publicada en 1822, en las memorias del Museo de Historia Natural de París (Galarza, 1914).

La Yerba mate, *Ilex paraguariensis* St. Hil., fue clasificada dentro de:

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyta*

Subdivisión: *Angiospermae*

Clase: *Dicotiledóneas*

Sub-clase: *Archiclamydes*

Orden: *Celastrales*

Familia: *Aquifoliaceae*

Género: *Ilex*

Especie: *I. paraguariensis*

Variedad: *paraguariensis*

Actualmente la clasificación se modificó (Souza y Lorenzi, 2012; GBIF, 2017; Medina y Burgos, 2017); ubicando a la especie en:

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyta*

Subdivisión: *Angiospermae* (Lindley) / *Magnoliidae* (Fakhtajan)

Clase: *Eudicotiledóneas* / Clado: *Eudicotiledóneas core*

Subclase: *Asteridae* / Clado: *Asterídeas* / Clado: *Campanulídeas*

Orden: *Aquifoliales*

Familia: *Aquifoliaceae*

Género: *Ilex*

Especie: *Ilex paraguariensis*

Varietad: *paraguariensis* (otras: *vestita* Loes., *sincorensis* Loes., *genuina* Loes., *dentata* Miers.)

Sinónimos: *Ilex mate* St. Hil.; *Ilex curitibensis* Miers; *Ilex domestica* var. *glabra* Reissek; *Ilex sorbilis* Reissek; *Ilex theaezans* Bonpl. ex Miers. (Giberti, 1990).

Nombres vulgares.- “Árbol del mate” (Corrientes y Misiones); “Caá” (Corrientes, Misiones y Paraguay); “Yerba Mate”, “Yerba”, (Corrientes y Misiones); Erva-Mate (Brasil) (Giberti, 1990; Heuser *et al.*, 1993).

La familia es de distribución cosmopolita (ver **Apéndice I**) constituida por 4 géneros: *Ilex* (aproximadamente 400 especies en Oceanía, Eurasia, América y África), *Phelline* (alrededor de 10 especies de Nueva Caledonia), *Sphenostemon* (unas 7 especies de Nueva Caledonia, Nueva Guinea y Australia) y *Nemopanthus* (género monotípico de América del Norte). En Sudamérica sólo existe *Ilex* L., taxón mejor difundido en climas tropicales y subtropicales, preferentemente húmedos, el que llega hasta Uruguay (aproximadamente los 35° de latitud sur) (Giberti, 1979). Ver **Apéndice II** y **III**, para más detalles de la clasificación taxonómica del género *Ilex* *sps.*.

3. Descripción Botánica.

La yerba mate es un Árbol, siempre perennifolio. Cuando es cultivada alcanza una altura que varía de 2 a 5 m, pero en la selva, en su ambiente natural, puede alcanzar 25-30 metros de altura (Giberti, 1990; Heuser *et al.*, 1993), con un diámetro a la altura del pecho (dap) de 50-70 centímetros (Backes e Irgang, 2002). Posee un tronco cilíndrico, recto y poco tortuoso, y raíces pivotantes profundas (Llera y Medina, 2017) (**Figura 1**).

El fuste generalmente es corto, pero la copa alcanza los 11 metros de largo. Posee ramificación racimosa, casi horizontal con la copa baja y densifoliada. La corteza puede tener 20 mm de espesor, externamente es de color ceniza claro o acastañada, persistente, áspera a rugosa, con lenticelas abundantes, formando a veces líneas longitudinales y provistas de cicatrices transversales. Las corteza interna presenta textura arenosa y de color blanca-amarillenta, que después de una incisión se oscurece rápidamente en contacto con el aire (Carvalho, 1994).

Las hojas son simples, alternas, generalmente estipuladas, sub-coriáceas hasta coriáceas, glabras, verde oscura en el haz y más clara al envés, limbo foliar obovado, a veces también oblanceolado, elíptico u oblongo, comúnmente con 5 a 10 cm de

largo por 3 a 4 cm de ancho, el margen es irregularmente serrado y dentado, el primer tercio de la base generalmente liso, ápice obtuso, u obtuso-retuso, zona apical plana cerca de la nervadura media, frecuentemente con un mucrón, nervaduras laterales poco impresas en el haz y salientes por el envés, peciolo relativamente corto, con 7 a 15 mm de largo (Giberti, 1990; Heuser *et al.*, 1993; Carvalho, 1994).



Figura 1. Ejemplares, masculino **(a)** y femenino **(b)**, de *Ilex paraguariensis* (Yerba mate) en su hábitat natural, San Vicente, Misiones, Argentina. Altura promedio estimada en ambos ejemplares, de 22 m y dap 0,40 m. (Foto: Ing. Agr. Matías M. Skromeda).

Inflorescencias en fascículos corimboides axilares de nomófilos. Las flores son pequeñas, polígamas, dioicas, con cáliz y corola de constitución tetrámera. Sépalos con borde no ciliado. Corola blanquecina, ca. 6-7 mm de diámetro. Pistilodio subgloboso, no rostrado. (Giberti, 1990; Heuser *et al.*, 1993; Carvalho, 1994).

Poseen una característica especial porque, aunque en todas se encuentran estambres y pistilo, en las femeninas los estambres son rudimentarios (estaminoideo), y en las masculinas, el pistilo está atrofiado (pistiloideo). En función de esto ocurren dificultades en la polinización natural (Zanon, 1988; Carvalho, 1994). La floración se produce entre los meses de agosto y octubre (Burtnik, 2005).

Los frutos consisten en una drupa globosa de 4 a 6 mm de diámetro, tetralocular, con superficie lisa, de color violáceo, casi negro cuando madura, con 4 a 5 semillas (pirenos) dorsalmente surcadas, en la pulpa mucilaginoso. Presenta fructificación

abundante con diseminación ornitócora. El endocarpio, está adherido internamente a la semilla, con tegumento membranáceo, castaño claro, de forma variable y endospermo carnoso. El embrión es minúsculo, apical y rudimentario. La maduración de los frutos ocurre entre los meses de enero y marzo (Carvalho, 1994).

En una descripción de la ontogenia del fruto de *Ilex paraguariensis*, Mariath *et al.* (1995) hacen referencia a que los frutos son clasificados de manera diferente dependiendo del autor considerado, como drupa (Reissek, 1861), nuculanídeo (Hertel, 1954), baya-drupa (Edwin y Reitz, 1967), nuculanio (Giberti, 1979) o drupóide (Kunyoshi, 1983). Font Quer (1975) define este tipo de fruto como tetralocular, tetraspérmico con mesocarpo carnoso o coriáceo, con endocarpo endurecido y generalmente leñoso.

B. Zona de distribución geográfica y ambiente.

La yerba mate es una especie nativa de Paraguay, sur de Brasil y noreste de Argentina. El área de ocurrencia natural en los tres países es de aproximadamente 540.000 km². Los extremos de dispersión de la especie están situados entre las latitudes 21° a 30° sur y longitudes de 48°30' a 56°10' oeste, con altitudes variando entre 500 y 1000 metros sobre el nivel del mar. La especie puede ocurrir, no obstante, en puntos aislados, fuera de estos límites (Malheiros y Rotta, 1985).

El área de dispersión de la yerba mate abarca el 5% del territorio brasilero y un 3% de América del sur, habita particularmente en medio de los bosques de *Araucaria angustifolia*. En Brasil abarca 450.000 km² lo que representa un 83,33% de la superficie total, comprendiendo la región centro-norte de Río grande do Sul, casi todo el estado de Santa Catarina, centro-sur y sudeste de Paraná, sur de Mato Grosso, y reducidos nichos de ocurrencia de araucaria, en Minas Gerais y San Pablo (Malheiros y Rotta, 1985; Ceconi *et al.*, 2007; IBRAMATE, 2018). Con gran difusión en las sierras y mesetas del oriente paraguayo.

En Argentina, el área de distribución comprende la provincia fitogeográfica Paranaense (Corrientes y Misiones), encontrándose silvestre en los bosques con araucaria de las serranías del noreste de Misiones. También habita en regiones de menor cota en plantaciones, llegando hasta el norte de Corrientes en 80-100 msnm; mientras que el límite sur de su distribución se encuentra en Uruguay (departamento Maldonado), pero de forma aislada en determinados microclimas. (Giberti, 1990; Heuser *et al.*, 1993).

El clima predominante es “Cfb” de Köeppen, templado sin estación seca, con temperatura del mes más cálido inferior a 22 °C. La especie, es también encontrada en el tipo climático “Cfa” (subtropical húmedo) y “Cwa” (subtropical con invierno seco). La precipitación media anual está en torno a 1.500 mm. La presencia de Yerba mate es más frecuente en suelos con bajo tenor de nutrientes intercambiables y alto de aluminio (Malheiros y Rotta, 1985).

C. El cultivo de yerba mate.

1. Material genético.

La Yerba Mate es un cultivo perenne, por lo cual, las plantaciones deben ser de alta calidad genética, con semillas de progenies seleccionadas y mejoradas, u otras progenies que garantizan una superioridad genética.

En Argentina, el INTA ofrece material genético seleccionado por mayor rendimiento, adaptabilidad ambiental y homogeneidad, resultado de un programa de mejoramiento genético iniciado en 1974, con huertos semilleros instalados en Cerro Azul y San Vicente, Misiones, en los años 88 y 94, respectivamente (Belingeri y Prat Kricun, 1992; Scherer, 2002; Prat Kricun, 2013). El material seleccionado (Pg. 538 biclonal, y Pg. policlonal) se comercializa como semilla certificada (INASE), limpia y preparada para la siembra.

En Brasil, el Embrapa Florestas y Epagri, presenta una selección genética de yerba mate, cultivar seminal SCSBRS Caa rari, progenie biclonal Cambona 4 y cultivares clonales BRS 408, BRS 409, BRS BLD Apaba, BRS BLD Yari, con aptitudes destacas para el cultivo. (Ferreira y Goulart, 2019).

La recolección de plantas de origen genético desconocido, implica la selección de frutos de plantas sanas, con buena formación de copa y alta producción de hojas (Belingeri y Prat Kricun, 1992; Fontana y Prat Kricun, 1992).

2. Recolección de frutos y acondicionamiento de las semillas.

La Yerba mate florece entre agosto-octubre, con frutos maduros entre enero-marzo siguiente. La recolección de los frutos se realiza a mano, cuando los frutos se encuentren con una coloración violácea a negruzca, para una adecuada separación de las semillas (Fontana y Prat Kricun, 1992; Scherer, 2002; Burtnik, 2005; Prat Kricun, 2013).

Para la extracción de la semilla, se rompen los frutos por acción mecánica, en pequeñas escalas se usan bolsas aplastando los frutos con ayuda del agua; y con

volúmenes mayores, se utilizan molinos que permiten el pasaje de las semillas sin romperlas y asegurando que no queden frutos enteros. Los frutos procesados se separan en semillas y hollejo¹⁰ con la ayuda de agua, en recipientes de gran volumen, donde las semillas decantan en el fondo y el hollejo de menor densidad queda en superficie (Burtnik, 2005). No se debe arrojar el agua utilizada en la limpieza de las semillas en cursos de agua o sobre cultivos, porque contienen saponinas y taninos que pueden producir la muerte de peces y organismos del suelo, por lo cual, son adecuadas las camas biológicas para desechos de esta naturaleza.

Las semillas limpias, sin restos de los frutos y secas se depositan en bolsas de arpillera o se almacenan en bolsas de polietileno con rótulos indicando lote de cosecha, progenie, fecha de cosecha y procedencia. Las bolsas con semillas se conservan refrigeradas entre 4-6 °C, hasta su siembra (Scherer, 2002).

Fontana y Prat Kricun (1992) estiman que el rendimiento promedio de semillas es de 130 g kg⁻¹ de fruto, con producciones por planta de 4 a 12 kg de frutos.

3. Siembra

Se realiza en almácigos contruidos en sitios altos y bien ventilados, con una cobertura o umbráculo de 2 m de altura para evitar los efectos de la fuerte insolación y facilitar las tareas, con sustrato de buenas características físicas y químicas (Prat Kricun, 1991; Fontana y Prat Kricun, 1992; Scherer, 2002; Burtnik, 2005; Prat Kricun, 2013; Capellari, 2017).

Otra alternativa, es la siembra en cajones que permiten movilidad y mejor control de la germinación. Estos cajones pueden ser de ½ a 1 m², donde se utiliza un sustrato bajo en contenido de nutrientes con buenas propiedades físicas para la retención de agua. Sustratos de corteza de pino compostada, cascarilla de arroz carbonizada, o sustratos de turba de musgos como por ejemplo sphagnum¹¹ con el agregado, si se requiere, de perlita¹², presentan muy buenas cualidades. Estos sustratos no presentan semillas y patógenos por su método de obtención, son medianamente inertes pero capaces de brindar muy buenas condiciones físicas para la germinación, lo que permite un buen manejo sanitario y de fertilización (Prat Kricun, 1991; Fontana y Prat Kricun, 1992; Burtnik, 2005; Molina *et al.*, 2017 a; Capellari, 2017).

¹⁰ hollejo: restos de frutos, compuesto por partes blandas, mesocarpio y pericarpio.

¹¹ sphagnum: género de musgos, llamados turberas, muy utilizado en mezclas de sustratos.

¹² perlita: mineral de vidrio volcánico amorfo, hidrófilico y expandente usado en mezclas de sustratos.

La siembra se realiza con 500 g de semilla por m² en una capa bien distribuida y se agrega sobre la misma una capa delgada de sustrato (1 cm), sobre esta puede agregarse material vegetal o una cubierta con un túnel de polietileno incoloro de 50-60 micrones de espesor para evitar la evaporación y además reducir el riesgo por aves (Burtnik, 2005).

4. Germinación y repique.

La germinación comienza a los 100-120 días de la siembra alcanzando la plenitud entre los 210-270 días, luego se prolonga con menor intensidad hasta los 360 días (Fontana y Prat Kricun, 1992). Durante todo este período son importantes los controles sanitarios para prevenir el “damping-off” o “mal de los almácigos”.

Los tratamientos pre-germinativo de estratificación se utilizan para homogeneizar la germinación, dejando la semilla almacenada en cajones o tambores, en capas sucesivas separadas por arena mediana durante 6 meses. Los riegos se efectúan una vez por semana en el caso de falta de lluvias, manteniendo un buen nivel de humedad y evitando el encharcamiento con un adecuado drenaje (Fontana y Prat Kricun, 1992).

El porcentaje de germinación alcanza entre 13% a 14% con variaciones entre años de 2% a 73%. Por kilogramo de semilla se obtienen, aproximadamente 20.000 a 30.000 plántulas (1 kg de semillas: 135.000-156.000 semillas) (Prat Kricun, 1991; Fontana y Prat Kricun, 1992; Prat Kricun, 1995), según las condiciones ambientales anuales.

Las semillas estratificadas inician la germinación entre los 30 a 60 días de la siembra, concentrándose la misma entre 90 a 180 días, con una reducción en su germinación de aproximadamente un 25%, con respecto a las semillas no estratificadas (Medeiros, 1998; Zanon, 1998).

El trasplante o repique de la plántula se produce a los 120 días de la emergencia, con 3-4 hojas y 2-4 cm. de altura, se efectúa en los viveros durante todo el año, con picos entre los meses de octubre a diciembre (Fontana y Prat Kricun, 1992). La sobrevivencia del material repicado alcanza en promedio entre 65 a 85%, según la destreza del personal y los cuidados posteriores (Prat Kricun, 1995; Scherer, 2002; Capellari, 2017).

5. Producción de plantines

Se realizan en viveros construidos con postes de madera dura o de aluminio. Antes se utilizaba material vegetal (chilca, tacuara, palmera, pasto elefante, etc.) lo que

requiere una estructura más reforzada y compacta por su mayor peso, hecho que no sucede actualmente cuando se utiliza media sombra plástica al 80% (Fontana y Prat Kricun, 1992; Prat Kricun, 1995; Burtnik, 2005).

Los viveros actuales utilizan contenedores de polietileno o bandejas con tubetes, estos últimos permiten un mayor aprovechamiento de la superficie cubierta, alcanzando con macetas de polietileno de 30 a 40 micrones de espesor, de 15 cm de alto por 8-10 cm de diámetro, una capacidad de 200-250 macetas por m² y con tubetes plásticos de 14,5 cm de alto con un diámetro interno de boca de 4 cm, la capacidad se eleva hasta 450-500 tubetes por m². Además los tubetes presentan la ventaja de ser reutilizables, con una reposición anual de 20% por deterioro o pérdidas. El empleo de macetas o tubetes individuales permite un mejor aprovechamiento del riego y una rápida clasificación por tamaño (Prat Kricun, 1995; Scherer, 2002; Capellari, 2017).

Es posible complementar la producción de plantas en un vivero convencional por semilla, con la propagación vegetativa por medio de estacas, obtenidas de plantas juveniles de 12 a 18 meses de edad (Molina, 2017). Deben seleccionarse plantas de buen desarrollo (30 cm a 40 cm de altura), que permitirán obtener de 2 a 3 estacas de 6 cm a 8 cm de longitud y 2 a 4 mm de diámetro (Prat Kricun, 1995). Referido a la propagación por estacas, Molina y Mayol (2003) determinaron una longitud de 5-6 cm y diámetro de 5 mm como las mejores medidas para enraizamiento. La estaca se inserta en forma vertical en el centro de la maceta o tubete, en una mezcla previamente desinfectada de sustrato comercial de pino y arena mediana en la relación 1:1, sin fertilizante (Prat Kricun, 1995). Molina; Mayol *et al.* (2017), recomiendan cascarilla de arroz carbonizada (CAC), como mejor sustrato o su combinación con perlita, vermiculita, cascara de pino compostada o turba, luego de evaluar estos y sus combinaciones. Es recomendable dejar ½ lámina foliar en la estaca para favorecer la supervivencia. Molina y Mayol (2004) destacan que el periodo crítico para la caída de la hoja es de un mes y que la permanencia o caída de la hoja se relaciona con el enraizamiento o muerte de la estaca, respectivamente, como también lo describe Tarragó *et al.* (2002), refiriéndose a la promoción del enraizamiento relacionado a la presencia de la lámina foliar. El estaqueo se realiza entre los meses de octubre a diciembre, con túnel durante 90 días, luego se retira e incorporará un fertilizante completo de liberación lenta a razón de 1 g por planta. Las plantas pasan por una progresiva rustificación con reducción paulatina de la sombra y riego, para su trasplante, a partir de mayo (5-7 meses) (Cortezzi Graça, 1988, Prat

Kricun, 1995; Burtnik, 2005). En estaqueos entre enero y marzo, el túnel permanece por 180 días y la planta se trasplanta en mayo del año siguiente (14-16 meses). En ambas épocas el porcentaje de prendimiento fluctúa entre 84% a 96%, sin el empleo de hormonas promotoras del enraizamiento o sustratos especiales (Cortezzi Graça *et al.*, 1988; Sand, 1989). En trabajos de enraizamiento realizados por Molina; Sapa *et al.* (2017), observan que la putrescina y su combinación con ácido indolbutírico, mejora la longitud y materia seca en raíces con dosis crecientes para estacas de yerba mate, pero no modifica el porcentaje de enraizamiento.

6. Consideraciones para la Plantación.

La baja disponibilidad actual de suelos agrícolas vírgenes, conlleva que las nuevas plantaciones deban efectuarse en suelos con uso agrícola o forestal, donde necesitan una recuperación. La recuperación consiste en eliminar todos los restos de los cultivos previos, en particular si vienen de yerba mate, a los efectos de cortar el ciclo de patógenos de suelos. También por medios mecánicos o químicos, se deben controlar las gramíneas perennes o anuales, rizomatosas y cespitosas, en particular durante los meses de invierno e inicio de primavera, actividad que debe repetirse entre enero y febrero.

En general los suelos presentan bajos niveles de materia orgánica (1,5 a 2%), con presencia de capas compactadas que, deben eliminarse con subsoladores a profundidades de 60 a 80 cm, a los efectos de favorecer la infiltración, disminuir la escorrentía y favorecer el desarrollo de las raíces del futuro cultivo (Prat Kricun, 1995; Burtnik, 2005; Dalurzo, 2017; Llera y Medina, 2017). El incremento de la materia orgánica puede efectuarse por medio de abonos verdes (p.e. "Pasto Elefante", *Pennisetum purpureum*) durante 2 o 3 años o por incorporación de abonos orgánicos (p.e. cama de ave, expeller de tung, abono de corral, desechos de yerba mate o té y aserrín) con proceso de descomposición previo, estabilizado y con relación C/N adecuado.

Las experiencias han demostrado además, importante elevación en el nivel de nitrógeno por la asociación de la especie con fijadores libres, así como también incrementa los niveles de K, Ca, Mg, por efecto de la extracción que efectúan las raíces en horizontes profundos (Piccolo, 1995; Prat Kricun, 1995). Los volúmenes a producir o distribuir varían en función de la especie para abono y la disponibilidad de

material orgánico, respectivamente, pero se estima como valor adecuado entre 20 a 30 t ha⁻¹ (Prat Kricun, 1991).

La plantación de yerba mate requiere de una ajustada y elaborada programación ya que, por tratarse de un cultivo perenne, cualquier improvisación lleva al fracaso y a la imposibilidad de obtener un cultivo homogéneo y productivo. Considerando la vida productiva larga, aciertos o errores en la asignación y manejo de los recursos suelo-planta, determinaran en gran medida el futuro productivo y la rentabilidad de la explotación (Prat Kricun, 1991; Establecimiento Las Marías S.A.C.I.F.A., 1992; Burtnik, 2005; Llera y Medina, 2017).

La selección y preparación del terreno, su nivelación y marcación, disposición distanciamiento y densidad, época de plantación, material genético adecuado en calidad y cantidad, semillas de cubiertas verdes, fertilizantes, plaguicidas, maquinaria adecuada y personal capacitado, son solo parte de las variables necesarias a considerar previo a la realización de cualquier plantación. La falta de una o algunas de estas variables, significarán mayores costos, menores ingresos y constantes problemas (Burtnik, 2005).

7. Suelos aptos para el cultivo.

Bajo la denominación de “suelos rojos” se encuentran los suelos lateríticos, con las mejores aptitudes agrícolas de la región, cuyo uso predominante es la producción yerbatera y otros cultivos perennes como el té y frutales, en función a sus diferentes grados de pendientes que definen su susceptibilidad a la erosión hídrica y los niveles de fertilidad, capacidad de intercambio, acidez y aluminio. Se puede establecer una gradación de aptitud que va de los Alfisoles con buena fertilidad y pendientes menores al 5%, Ultisoles, y hasta los Oxisoles con muy baja fertilidad y elevados tenores de aluminio (Prat Kricun, 1991; Establecimiento Las Marías S.A.C.I.F.A., 1992; Burtnik, 2005; Dalurzo, 2017).

En un estudio de estos perfiles y sus análisis, se aprecia una marcada diferencia entre la fertilidad entre los horizontes superficiales y profundos. Los primeros bajo monte, son siempre ricos, con una saturación de bases que llega a 60-80%, con abundante potasio y fósforo total. La capacidad de intercambio que en profundidad es baja, en dicho horizonte se eleva sustancialmente por la cantidad de materia orgánica. La fertilidad puede perderse rápidamente por erosión o falta de reposición de materia orgánica, por estas causas, es muy importante reducir labores de suelo, reponer

nutrientes y mantener alto el contenido de materia orgánica, para una adecuada provisión de nitrógeno por descomposición de la materia orgánica, que asegura la producción de hojas (Prat Kricun, 1991).

Por otro lado, se encuentran los suelos toscos, jóvenes, poco evolucionados o evolucionados, derivados de meláfiro alterado y fracturado hasta una profundidad de 2 m, ligeramente ácidos, permeables y fértiles. Se distinguen dos fases a) en terrenos llanos o poco inclinados, con escaso peligro de erosión y perfil medianamente profundo y b) en terrenos fuertemente inclinados, con fuerte peligro de erosión y perfil superficial. La primera fase es la recomendada para yerba mate. Forman parte de los suelos con mayor fertilidad química de la región y se citan con el nombre de suelos toscos o pedregosos, por la presencia de fragmentos de roca, a veces en los primeros centímetros del perfil. Derivan de la alteración del basalto, con poca profundidad y poco desarrollo. Los contenidos de calcio, potasio, nitrógeno y fósforo son muy altos, la gran cantidad de fragmentos de rocas en curso de alteración en el perfil, reconstituyen en forma continua las reservas de minerales extraídos por la vegetación natural, cultivos y la lixiviación (Prat Kricun, 1991). Estos suelos presentan por el contrario limitaciones físicas y menor profundidad para el desarrollo radical lo que ocasiona menores rendimientos y una vida más corta del cultivo (CARTA, 1964; Ligier *et al.* 1990; Establecimiento Las Marias S.A.C.I.F.A., 1992, Dalurzo, 2017; Llera y Medina, 2017).

8. Distancias de plantación y densidades.

Para la realización de nuevas plantaciones, la distancia y densidad dependerán del manejo a realizar, tradicional, mecanizado o con cultivos intercalares anuales, calidad del lote, tipo de maquinaria y mano de obra disponible.

Tabla 1. Distancias de plantación y densidades en Yerba mate con un manejo tradicional.

Distancia entre líneas (m)	Distancia entre plantas (m)	Densidad (pl ha ⁻¹)
3,50	1,50	1900
3,50	1,25	2280
3,00	1,50	2220
3,00	1,25	2660

Pueden emplearse en líneas de plantación simples densidades de 1.900 a 4.400 pl ha⁻¹, con distancias entre líneas de 2,25 m a 3,5 m y entre plantas de 1,5 m a 1 m (**Tabla 1, 2 y 3**). Con estos parámetros se logra, un mayor rendimiento, mejor utilización de recursos, menores costos fijos y consecuentemente mayor productividad.

Esto asegura una cobertura natural del suelo, que evita su degradación por insolación y disminuye el efecto erosivo de las altas precipitaciones (Prat Kricun, 1991; Prat Kricun y Belingheri, 1992; 1997; Burtnik, 2005; Llera y Medina, 2017).

Tabla 2. Distancias de plantación y densidades en Yerba mate con un manejo mecanizado.

Distancia entre líneas (m)	Distancia entre plantas (m)	Densidad (pl ha ⁻¹)
2,50	1,50	2660
2,50	1,25	3200
2,50	1,00	4000
2,25	1,50	2960
2,25	1,25	3550
2,25	1,00	4440

Tabla 3. Distancias de plantación y densidades en Yerba mate con Manejo de cultivos intercalares anuales.

Distancia entre líneas (m)	Distancia entre plantas (m)	Densidad (pl ha ⁻¹)
4,50	1,50	1480
4,50	1,25	1770
4,50	1,00	2220

Según trabajos de Prat Kricun y Belingheri (1992), realizados en Puerto Esperanza (Misiones) y Gob. Virasoro (Corrientes), la disposición en líneas simples resultan en términos generales, superiores a la de líneas dobles, con igual número de plantas, respecto al rendimiento. Además implica menores costos debido a tareas más sencillas de plantación y limpieza (**Figura 2**).



Figura 2. Cultivo de *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate) en líneas simples, de 10 años de edad, en plena brotación, Cerro Azul, Misiones, Argentina. (Foto: Ing. Agr. Matías M. Skromeda).

9. Métodos de plantación y épocas.

El lote debe ser dividido en cuadros con pendientes homogéneas, donde se corrigen desniveles o posos, se rectifican las líneas básicas y se marcan las líneas de plantación. Para superficies medianas a grandes, la marcación de las líneas a nivel y el surcado se realiza por medio de un subsolador, a una profundidad de 0,40-0,60 m, para simplificar la posterior plantación (Burtnik, 2005). Cuando no sea posible el uso de este implemento, como en lotes con uso forestal previo, por la presencia de los tocones, se realizaran pozos con pala u hoyador mecánico, con una profundidad de 30-40 cm y un diámetro de 20-25 cm. En superficies amplias de suaves pendientes es factible efectuar la plantación mecanizada, por medio de plantadoras forestales modificadas (Prat Kricun, 1991; Llera y Medina, 2017).

Para las plantas en envases o tubetes plásticos, el período de plantación se extiende del 15 de abril al 15 de septiembre (Establecimiento Las Marías S.A.C.I.F.A., 1992; Burtnik, 2005), no obstante resulta conveniente adelantar la plantación a los meses de abril a mayo, favoreciendo que la planta desarrolle durante el período otoño-invernal un adecuado sistema radical, que le permitirá superar con éxito los efectos de las altas temperaturas y reducidas precipitaciones, frecuentes en el período de transición invierno-primaveral. En plantaciones bajo media sombra, de monte natural o forestación raleada, el período de plantación comprende todo el año.

Con posterioridad a la plantación efectuada a pleno sol, se debe colocar una protección para la planta para evitar la alta insolación primavero-estival, ubicada en posición noroeste, la cual puede fabricarse con paja de vetiver, debobinado de eucalipto o costaneros de pino resinoso (Burtnik, 2005). No son recomendables las protecciones vivas, como mandioca, soja o arroz, ya que su competencia por agua en períodos estivales, puede acarrear la muerte de la joven planta de yerba. Es factible prescindir de esta protección con plantas jóvenes, sometidas a un adecuado y progresivo proceso de rustificación, con una programada reducción de riegos e incremento de la insolación (Prat Kricun, 1991).

10. Cuidados posteriores a la plantación.

Hasta el 2º año de vida de la plantación se replantan las fallas, primero en el mes de septiembre del año de implantación, los sucesivos en la época de plantación de los 2 años siguientes. Los porcentajes de fallas para obtener una plantación homogénea y equilibrada deben oscilar entre el 3 a 8% el primer año y menos del 3% en segundo

año. Los replantes se efectúan con plantas de buen desarrollo y adecuada rustificación, con fallas inferiores al 3% luego del primer año no se recomienda replantar (Burtnik, 2005).

Durante los tres años siguientes a la plantación, es necesario asegurar la limpieza en las líneas ya que, en esa etapa la planta es muy susceptible a la competencia de las malezas por nutrientes, agua y luz, a niveles de reducir el crecimiento y hasta provocar su muerte. Esta limpieza puede efectuarse por medio de carpidas manuales y/o aplicaciones dirigidas con herbicidas. El producto y el número de aplicaciones, dependerán de la maleza presente y su grado de competencia (Prat Kricun, 1991; Burtnik, 2005; Dávalos, 2017).

En el entresurco o calle se efectúan controles mecánicos con cultivador, desmalezadora o rolo cuchilla y controles químicos con herbicida (Prat Kricun, 1991; Christin, 1992; Dehle, 1992). Es factible efectuar cubiertas verdes de invierno y verano, en combinación con la vegetación nativa. Entre las invernales se destacan Rye-grass (*Lolium sp.*), avena negra (*Avena strigosa*), cebadilla criolla (*Bromus sp.*) o pasto romano (*Phalaris sp.*). A estas cubiertas puede agregarse, a partir del 4º o 5º año, *Vicia villosa*. Las estivales más frecuentes son caupí (*Vigna sp.*), mucuna (*Mucuna sp.*) y poroto sable (*Canavalia sp.*) (Prat Kricun, 1991; Dehle, 1992; Establecimiento Las Marías S.A.C.I.F.A., 1992; Piccolo, 1992, 1995; Burtnik, 2005).

Con relación a las plagas, el ácaro del brote (*Dichopelnus notus*) y el psílido o rulo (*Gyropsylla spegazziniana*), durante esta etapa se efectúan monitoreos de ambos y su control de ser necesario, ya que infestaciones severas debilitan o deforman las plantas jóvenes, e incluso llegan a provocar la muerte de gran número de ellas (Prat Kricun, 1991; Burtnik, 2005). Luego del tercer año, se realiza la primera poda de formación y el cultivo comienza con sus primeras podas de producción o cosechas en años posteriores.

D. Podas, tipos y aplicaciones.

La yerba mate siendo un cultivo perenne y una especie arbórea, cuya importancia económica son las hojas y ramas finas, debe ser sometida a diferentes prácticas de manejo de su arquitectura natural para poder disminuir la producción de madera y lograr el producto de cosecha.

Las podas tienen el objetivo de modificar la arquitectura, tendiendo a formar una planta baja y sin dominancia apical, con abundante producción de follaje. El manejo de

estas comprende varias clases de podas, las de formación y producción constituyen dos prácticas básicas; la de limpieza y renovación representan tipos específicos, importantes para asegurar y mantener altas producciones (Mayol, 1997).

De acuerdo con Almeida y Araujo (1994), la poda es un artificio cultural que consiste en la eliminación de partes de la planta, dando a la copa una configuración adecuada al cultivo, con el propósito de mejorar y regularizar las condiciones de producción, aumentando la productividad, mejorando la apariencia de los frutos y manteniendo el equilibrio fisiológico. La poda exige conocimiento de su finalidad, de la fenología de la planta y época oportuna de realización, considerando el flujo vegetativo.

1. Poda de formación.

El desarrollo diferencial de yemas y ramificaciones es un importante factor que determina la forma de las plantas leñosas; en las especies arbóreas la forma de la copa está controlada por un activo meristema apical que inhibe las yemas laterales, denominado comúnmente dominancia apical (Establecimiento Las Marías S.A.C.I.F.A., 1992; Mayol, 1997, 2017).

El objetivo fundamental de este tipo de poda, consiste en eliminar la dominancia apical, favorecer el desarrollo de ramas laterales, lograr una rápida cobertura del suelo y obtener una estructura baja y amplia, capaz de producir un gran número de tallos verticales o “banderas”¹³, base del rendimiento de hoja verde (Burtnik, 2005).

Considerando estos objetivos se efectúa un corte bajo a 10-20 cm del nivel del suelo, sobre ramas centrales de 2 a 2,5 cm de diámetro y se realiza una quiebra apical manual o con tijera de las ramas verdes (Prat Kricun y Belingheri, 2003^b; Mayol, 1997, Burtnik, 2005; Mayol, 2017), además incluye, en esta poda, la extracción de ramas defectuosas, dañadas y mal situadas en la planta, cortando las mismas desde la inserción (Burtnik, 2005). Es posible realizar esta poda en dos etapas, a efectos de dejar siempre protegida la planta con follaje. En la primer entrada, dependiendo de la cantidad de ramas, se puede podar el 50% de las mismas, dejando en ramas secundarias un remanente de 10-12 cm desde su inserción, llamado “aumento”¹⁴, y el porcentaje restante correspondería a la segunda entrada al año siguiente. Luego del corte de las ramas principales y de mayor diámetro, a partir del aumento, se

¹³ banderas: ramas de mayor longitud y diámetro que el promedio de la planta, con neta dominancia apical.

¹⁴ aumento: porción de rama de 120-150 mm que se deja en la planta luego de la cosecha.

desarrollan diversos brotes de los cuales para su conducción, deben ser seleccionados los más vigorosos y mejor distribuidos, debido a que representarán las futuras ramas secundarias y terciarias, formando de esta manera la estructura principal de la planta.

Respecto a la época, Kurtz (1996), Mayol (1997), Prat Kricun y Belingheri (2003) y Mayol (2017) coinciden en realizarla en la época de menor actividad fisiológica, es decir en el receso invernal del crecimiento.

Trabajos realizados por Prat Kricun y Belingheri (2003), indican el efecto de la poda de formación sobre los rendimientos posteriores, realizarla al 3º año de implantación significa incrementos de 37% (± 8), respecto a las podas de formación efectuadas en parcelas jóvenes al 1º o 2º año de implantación. Estos son resultados que avalan en parte la costumbre de los antiguos plantadores de efectuar la poda al 3º o 4º año de implantación, luego del período de heladas. De esta manera se asegura tener plantas perfectamente equilibradas entre sus fracciones aérea y radicular, con una mejor respuesta productiva en la propia poda y en las siguientes cosechas.

2. Poda de producción o cosecha.

El cultivo de yerba mate entra en producción a partir del tercer o cuarto año de implantado, dependiendo del desarrollo de las plantas, condicionado por el genotipo, las condiciones climáticas, edáficas y de manejo. Este tipo de poda representa la cosecha propiamente dicha y consiste en la extracción de hojas y ramas finas que son las partes de importancia económica (Mayol, 1997).

En Brasil, Takeuchi *et al.* (2011), describen tres niveles tecnológicos de producción de Yerba Mate en el estado de Paraná, extractiva, no tecnificada y tecnificada. Predominando el sistema de producción extractivista, debido a grandes extensiones de rodales nativos. En Argentina, según el sistema de cosecha y el nivel de tecnología aplicado se podrían dividir en 3 tipos: manual, semi-mecanizado y mecanizado, orientados al monocultivo. En Paraguay el sistema es similar al argentino con cosecha manual y semi-mecanizado.

La cosecha manual hace referencia al uso de implementos manuales como tijeras de podar, tijerones, serruchos, motosierras para realizar la poda y posterior extracción de ramas finas y hojas, implicando un trabajo completamente manual.

La cosecha mecanizada representa una cosecha con máquinas cosechadoras exclusivas, que realizan una cosecha tipo mesa en un cultivo adaptado para tal condición.

Por último, la situación intermedia se refiere a la cosecha semi-mecanizada. Esta se caracteriza por una extracción manual pero con herramientas más sofisticadas desde el punto de vista tecnológico, como tijeras electrónicas o neumáticas para el corte de ramas y el uso de quebradoras de pequeñas dimensiones autopropulsadas o bien de mayores dimensiones de arrastre para tractores, con tolvas para la colecta del material de cosecha. Dichos sistemas varían y están sujetos a las tecnologías adaptativas que implementan los productores y empresas metalúrgicas afines.

Básicamente existen dos prácticas que son realizadas en las cosechas, el “viruteo” y “poda de banderas”.

Viruteo: consiste en retirar a mano las ramas finas dominadas, comúnmente denominadas virutas. Según Munaretto (1992) y Tkachuk (1996), esta tarea comienza de adentro hacia afuera y de abajo hacia arriba, para que en cada rama permanezcan brotes que permitan la expansión lateral de la planta. La extracción se debe realizar con cuidado, a los efectos de prevenir el desprendimiento de la corteza de la rama en la cual se inserta la rama dominada (viruta), disminuyendo de esta manera la posible entrada de patógenos y favoreciendo una mayor velocidad de cicatrización. Cuando no es retirada la viruta, en el periodo invernal la planta entra en senescencia con posterior caída y pérdida del follaje. La época, según Munaretto (1992) y Mayol (1997), para la realización de esta práctica se halla comprendida entre los meses de abril a junio.

Poda de banderas: en la planta de yerba mate, las banderas representan las ramas dominantes, ubicadas en su mayoría en la parte superior de la misma y protegen a las plantas de las adversidades climáticas como función secundaria. Cuando se realiza la poda de banderas, es importante considerar el diámetro, grado de madurez y ubicación de la rama. Se deben cortar ramas maduras que hayan alcanzado un estado avanzado de madurez identificado por adquirir una coloración gris típica, resultado de la lignificación y un diámetro mínimo de 2 cm, dejando una porción de 10-12 cm desde la inserción de la rama, la cual se denomina “aumento”, es aconsejable conseguir una separación adecuada entre los mismos, ya que darán origen a los nuevos cargadores de ramas y hojas, que formaran la estructura de la planta. En función de la fertilidad del suelo, estas ramas pueden ser cortadas con 18 meses de edad, de manera de

permitir que las mismas se desarrollen y alcancen la madurez y diámetro adecuado para su extracción.

El corte se debe realizar con inclinación hacia el centro de la planta, debido a que generalmente se desarrolla la yema ubicada en el extremo superior del aumento permitiendo la expansión lateral, y además con este corte en bisel se evita la acumulación de agua. De esta forma, se logra una adecuada distribución de ramas, con suficiente área foliar remanente, disminuyendo el auto sombreado en el período de brotación, permitiendo la entrada necesaria y homogénea de radiación solar, mejorando la eficiencia fotosintética y resultando en una mayor brotación de la planta. Al igual que en la poda de formación, es frecuente encontrar varias ramas en una misma ubicación o aumento, siendo importante ralear las mismas dejando las más desarrolladas y mejor ubicadas (Mayol, 1997; Burtnik, 2005).

Munaretto (com. per., 2014) describe a la cosecha como una sola intervención al año, comúnmente denominado “corte de ramas maduras”, que consta de 5 tareas básicas consecutivas:

a) *Viruteo*: a mano sin herramientas, extrayendo material fino desde adentro hacia afuera y de abajo hacia arriba, para que en cada rama quede un brote que permita la expansión lateral, sin dañar la corteza.

b) *Limpieza*: implica la extracción de ramas secas, mal ubicadas, defectuosas, dañadas, con “macetas” o “san antonios” (nudos) y enfermas, todas aquellas que no son productivas.

c) *Corte de ramas maduras*: extracción con serrucho o tijera de ramas maduras de coloración gris y de diámetro mayor a 2 cm dejando un aumento de 12 a 15 cm desde la inserción. En ramas muy juntas se debe dejar una con aumento y la otra eliminar cortando al ras en la inserción.

d) *Raleo de verdes*: seleccionar las ramas dominantes y en mejor ubicación, originadas por brotación desde un aumento del año anterior. Deberán quedar 1 o 2 ramas por aumento en caso que estén bien distribuidas. También el raleo y selección de chupones que pudieran salir desde la base de la planta.

e) *Mboreví-carú*: Se denomina así, al quiebre apical de las ramas principales sobre la misma planta, dejando parte de las mismas con hojas. Se efectúan en ramas verdes que no alcanzan el grosor o madurez y que son demasiado altas. El objetivo es lograr que las ramas maduren para el año siguiente, se rompa la dominancia apical

propiciando más ramificaciones y hojas; se evita además el vuelco de ramas muy altas por efecto del viento.

En síntesis el objetivo de toda poda productiva, más allá de las variantes que pueda haber, es brindar las mejores condiciones a la planta propiciando una mayor producción de hojas y ramas finas, con el menor daño posible y comprendiendo que la poda incide directamente en el rendimiento del cultivo al año siguiente.

Tipos de poda de producción o cosecha. Según varios autores, Christin, (1988); Munaretto, (1992); Burtnik *et al.*, (1996); Mayol, (1997); Prat Kricun y Belingheri (2003); Burtnik (2005) y Mayol (2017), los tipos de cosechas pueden ser varios según se aplique las podas de limpieza y cosecha, de acuerdo a la época en que se realiza y la cantidad de entradas al año.

Se describen tipos de cosechas, Tradicional, Tradicional mejorado, Corte parejo, Viruteo y poda de ramas maduras, Melena y poda de ramas maduras, Poda de ramas maduras, Cosecha tipo mesa, Sistemas mixtos, entre otros.

De manera resumida, las diferencias básicas entre estos tipos de podas son fundamentalmente, que en el sistema tradicional se realiza una entrada en febrero-marzo extrayendo virutas y otra entrada en julio-agosto con la extracción de todas las banderas. El sistema tradicional mejorado considera un remanente entre 25-35% de banderas. El sistema de corte parejo realiza la extracción de virutas y banderas en una sola entrada al año, considerando ramas maduras para extraer y quedando como remanente las verdes. El sistema de viruteo y poda, similar al tradicional mejorado, en dos épocas, con la diferencia que el corte de banderas solamente implica la extracción de ramas maduras y raleo de ramas verdes. El sistema de melena y banderas igual al sistema viruteo y bandera con la diferencia que acopla la poda de limpieza en la primera entrada. El sistema tipo mesa, simula una cosecha mecanizada levantando la altura de corte año a año. Los sistemas mixtos utilizan ciclos de cortes con varios sistemas.

Concordando con Prat Kricun y Belingheri (2003), existen muchos tipos y sistemas de poda y cada autor enfoca la poda de producción de manera diferente, por lo tanto esta poda puede considerarse más un arte que una ciencia, ya que el desconocimiento de la fisiología de la planta de yerba mate, es todavía amplio.

3. Poda de limpieza.

Representa una práctica que puede ser realizada durante o después de la poda de producción o cosecha. Consiste en extraer ramas próximas, entrecruzadas, eliminar partes con acúmulo de yemas (comúnmente llamados “macetas” o “san antonios”), todas aquellas en mal estado o dañadas por insectos o enfermedades. Finalizando con una arquitectura equilibrada con ramas equidistantes, con buena sanidad y fisiológicamente productivas (Munaretto, 1992; Mayol, 1997; Burtnik, 2005 y Mayol, 2017).

4. Poda de renovación o rejuvenecimiento.

Debido a que la estructura de la planta de yerba mate se degrada con el tiempo, como consecuencia de las repetidas cosechas, envejecimiento natural, exposición a las adversidades climáticas, ataque de plagas y enfermedades, que disminuyen progresivamente los rendimientos, se debe renovar dicha estructura y la capacidad de producción de hojas y ramas finas, y es lo que implica este tipo de poda. También se aplica en plantas con buen estado fisiológico y sanitario, pero con excesos de alturas, que dificultan las tareas de cosecha (Burtnik, 2005).

Este tipo de poda consiste principalmente en cortar con motosierras, lo más cerca del suelo posible (0,10 a 0,20 m), para poder reemplazar la estructura vieja de la planta por renuevos sanos y vigorosos, que serán manejados con posteriores podas de formación (Llera *et al.*, 2017).

Puede dividirse en poda hortícola y sistemática. La hortícola consiste en la renovación gradual de la parte aérea de la planta, que en un término de 3 a 4 años, es reemplazada totalmente. De esta forma las plantas se van renovando y continúan en producción.

La poda sistemática elimina el material de la planta por alturas o ramas de la planta. Es posible realizar el decepado completo al ras del suelo siempre que las condiciones meteorológicas, sanitarias y fisiológicas sean las adecuadas, de lo contrario, se pierden muchos individuos por ser una medida muy drástica con gran eliminación de reservas en el tronco. Con esta metodología, se debe tener en cuenta que, hasta la entrada a cosecha, transcurrirá un tiempo importante donde no habrá producción. El rebaje sistemático puede ser realizado por porcentajes, por alturas o ramas, comúnmente dividiendo las plantas en cuatro, tres o dos partes y realizando en diferentes períodos por 25, 33 o 50 % respectivamente en cada período, con la

ventaja de que la pérdida de producción no es total (Burtnik *et al.*, 1996; Mayol, 1997; Burtnik, 2005).

En general los aspectos a tener en cuenta en los tipos de poda, deben abordar conceptos de intervención capaces de lograr a) mantener la planta en fase vegetativa, b) estimular la producción de hojas y ramas finas, c) con una estructura adecuada que soporte a estas, d) manteniendo dicha estructura con la renovación progresiva y a una altura considerable para las labores del cultivo.

E. Aspectos ecofisiológicos.

La Ecofisiología de Cultivos, o sea, el conocimiento de los procesos y mecanismos determinantes del crecimiento y del rendimiento de los cultivos en interacción con el ambiente, puede contribuir al aumento sustentable de la producción (Medina, 1977; Huante *et al.*, 2002; Andrade *et al.*, 2005).

Implica el estudio de los factores que determinan el desarrollo y el crecimiento de los cultivos, el cociente fototermal, la plasticidad vegetativa y reproductiva de las plantas, la partición de los productos de la fotosíntesis entre los distintos destinos metabólicos, la identificación y caracterización de los momentos más críticos para la determinación del rendimiento en cada cultivo, la relación entre la fuente de asimilados y la demanda de destinos reproductivos durante el periodo de llenado de granos, la estabilidad del índice de cosecha, la eficiencia de uso de recursos e insumos, entre muchos otros conceptos.

También aborda el estudio de las relaciones hídricas en el sistema suelo-planta-atmósfera y de la dinámica de los nutrientes en las plantas, así como los efectos de las deficiencias nutricionales e hídricas en el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Benavides, 2002; Sozzi, 2007; Andrade, 2012).

1. Luz y temperatura.

De los factores ambientales, la luz y la temperatura, son esenciales en el desempeño de las plantas, condicionando complejos procesos fisiológicos que comprendiendo su incidencia permiten expresar las potencialidades genéticas de las especies en cultivo (Galvão, 1986; Ascon-Bieto y Talón, 2000). Andrade (1992) destaca que es considerable entender que el ambiente térmico y radiativo fija un techo

de producción que no se puede superar con el agregado de insumos (fertilizantes y riego).

La luz puede afectar al crecimiento y desarrollo de las plantas como fuente de energía mediante la fotosíntesis, como fuente de calor y como fuente de información. La cantidad de luz (fotones) que incide sobre las plantas por unidad de tiempo y de superficie (irradiancia), su composición espectral, la dirección con la que incide y su duración diaria (fotoperíodo) son aspectos del ambiente luminoso que cambian en condiciones naturales y proveen información acerca de una serie de factores (época del año, presencia de plantas vecinas, etc.), y las plantas poseen fotoreceptores que permiten utilizar dicha información para modular distintos aspectos del crecimiento y desarrollo (Casal, 2000).

La yerba mate es considerada una planta de lugares sombreados, aceptando sombra en cualquier edad y tolerando una intensidad luminosa mayor en la fase adulta (Galvão, 1986; Carvalho, 1994). Es caracterizada como una especie selvática umbrófila y selectivamente higrófila que crece preferencialmente en asociaciones más evolucionadas de pinares de *Araucaria angustifolia*, acompañada de otras especies de Mirtáceas, Leguminosas diversas y Lauráceas (Carvalho, 1994).

La eficiencia de conversión de radiación solar en biomasa es una variable frecuentemente utilizada por los modelos de simulación de crecimiento de cultivos, porque una producción de biomasa está relacionada con la eficiencia con que la planta convierte la energía radiante en química, dado por el proceso de fotosíntesis. De esa manera, Caron; Rheinheimer dos Santos *et al.* (2014); Caron; Schmidt *et al.* (2014), determinaron la eficiencia de conversión de radiación solar fotosintéticamente activa interceptada en biomasa aérea de *Ilex paraguariensis* en monocultivo y cultivada en consociación con *Pinus elliottii* (Engelm.), donde la eficiencia de conversión de biomasa seca aérea con relación a la cantidad de radiación solar fotosintéticamente activa acumulada fue de 0,83 g MJ⁻¹ en sistema consociado y de 0,23 g MJ⁻¹ en monocultivo. A pesar de esto, la producción de biomasa aérea por planta fue mayor en monocultivo.

Dentro de los factores abióticos que afectan a la fisiología y morfología de los vegetales, la luz ha sido apuntada como uno de los más importantes. Estudios avalando la influencia de la luz sobre el crecimiento vegetal indican que las plantas de ambientes sombreados generalmente acumulan mayor cantidad de biomasa en las hojas y poseen mayor área foliar por unidad de masa (Poorter, 1999; Lee *et al.*, 2000).

Por otro lado, plantas expuestas a la luz solar intensa, invierten en biomasa radical, o sea, priorizan el crecimiento de las raíces para compensar la pérdida de agua por transpiración y debido a altas tasas fotosintéticas, producen mayor biomasa por unidad de área foliar y altas tasa de renovación de hojas (Poorter, 1999).

Shibles y Weber (1965), determinaron que la producción de biomasa es función lineal de la acumulación de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo, así, a medida que este recurso es disminuido en determinado ambiente, es de esperar que la producción siga la misma tendencia. Coelho *et al.* (2000) concluyeron que en la yerba mate, el grado de sombreado necesario para generar diferencias debe ser igual o superior que el 50% de luz natural. Thompson *et al.* (1992) también destacan que el microclima y en especial, la luminosidad, es un factor impactante sobre determinadas características de la yerba mate, como área foliar y producción de biomasa.

La temperatura junto a la luz determina ciclos que inciden en el crecimiento y desarrollo de las plantas, en particular como mencionan Ascon-Bieto y Talón (2000), la temperatura condiciona la velocidad de las reacciones químicas catalizadas enzimáticamente, modifica la estructura y la actividad de las macromoléculas y determina el estado físico del agua. La mayoría de las plantas ralentiza su crecimiento a temperaturas superiores a 40 °C, a excepción de xerófitas que son capaces de sobrevivir a más de 50 °C. El frío determina estrés en temperaturas entre 15 y 0 °C, comúnmente en los tejidos vegetales el punto de congelación suele ocurrir entre -2 a -5 °C debido a solutos presentes en el jugo celular. El estrés tanto por frío o calor, inhibe la fotosíntesis y la respiración, reduce la tasa de crecimiento y activa la senescencia y abscisión (Taiz y Zeiger, 2006 b; Ascon Bieto y Talón, 2000).

Los estudios en relación a la suma térmica requerida para las distintas etapas fenológicas de la yerba mate son pocos. El único encontrado y publicado, es de Poletto *et al.* (2017), donde evaluaron el tiempo térmico en mudas de yerba mate, desde germinación hasta 10 hojas y determinaron una temperatura base para esta etapa de 8,5 °C, con un filocrono que varió de 393,27 °C día hoja⁻¹ a 400 °C día hoja⁻¹.

En el trabajo de Galvão (1986) son presentadas variables ecofisiológicas obtenidas a través del desempeño asimilatorio en plantas jóvenes de Cancharana (*Cabralea canjerana* Veil. Mart.), Yerba mate y pinheiro-bravo (*Podocarpus lambertii* Kl.), en relación a la intensidad luminosa y la temperatura ambiental. Con un analizador infrarrojo y plantas de 18 meses de edad, evaluadas en periodo vegetativo, con una

combinación de dos temperaturas (una fija de 22,6 °C y otra variable de acuerdo a la media diaria para Curitiba) y por otro lado cinco condiciones de luminosidad (oscuridad; 2,2; 15; 25 y 40 klux (0; 30,8; 210; 350 y 560 $\mu\text{E s}^{-1} \text{m}^{-2}$, respectivamente), determinaron la fotosíntesis líquida, la respiración, el punto de compensación lumínico y el coeficiente económico aparente. El desempeño de la Yerba mate confirma sus características de especie umbrófila, con una saturación lumínica a 25 klux, con una asimilación anual acumulada distribuida con 47% en verano, 23% en otoño, 20% en primavera y 10% en invierno. Además basado en el coeficiente económico aparente, es decir, la utilización “más económica” de carbohidratos, el mejor desempeño fue encontrado cuando se sometieron las plantas a 40 klux y los mayores coeficientes ocurren en invierno. Según la experiencia realizada los autores sugieren que se realicen más investigaciones para Yerba Mate, en relación a las cosechas de verano (diciembre a febrero) llamadas “safriñas”¹⁵, ya que el 47% de producción fotosintética anual se produce en esta etapa del año. Esta práctica es ejecutada en un período desfavorable para la especie, con 2,5 a 5 veces menores asimilaciones fotosintéticas, menores distribuciones de asimilados y reservas, con futuras debilitaciones del cultivo. Además genera un cambio de cualidades del producto procesado, por el hecho de contar con un peso específico de 0,60 en verano y 0,86 en invierno, representando pérdidas del 30% en este material cortado con poco desarrollo foliar (madurez).

2. Condiciones nutricionales.

Las plantas requieren de macro y micro nutrientes esenciales para poder completar su ciclo ontogénico. La utilización de los nutrientes minerales por las plantas se resume en “carbono, hidrogeno y oxígeno” como los principales elementos involucrados en la fotosíntesis, más “nitrógeno y fósforo”, como los elementos estructurales esenciales de todo organismo vegetal (Malavolta, 1989; Lourenzo, 1997; Azcon-Bieto y Talón, 2000; Taiz y Zeiger, 2006 a, 2006 b).

El nitrógeno estimula la formación y el desenvolvimiento de yemas floríferas y fructíferas, mayor vegetación, macollamiento y aumento del tenor de proteína. Por otro lado, el fósforo acelera la formación de raíces, aumenta la fructificación, acelera la maduración de frutos, aumenta el tenor de carbohidratos, aceites, lípidos y proteínas, además ayuda a la fijación simbiótica de nitrógeno (Malavolta *et al.*, 1989; Assuero y Tognetti, 2010).

¹⁵ safriñas: cosechas realizadas en la época de verano.

El nitrógeno es el elemento limitante en la producción de biomasa, existen muchas evidencias de que en suelos tropicales rojos el fósforo también es limitante (Townsend *et al.*, 2007; Vitousek *et al.*, 2010; Augusto *et al.*, 2017). En el Bosque Atlántico semi-caducifolio, específicamente en la provincia de Misiones, el contenido de nitrógeno de los suelos se encuentra en concentraciones relativamente altas, mientras que el fósforo presenta bajas concentraciones. De este fósforo total en general es poco lo que está disponible para las plantas, en parte debido a que en suelos antiguos y muy meteorizados, como en los de regiones de bosques tropicales, la adquisición de fósforo por las plantas estaría regulada por el balance de entradas y salidas de compuestos de fósforo orgánico al sistema y el rápido reciclaje del fósforo de la hojarasca (Condrón y Tiessen, 2005).

El fósforo posee un papel fundamental en la vida de las plantas, por participar en los llamados compuestos ricos de energía, como adenosina trifosfato (ATP), siendo absorbido por las raíces como H_2PO_4^- (ión ortofosfato) y encontrándose en el xilema en mayor proporción en esa forma. Según Raij (1991), el fósforo es uno de los tres macronutrientes, exigido en menor cantidad por las plantas. No obstante se trata del nutriente más usado en fertilización en Brasil. Explicándose esta situación por la carencia generalizada de fósforo en los suelos rojos y también, por la fuerte interacción por el tipo de suelo, sufriendo una gran fijación.

El fósforo es un nutriente de baja movilidad en el suelo, el cual debe ser incorporado al suelo y próximo a las raíces. Los tenores de fósforo en el suelo son relativamente bajos, su fijación en la mayoría de los suelos es bastante elevada sobretodo en suelos ricos en sesquióxidos de hierro y aluminio, ácidos (Sengik, 2003), como sucede en zona de producción de yerba mate.

Siguiendo el criterio de producción, Sosa (1992, 1994) evaluó los niveles de nutrientes de plantas de yerba mate con altos, medios y bajos rendimientos, como así también sus valores en suelo, concluyendo en una guía para orientar en qué estado nutricional se encuentra un cultivo y poder mejorar sus restricciones.

La ocurrencia de la yerba mate en suelos con bajos tenores disponibles de fósforo, aliado al bajo tenor foliar de este nutriente, llevó a Reissmann *et al.* (1983), Radomski *et al.* (1992) y Sosa (1992) a considerar la poca exigencia en fósforo. No obstante, la respuesta positiva a dosis de fósforo y nulas y/o negativas a dosis de nitrógeno y potasio (Santin *et al.*, 2008) sugieren la posibilidad de respuesta de nitrógeno, fósforo y potasio, siendo evaluados conjuntamente en función de las interacciones entre

nutrientes. La interacción es una acción mutua y recíproca de un elemento sobre otro, en relación al crecimiento de las plantas, pudiendo ser de orden sinérgico o antagónico en el suelo, y competitiva o no competitiva en la planta, o que puede ocasionar diferentes respuestas (Zampier, 2001).

En el suelo, principalmente en los más arcillosos y meteorizados, ricos en óxidos e hidróxidos de Fe y Al con pH ácido, la adsorción de fósforo es alta y hasta el 90% del fósforo aplicado puede asumir formas de reducida labilidad. Por otro lado, altos tenores de fósforo, pueden reducir la disponibilidad de otros nutrientes como es el caso del Fe y el Zn. En lo que se refiere al potasio, altos tenores en el suelo pueden inhibir la absorción de Ca y Mg. Las interacciones de P con Zn, Fe y Cu son normalmente antagónicas cuando estos micronutrientes se encuentran en bajos tenores en el suelo. La capacidad de absorción y la eficiencia de utilización de fósforo por las plantas son influenciadas por diferencias genotípicas del vegetal y dependen de la naturaleza, de la concentración e interacción de nutrientes en la rizósfera. En suelos deficientes en fósforo, la asimilación de N por las plantas es limitada, perjudicando su metabolismo en lo que se refiere principalmente a la reducción de la absorción y translocación de nitratos de las raíces a la parte aérea y acumulación de este en la raíz. En especies forestales, normalmente los nutrientes más limitantes al crecimiento son el N y el P y también los más exigidos. Especies con crecimiento lento, adaptadas a suelos de baja fertilidad, tienen baja eficiencia de utilización y muestran menos respuestas al suministro de nutrientes (Zampier, 2001; Santin *et al.*, 2013, 2017).

Los plantines de yerba mate evaluados por Santin *et al.* (2008, 2017) respondieron positivamente al P, en suelos pobres en nutrientes y el crecimiento fue beneficiado hasta dosis de $447,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de P. Por otro lado, dosis aisladas de N y K superiores a 100 mg kg^{-1} mostraron acción depresiva sobre los plantines. El desbalance de nutrientes en el suelo es uno de los principales factores limitantes en el crecimiento vegetal, por afectar el metabolismo de las plantas.

El conocimiento sobre la nutrición y respuesta de la yerba mate a la fertilización sigue siendo restringido, por lo cual Santin *et al.* (2013, 2017), evaluaron la fertilización fosfatada, combinada con nitrógeno y potasio, en el crecimiento y tenor de nutrientes del suelo en plantas jóvenes de yerba mate. Demostraron que la yerba mate es exigente en P, con un mejor crecimiento cuando el tenor de fósforo en el suelo se encuentra entre $18,5$ y $28,6 \text{ mg dm}^{-3}$. El desequilibrio causado por altos tenores de P

en suelo favorece la interacción antagónica entre el nivel de P con Ca, Mg, Fe, Cu y Zn de hoja, siendo que dosis superiores a 400 mg dm^{-3} de P_2O_5 causaron deficiencias de Fe provocando clorosis internerval en las hojas de yerba mate. En orden decreciente de macronutrientes más exigidos y que más contribuyeron para el crecimiento de la yerba mate fueron $\text{P} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca}$. Sin embargo, para el crecimiento de raíz el orden fue $\text{P} > \text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$. Concluyen que la yerba mate crece bien en suelos con tenores altos de P, pero la maximización del crecimiento de las plantas depende de la buena disponibilidad de N, K y Ca.

Los resultados de Caron *et al.* (2014 b) mostraron que la producción de biomasa de *Ilex paraguariensis* (hojas y ramas) fue mayor en monocultivo comparando con cultivo consociado con pino. Sin embargo, cuando se compararon los dos sistemas de cultivo con relación a los tenores de P, Ca, Mg y Fe, han observado una variación pequeña para las diferentes épocas del año. Esto indica una actividad metabólica más constante de la planta de yerba mate en una condición más sombreada, y que implica un importante factor de calidad en el producto final.

Mazuchowski *et al.* (2007) buscaron determinar el efecto de diferentes niveles de luminosidad y la adición de fertilizante nitrogenado sobre el crecimiento de plantas de yerba mate, en el primer año de crecimiento. Se evaluaron cuatro intensidades de luminosidad (100, 70, 50 y 30%) y el nitrógeno en cada parcela. Verificaron que la condición más adecuada para el crecimiento de las plantas fue con luminosidades de 50 y 30%. La adición de nitrógeno no mostró influencia relevante en el crecimiento de la yerba mate, especialmente en luminosidades de 100 y 70%, donde la luminosidad tiende a reducir el crecimiento de las plantas. Las plantas fertilizadas tuvieron mejor rebrote que aquellas no fertilizadas. La adición de nitrógeno mineral, en dosis elevadas, fue dañina para las plantas de yerba mate, acarreado la mortalidad de las parcelas con tratamientos de mayor luminosidad.

Considerando los principios, métodos y técnicas de evaluación del estado nutricional, dicha evaluación consiste simplemente en hacer una comparación entre una muestra y un patrón. Las muestras pueden ser una planta o conjunto de ellas, y el patrón contempla aquella planta o conjunto de ellas en condiciones normales desde el punto de vista de su nutrición. Considerándose normal una planta que, teniendo en sus tejidos todos los elementos en cantidades y proporciones adecuadas, es capaz de dar altas producciones, teniendo un aspecto visual parecido con el encontrado en cultivos muy productivos. Alternativamente, se puede considerar como normal la

planta que fue cultivada en condiciones controladas de nutrición, sin sufrir restricciones para crecer y producir en cuanto a las cantidades y proporciones de elementos nutritivos que recibe (Malavolta *et al.*, 1989).

Si hay falta o exceso de un elemento dado, esto será traducido en anormalidades visibles (ver **Apéndice V**), las cuales son típicas y tienen un denominador común para el elemento en cuestión (por ejemplo, la falta de N produce el amarillamiento, clorosis de las hojas viejas mientras que la deficiencia de Fe provoca clorosis en hojas nuevas). El motivo por el cual el síntoma es típico de un elemento, se debe al hecho de que ejerce siempre las mismas funciones, cualquiera que sea la especie de planta (Malavolta *et al.*, 1989) y las manifestaciones son similares entre diferentes especies.

En la región de producción yerbatera, muchos de los síntomas del nitrógeno pueden ser atribuidos a la pobreza en materia orgánica, acidez (por menor mineralización), lixiviación (altas precipitaciones) o sequías prolongadas. Y en el caso del fósforo, la menor disponibilidad es debido a pH bajos, fijación y suelos pobres en materia orgánica.

3. Crecimiento: Teorías nutricional y hormonal.

El crecimiento es un proceso fisiológico muy complicado y depende de la mayoría de otros sucesos que tienen lugar en una planta, como fotosíntesis, respiración, absorción de agua y de sustancias nutritivas minerales, etc. Generalmente se define como un aumento irreversible de volumen que puede o no estar acompañado de un incremento en materia seca. Fases separadas del crecimiento, como la multiplicación del número de células, el aumento de su tamaño o del contenido protoplasmático, se utilizan también a veces para definir este proceso (Muller, 1964; Chazdan y Montgomery, 2002).

El término crecimiento se refiere realmente a una medida cuantitativa con respecto al aumento del cuerpo de un organismo, mientras que el concepto de diferenciación es cualitativo e implica cambios estructurales que acompañan o siguen a la división y alargamiento celular. Bajo diferenciación deben entenderse tanto cambios morfológicos y anatómicos, como fisiológicos. Sin embargo, es muy difícil separar crecimiento y diferenciación, pues ésta siempre acompaña al crecimiento (Muller, 1964).

Champagnat *et al.* (1986) mencionan al crecimiento como una combinación de dos procesos diferentes, pero combinados: la organogénesis y el alargamiento. Además,

estudian el crecimiento en varias modalidades que dependen de su duración en el tiempo y de su ritmo, dando por consiguiente las diferentes arquitecturas vegetales, propias de cada especie.

Por lo general el crecimiento no tiene lugar en todas las partes de una planta. Existen ciertas zonas en las cuales se efectúa predominantemente: las zonas meristemáticas o meristemas. Estas son zonas que consisten en células embrionales que tienen la capacidad de multiplicarse por divisiones constantes (aunque quizás por mucho tiempo en estado inactivo como en las yemas). Las divisiones celulares tienen lugar principalmente en el punto vegetativo, o sea en el meristema, mientras que en la zona adyacente inferior, las células se alargan rápidamente, siendo ésta la zona de mayor crecimiento. Como resultado del alargamiento y de la diferenciación subsiguiente se forman tejidos a partir de las nuevas células (Segura, 2000).

Pueden distinguirse meristemas primarios (los que persisten desde el embrión de la semilla, como meristemas apicales del vástago y de la raíz principal) y secundarios, que se forman a partir de tejido adulto, ya diferenciado, como el corcho, raíces laterales, crecimiento secundario en grosor, etc. El crecimiento que se origina a partir del meristema apical primario se denomina crecimiento primario, y cuando ocurre a partir de un meristema secundario se llama crecimiento secundario (Taiz y Zeiger, 2006 a, 2006 b).

Las hojas se forman a partir de esbozos o primordios foliares y tienen por regla general un crecimiento limitado. En algunas hojas, como las de las gramíneas, el ápice se desarrolla primero, continuando la hoja su crecimiento a partir de un meristema intercalar basal. En los helechos ocurre lo contrario, o sea que el ápice foliar se desarrolla por último. En la mayoría de las hojas de las dicotiledóneas el crecimiento se efectúa en forma uniforme en toda la lámina. Las divisiones celulares se detienen tempranamente, y el crecimiento de la hoja continúa por elongación o expansión de las células existentes (Muller, 1964).

El crecimiento y en el desarrollo de la planta se ven influenciados por varios factores ecológicos. Entre esos factores, la temperatura del aire interfiere en diferentes procesos en la planta incluyendo la tasa de emisión de hojas. La medida estimada de la emisión de hojas es importante porque se obtiene el número de hojas acumulado en el tallo, que es una excelente medida de tiempo fisiológico y está asociado al momento de ocurrencia de estados de desarrollo y al inicio de ramificación en diversas especies (Streck *et al.*, 2003). Una manera de estimar el número de hojas acumulado en el tallo

principal es por medio de la evaluación del plastocrono y filocrono (Klepper *et al.*, 1982; Hermes *et al.*, 2001).

Para el crecimiento, las plantas presentan un mecanismo de inhibición de yemas laterales que ha sido ampliamente estudiado y debatido, siendo el control muy complejo envolviendo factores hormonales y nutricionales que inhiben el desarrollo de yemas, abertura, tasa y duración de la expansión de la parte aérea (Kozlowsky, 1979; Assuero y Tognetti, 2010).

Según Taiz y Zeiger (2006 b) hay diferentes teorías que intentan explicar la dominancia apical, como ser: a) Las auxinas presentes normalmente en el ápice en niveles altos que inhiben el crecimiento de las yemas laterales; b) El direccionamiento de nutrientes, donde el ápice actúa como drenaje de los mismos desviándolos de las yemas laterales; c) La acción de la citocinina, conocida por estimular el desarrollo de yemas laterales; y d) Inhibidores presentes en las yemas laterales. La remoción del meristema terminal puede incrementar los niveles de citocinina y nutrientes, y disminuir los niveles de ácido abscísico en las yemas latentes.

Pero, estas teorías no son independientes, es así que Mason *et al.*, (2014) han revelado que la dominancia apical se correlaciona fuertemente con la disponibilidad de azúcar y no con auxina apical suministrada. Después de la pérdida de la punta del brote, los azúcares se acumulan en los brotes axilares dentro de un marco de tiempo consistente con el crecimiento del brote y está controlado predominantemente por la intensa demanda de azúcares de la punta del tallo, que limita la disponibilidad de azúcar a los brotes axilares. Una mejora en el suministro de azúcar provoca que los brotes suprimidos se liberen del dominio apical. Esta respuesta de decapitación también puede imitarse mediante el suministro de azúcares exógenos a las plantas intactas.

El suministro de sacarosa exógena, a menudo, imita el efecto de la luz alta y el frío como molécula señal, además muchos trabajos describen efectos combinados de nutrientes, sacarosa, hormonas en la dominancia apical y el crecimiento lateral de las yemas (Taiz y Zeiger, 2006 b; Assuero y Tognetti, 2010; Krouk *et al.*, 2011; Tognetti *et al.*, 2013; Rameau *et al.*, 2014; Mason *et al.*, 2014; Van Den Ende, 2014; Buskila *et al.*, 2016).

Desde el punto de vista hormonal, se conocen diferentes grupos, de los cuales las auxinas, las citoquininas y el ácido abscísico han sido las hormonas más reconocidas por su efecto sobre la ramificación (Taiz y Zeiger, 2006; Ferguson y Beveridge, 2009;

Dun *et al.*, 2012). Recientemente, se sabe que el efecto pleiotrópico de ciertas hormonas, como la auxina, pueden enmascarar el papel de otras más específicas, como el caso de la familia de las estrigolactonas, que participan en el disparo de la señal de multiplicación y adhieren a los criterios esperados para una hormona vegetal (Beveridge, 1997; Berleth *et al.*, 2004; Gomez-Roldan *et al.*, 2008).

La importancia de las sustancias encontradas en Arvejas y *Arabidopsis sp.* relacionada a estrigolactonas se basa en dos interacciones muy diferentes con las plantas: una beneficiosa (simbiosis micorrízica arbuscular) y la otra perjudicial (parasitismo de las plantas), por lo tanto, las estrigolactonas pueden actuar como señales internas y rizosféricas (Gomez-Roldan, *et al.*, 2008). Estas sustancias tienen relaciones estrechas con las auxinas y citocininas y participan en el control de la brotación y ramificación (Ferguson y Beveridge, 2009; Dun *et al.*, 2012).

Las hormonas se relacionan con señales ambientales, por ejemplo nutrientes, tal es el caso de las estrigolactonas de tomate que derivan de los carotenoides y su biosíntesis es promovida por la falta de fósforo (Lopez-Raez, 2008), la relación de Nitrógeno con la vía de las auxinas (Mc Intyre, 1997; Azcon-Bieto y Talón, 2000; Taiz y Zeiger, 2006 b) o el efecto del Zn y B en el respecto a citocininas y ácido abscísico (Puzina, 2004), entre otros.

El conocimiento actual no proporciona una visión unificada de cómo se integran las señales ambientales y de desarrollo, así como las hormonas y los controles de nutrientes para determinar el patrón de ramificación de una planta. (Rameau *et al.*, 2014, Tomás *et al.*, 2015). Es decir que, queda mucho por reevaluar en las relaciones entre las hormonas, nutrientes y los azúcares, en el crecimiento y otros aspectos del desarrollo de las plantas.

4. Patrones fenológicos.

La distribución natural de la Yerba mate está condicionada por el ambiente que requiere para su desarrollo, lo que implica patrones fenológicos definidos diferenciando la etapa de brotación, floración, fructificación, caída de hojas y receso invernal.

El análisis de la causalidad de los patrones fenológicos observados en bosques húmedos y lluviosos neotropicales se deben distinguir explícitamente los mecanismos o señales disparadores del inicio de un evento fenológico, de las razones de tipo evolutivo que han determinado el desarrollo de una u otra estrategia temporal para

completar el ciclo de vida. Al primer conjunto se lo conoce tradicionalmente como las “causas próximas”, mientras que al segundo se hace referencia como las “causas últimas” del comportamiento fenológico (Marquis, 1988; Milton, 1991; Van Schaik *et al.*, 1993).

La búsqueda de causas próximas se hace a través de un enfoque correlativo en el que se busca la asociación entre la presencia de un fenómeno externo o interno en las plantas y la aparición del evento fenológico de interés. Entre las señales externas o exógenas se encuentran eventos meteorológicos, o de otro tipo, como la duración del día, los cuales inducen en las plantas procesos fisiológicos que finalmente se traducen en el arranque de una fenofase. Dado que este proceso está mediado por los mecanismos fisiológicos de las plantas, en ocasiones el papel de las señales externas no es evidente (Borchert, 1983, 1994).

La periodicidad anual y estacional en selva tropical es comentada por Loubry (1994), donde observa que estos patrones están menos vinculados con precipitaciones o estación seca, pero más claramente relacionada con variaciones fotoperiódicas, dejando en claro que cada árbol además tiene una periodicidad propia, refiriendo en causas exógenas y endógenas, respectivamente.

La señal endógena que determina más comúnmente los comportamientos fenológicos es el estado hídrico de las plantas y, si bien en ocasiones, esta variable fisiológica está íntimamente ligada a la disponibilidad estacional de agua en el ambiente, el almacenamiento de agua en el tallo puede enmascarar esta relación (Goldstein *et al.*, 2002).

Otro mecanismo endógeno está dado por la existencia de umbrales en la acumulación de recursos en los tejidos vegetales que permiten el desencadenamiento del evento fenológico, por lo general, es totalmente independiente de la estacionalidad ambiental de cualquier tipo, lo que evita que su efecto sea confundido con el de factores exógenos (Milton *et al.*, 1982).

En los estudios fenológicos la frecuencia de las observaciones es crítica, si éstas se realizan a intervalos muy espaciados, existe el riesgo de que un evento rápido de foliación, floración o fructificación pase inadvertido. Aunque lo ideal sería realizar observaciones quincenales, en la mayoría de los estudios se hacen en forma mensual o a intervalos un poco más largos. Los estudios fenológicos muy detallados sí recurren a observaciones diarias durante la duración completa del evento (Williams-Linera y Meave, 2002).

5. Fenología y brotación en Yerba Mate.

La yerba mate, al igual que muchas plantas subtropicales, desarrolla un conjunto de manifestaciones fenológicas que pueden ser cuantificadas y se presentan con cierta periodicidad para cada variedad y zona geográfica, a través de todo el año. El entendimiento de estas reacciones podría, en parte, ayudar a explicar las relaciones de los hábitos vegetativos y reproductivos de la planta con los factores ambientales.

En el desarrollo vegetativo, la planta de Yerba Mate, posee picos de brotación determinados por su meristema apical, donde muestra una periodicidad de elongamiento, lo que determina un crecimiento rítmico (Rakocevic *et al.*, 2011). Estos picos o ritmos de crecimiento se desarrollan de manera diferente de acuerdo a las condiciones ambientales y prácticas de manejo, posiblemente relacionado a lo que sucede en el cultivo de cacao, donde los períodos de intensa brotación y reposo vegetativo producen acumulación o desgaste de reservas alimenticias en los tejidos, condicionando el crecimiento (Flores de la Torre, 1987). El crecimiento rítmico en Yerba mate también es mencionado por Sansberro *et al.* (2000), quienes consideran a los picos en tres períodos de brotación perfectamente definidos en primavera, verano y otoño. Estudios de crecimientos rítmicos también fueron realizados por Bazzo y Rakocevic (2005) en el cultivo de yerba mate, mencionando que existen dos paradas de crecimiento, la del invierno relacionada a las temperaturas bajas y otra en verano que se asociaría a un oscilador circadiano (fotoperiodo) en el verano.

En otros estudios fenológicos realizado en el cultivo de Cacao, Flores de la Torre (1987), indica que durante el año se suceden 3 a 5 períodos de brotación con una duración de 6 a 8 semanas, los cuales dependen de las condiciones climáticas, en especial de la ocurrencia de precipitaciones para que se desencadene la brotación, este patrón es nombrado como hidroperíodo por Cardona y Gutierrez (2007). Alvim (1957) comprobó que para el Cacao, en Costa Rica, existen dos periodos de brotación intensa, el primero a fines de invierno (60-65%) y otro a principio de otoño (40-35), en los meses relativamente calientes se obtuvo una brotación esporádica entre 5 a 28% y en los meses más fríos, con días más cortos, las ramas se encontraron en reposo.

En condiciones tropicales del estado de Lara en Venezuela, Laskowski (2014), destaca que los cítricos también muestran un crecimiento con varios flujos de brotación vegetativa y reproductiva al año donde es poco conocido como sucede la movilización de los carbohidratos entre los diferentes órganos de la planta, a pesar de constituir este un aspecto relevante en el estudio de los factores involucrados en la

productividad. Por lo cual, trabajando con hojas y raíces de *Citrus sinensis* (L.) Osbeck 'Valencia' y *Citrus reticulata* (Blanco) 'Dancy', determinó el contenido de carbohidratos solubles por colorimetría, y su pauta de variación anual, en relación con el crecimiento reproductivo. En las hojas se observaron valores bajos al inicio de la floración, máximos durante el cuajado y a continuación, relacionado con el crecimiento del fruto, disminución hasta valores mínimos. En las raíces esta variación mostró un patrón opuesto, observándose un máximo al inicio de la floración y una drástica disminución durante el desarrollo del fruto. En conclusión, en ambas especies el contenido de carbohidratos solubles presente en hojas y raíces presentó una variación anual vinculada al crecimiento reproductivo.

En yerba mate, haciendo uso de reguladores de crecimiento Sansberro *et al.* (2002) analizaron parámetros de crecimiento y la respuesta a diferentes porcentajes de radiación fotosintéticamente activa (en inglés, PAR). Hallaron que el control fotomorfogénico del crecimiento de los brotes de *I. paraguariensis* cultivados en diferentes PAR se modula a través del control de los niveles de giberelinas, siendo diferente el efecto de estas de acuerdo a su estructura química.

Con respecto al crecimiento y la arquitectura adquirida por la yerba mate, fue codificada y reconstruida en 3D por Rakocevic *et al.* (2008) y Matsunaga *et al.* (2012), pero ya en otros trabajos previos, Rakocevic *et al.* (2006 a, 2006 b), describen como la yerba mate expresa dos ondas de brotación anual, una en primavera y otra en otoño, formando unidades de crecimiento, que se intercalan con dos pausas de crecimiento, una en verano y otra en invierno.

Basándose en estos trabajos, Silva y Rakocevic (2010), trabajaron en el modelaje de la arquitectura de la yerba mate con el desarrollo del software IntelpolMate, que interpreta el crecimiento bianual, considerando como información base la elongación del tallo, el área foliar total, el número total de hojas emitidas y hojas caídas. Matsunaga y Rakocevic (2011), agregaron al software el uso del número de metámeros y tamaño individual de hojas, para modelar la formación de unidades de crecimiento en Yerba mate con mejor estimación de la realidad.

Rakocevic y Picarelli (2011) analizaron la estabilidad del patrón de ramificaciones en plantas jóvenes previo al año, con diferencias entre ecosistemas sombreados, tendencia mesotónico y con pleno sol, tendencia basotónica-mesotónica, debido a la incidencia de la luz. Describen una modificación y evolución mesotónico-acrotónico luego del año y además una tendencia acrotónica de la yerba mate que

probablemente sea por la mejor utilización del espacio hacia tres dimensiones a través de los años.

La regulación de la arquitectura de los brotes es importante para la adaptación de las plantas, la supervivencia y la competencia. Proporciona a la planta la flexibilidad para responder a factores ambientales, como la luz y la herbivoría, mientras optimiza sus recursos. En parte, esta regulación se produce a través de la dominancia apical, en el que el vértice de los brotes inhibe el crecimiento de las yemas laterales y los cambios, en la dominancia apical, son siempre la causa subyacente del crecimiento de los brotes (Ferguson y Beveridge, 2009). Si bien se conocen algunos patrones de crecimiento de la Yerba Mate y hay trabajos que abordan la Ecofisiología de la Yerba mate (Burgos y Medina, 2017b), quedan varias cuestiones por resolver para comprender el comportamiento de los brotes.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Lugar, fechas y condiciones iniciales.

El estudio se llevó a cabo en un invernáculo de la EEA Cerro Azul, Misiones-Argentina ($27^{\circ}39'23.16''$ S; $55^{\circ}26'28.45''$ O), con plantines de *Ilex paraguariensis* St. Hil. (Yerba mate), progenie 538 INTA (cv.8/74 x cv. 1/74), de 6 meses de edad.

Las plantas fueron producidas en invernáculo, en tubetes plásticos (125 cm^3), con riego por micro-aspersión, bajo cobertura plástica y tela media sombra (80%). Una vez alcanzado el crecimiento esperado se realizó una selección de plantas homogéneas, que luego se trasladaron a macetas plásticas de 3 litros, cargadas previamente con suelo rojo (Ultisol típico), manteniendo el riego y la media sombra (80%) por dos semanas (**Figura 3**).



Figura 3. Plantas de *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate), de 6 meses de edad, luego del trasplante en macetas.

El ensayo comenzó el 01 de setiembre de 2015 con la aclimatación de las plantas durante un mes en el lugar definitivo, bajo cobertura plástica, tela media sombra (80%) y con riego por goteo. El 01 de octubre de 2015 se aplicaron los tratamientos y luego de 5 meses, 10 de marzo de 2016, se realizó una poda a 12 cm de altura desde el suelo ("despunte") (**Figura 4**). El ensayo continuó hasta el 14 de junio de 2016 y se consideró finalizada la etapa de invernáculo.



Figura 4. Plantas de *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate), luego de la poda a los 12 cm de altura.

Las variables registradas al inicio fueron: altura, diámetro a la altura del cuello, número de brotes, número de ramificaciones, número de hojas, área foliar, peso fresco, peso seco, hidratos de carbono solubles totales y NPK foliar. Estas variables se tomaron de 10 ejemplares al azar, del grupo de plantas seleccionadas para instalar el ensayo. Las plantas presentaron al comienzo del ensayo una altura media de 21,18 cm, con un diámetro medio de 3 mm y 12 hojas aproximadamente, en buenas condiciones sanitarias, nutricionales y fisiológicas.

B. Tratamientos y conducción del experimento.

Para evaluar los efectos del nitrógeno y el fósforo se utilizaron tratamientos combinados, con aplicación de ambos elementos en cada maceta. Según el análisis de suelo (**Apéndice IV**), no presentaba limitaciones para la especie en la concentración de macronutrientes, con aporte de micronutrientes contemplado en la mineralización de la materia orgánica, por lo cual, se aplicó en todos los tratamientos cloruro de potasio para evitar desbalances en la relación N-P-K considerada ideal para el cultivo (**Tabla 4**). Los fertilizantes utilizados como fuentes de N y P, fueron urea (46-0-0, sólido granulado, Profertil®) y superfosfato triple de calcio (0-46-0, sólido granulado, YPF®), respectivamente.

Tabla 4. Tratamientos, combinación de nitrógeno y fósforo en distintas dosis (1:dosis completa; ½:media dosis y 0:sin aplicación; respecto a cantidades consideradas óptimas para el cultivo de Yerba mate)

Tratamientos	Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Combinación	Dosis (g maceta ⁻¹) N-P-K
T ₁	0	0	N 0 + P 0	0,00 – 0,00 - 0,38
T ₂	0	1	N 0 + P 1	0,00 – 0,46 - 0,38
T ₃	1	0	N 1 + P 0	3,57 – 0,00 - 0,38
T ₄	½	1	N ½ + P 1	1,78 – 0,46 - 0,38
T ₅	1	½	N 1 + P ½	3,57 – 0,23 - 0,38
T ₆	1	1	N 1 + P 1	3,57 – 0,46 - 0,38

Las dosis se calcularon según análisis de suelo previo (**Tabla 7**) y de acuerdo a los requerimientos del cultivo mencionados por Errecaborde (1973) y Sosa (1992, 1994). La aplicación de nitrógeno se realizó de forma dividida, en tres semanas consecutivas una por semana, con el objetivo de aumentar la eficiencia del fertilizante nitrogenado y evitar posibles pérdidas por lixiviación a causa de la aplicación del riego.

Con respecto al fósforo, se consideró su fijación de acuerdo al tipo de suelo, utilizando las curvas de sorción obtenidas por Vázquez y Morales (2002), por lo cual la dosis total de fósforo contempla la fracción retenida y la potencialmente disponible, junto al K fueron aplicadas alrededor de las plantas a 2 cm de profundidad aproximadamente al inicio del ensayo.

El ensayo completo constó de 108 plantas al inicio, seleccionando 36 plantas finales para las mediciones. Se tomaron muestras foliares, para el análisis de N, P y K, al inicio, luego de las podas y al final del experimento. La determinación de nitrógeno total se realizó con la metodología de semi-micro Kjeldahl según Protocolos RILSAV (Red INTA de laboratorios de SAV); (RILSAV) (AERN 295531). Para la determinación de fósforo y potasio se realizó una digestión húmeda perclórica. El P se determinó según la metodología de Molibdato – Vanadato de amonio y la determinación de K se realizó por fotometría de llama, con un espectrofotómetro METROLAB 315 ®.

Al inicio y final del ensayo se tomaron muestras compuestas de suelo entre 0 y 10 cm de profundidad, para conocer la disponibilidad de nitrógeno y fósforo en cada tratamiento. Las muestras fueron secadas al aire, tamizadas en malla de 2mm y guardadas en bolsas plásticas para la realización de los análisis químicos. La determinación de nitrógeno total se realizó con la metodología de semi-micro Kjeldahl, bajo normas IRAM-SAGPyA 29572. La determinación de fósforo extractable se realizó según la metodología de Bray-Kurtz I, bajo normas IRAM-SAGPyA 29570-1. Además

se analizó materia orgánica (micro walkey-Black, IRAM-SAGPyA 29571-3), cationes de intercambio (extracción con acetato de amonio 1.0 N a pH 7.0) y acidez intercambiable con acetato de calcio 1.0 N a pH 7.0). Los análisis de determinación foliares y de suelo, se realizaron en el Laboratorio de Suelos del EEA Cerro Azul, CR Misiones, INTA.

Entre octubre y Junio, en el período experimental las plantas tuvieron tres picos de brotación (ver **IV.C.3**). Al finalizar el segundo pico de brotación, en marzo de 2016, se realizó una poda de despunte en las plantas a 12 cm de altura desde el cuello, la porción superior que se extrajo luego de la poda se utilizó para realizar las mediciones de los parámetros correspondientes.



Figura 5. Plantas de *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate), en plena brotación, luego de las podas (a y b).

Al final del periodo de crecimiento (después del tercer y último pico de brotación), luego de la brotación de las plantas como respuesta a los despuntes (**Figura 5**), se realizó la extracción de las plantas completas para un análisis final de los parámetros evaluados.

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar, con 6 repeticiones donde cada parcela experimental estaba constituida por una maceta con una planta de yerba mate (**Figura 6**). Para la ubicación de los bloques se tuvo en cuenta el gradiente provocado por la luz a causa de la pared del invernáculo y el efecto por la disposición de las mangueras de riego. Se realizó un análisis de la varianza y correlaciones entre variables para comparar los diferentes tratamientos. Los datos fueron analizados estadísticamente con el programa R® (R Core Team, 2015).

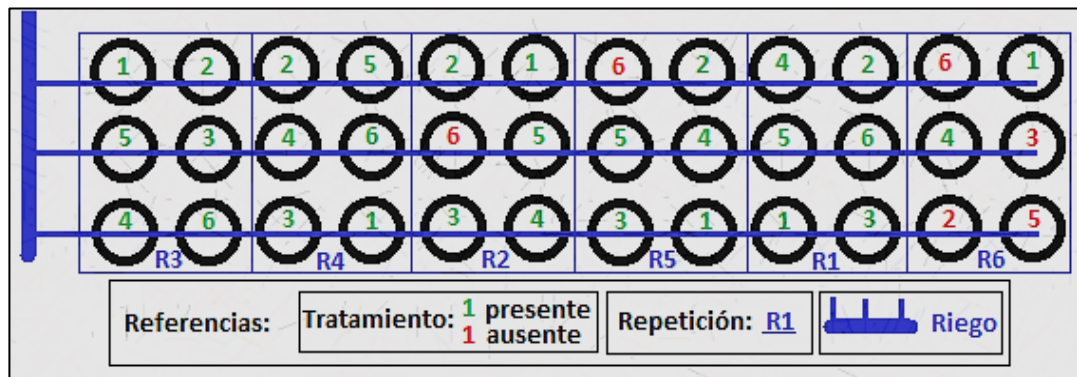


Figura 6. Croquis con distribución de tratamientos (1-6) en plantas de *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate), disposición del sistema de riego por goteo y plantas ausentes al final del experimento debido a mortandad.

C. Variables meteorológicas, edáficas y manejo sanitario.

Diariamente se tomaron datos de temperatura de aire y suelo, humedad relativa ambiente y radiación fotosintéticamente activa.



Figura 7. Data logger instalado en el ensayo midiendo variables ambientales (Temperatura ambiente, humedad relativa, radiación fotosintéticamente activa y contenido hídrico de suelo).

Estos datos fueron registrados cada 15 minutos por un data logger Cavadevices®, ubicado en el centro del ensayo (**Figura 7**). También se implementó un monitoreo y manejo sanitario para control de plagas durante el experimento, para evitar influencias en los resultados del estudio.

El riego por goteo, fue aplicado cada 2-3 días, una vez al día, manteniendo el contenido de agua del suelo lo más cercano posible a capacidad de campo. Se aplicaron riegos de 10 minutos con caudales de 400 ml/maceta. En verano con mayor demanda hídrica los riegos fueron más frecuentes.

D. Parámetros evaluados.

1. Altura.

La medición de plantas se realizó cada dos semanas, con cinta milimetrada (flexómetro), considerando la longitud desde el cuello de cada planta al ras del suelo hasta al ápice meristemático, para cada tratamiento y repetición (**Figura 8**).



Figura 8. Medición de altura en plantas de *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate) con flexómetro.

2. Diámetro.

Se consideró a los 4-5 cm por encima del suelo, para la medición se usó un calibre milimetrado con lectura digital. Las mediciones se realizaron al inicio, luego de las podas a 12 cm de altura y al final del experimento.

3. Brotación.

Se contabilizó cada dos semanas el número total de brotes, considerando como tal a los ápices en activo crecimiento y diferenciando estructuras foliares. Aquellas yemas en reposo o yemas hinchadas pero sin primordios foliares, no fueron consideradas.

4. Ramificaciones.

Se contabilizó el número de ramificaciones, considerando aquellos brotes laterales que poseían un entrenudo con al menos una hoja completamente expandida (**Figura 9, a y b**). Además se observó y analizó el tipo de crecimiento de la planta.



Figura 9. Ramificaciones de plantas de *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate), con hojas (**a**) y sin hojas (**b**).

5. Hojas.

a. Cantidad. Se contaron las hojas diferenciadas en lámina y pecíolo cada dos semanas, considerando como hojas diferenciadas aquellas expandidas y que no se encontraban en contacto con la próxima hoja.



Figura 10. Disposición de las hojas sobre papel, con referencia milimetrada, para la determinación de área foliar en plantas de *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate).

b. Área foliar. Se determinó el área foliar en tres momentos, al inicio (0 días), luego de la poda a 12 cm de altura (160 días) y al final del experimento, totalizando el área foliar producida (240 días). Para ello se utilizó el software de análisis de imágenes ImageJ® (Schneider *et al.*, 2012). Este software permite analizar imágenes digitales de escáneres o tomadas de forma perpendicular con una cámara fotográfica (con la ayuda de un trípode para evitar distorsiones), donde una de las funciones permite el cálculo del área con mucha precisión de acuerdo a la cantidad de píxeles de la imagen, utilizando una escala de referencia conocida (**Figura 10**).

c. Largo y ancho. Se midió largo y ancho de cada hoja, al inicio (0 días), luego de la poda a 12 cm de altura (160 días) y al final del experimento, para determinar posibles correlaciones con el área foliar y poder estimar dicha variable con alguno de estos parámetros lineales (**Figura 11, a y b**).

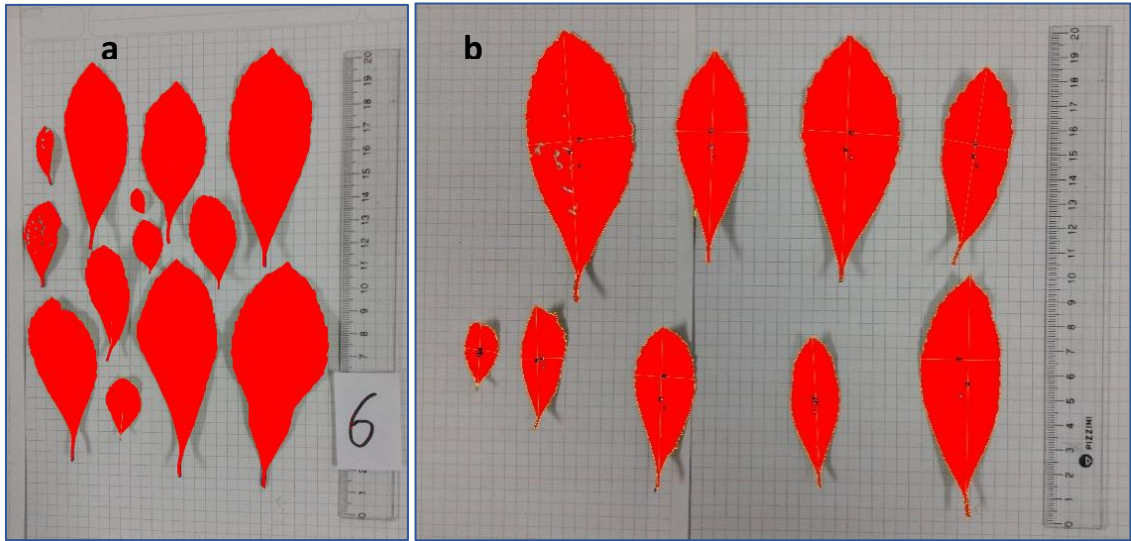


Figura 11. Fotografía procesada con software de imágenes (ImageJ®) para la determinación de área foliar (a), largo y ancho de cada hoja (b), en *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate).

6. Raíces.

Al final del experimento se extrajeron las plantas de las macetas y se lavaron las raíces con abundante agua, quitando cuidadosamente la tierra adherida. Luego de escurridas, se secaron con papel absorbente, se rotularon y refrigeraron para su posterior medición (**Figura 12 a y b**).

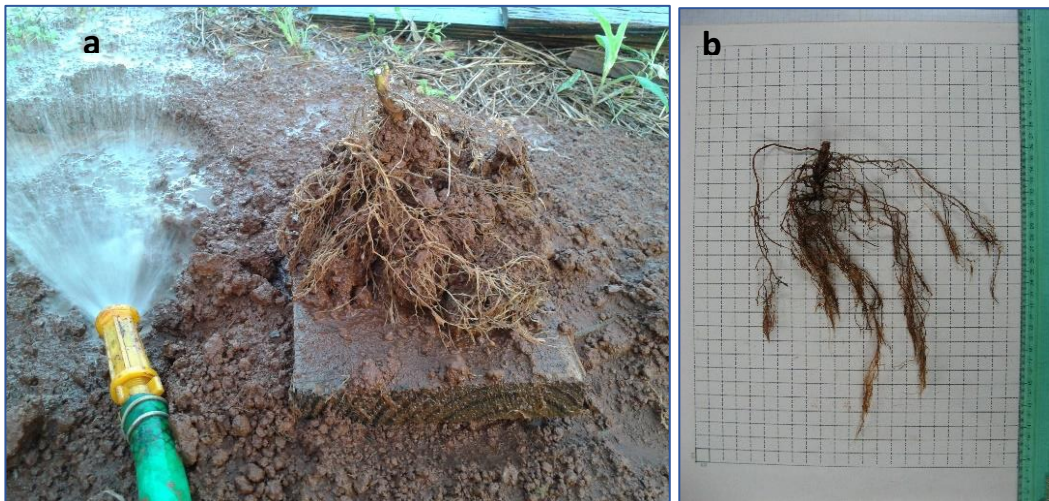


Figura 12. Limpieza con agua (a) y determinación de largo de raíces (b), en *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate).

a. Longitud. Se determinó el largo (cm) de la masa de raíces para cada planta, considerando solamente la raíz más larga desde el cuello hasta el ápice de la masa radical.

b. Volumen. El volumen total de raíces fue determinado por el método de la probeta, descrito por Vera Barahona (1974), que consiste en medir el volumen desplazado por las raíces al introducirlas en un recipiente de volumen conocido. La medición se realizó en una probeta de 1 litro de capacidad (**Figura 13**).



Figura 13. Método de la probeta para la determinación del volumen de raíces en *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate).

7. Peso seco.

La determinación de materia verde y seca se realizó con balanza de precisión Adventurer™ OHAUS® (Corp. USA, Cap. Máx. 210 g, legibilidad 0.0001 g) (**Figura 14, a**). En ambas mediciones se llevó un registro de partes de cada planta, separando hojas, tallos y raíces. Para la determinación del peso fresco de las plantas, luego de su extracción de las macetas, se conservaron dentro de bolsas de polietileno en frío, hasta la medición. Una vez determinado el peso fresco de las plantas separado en sus respectivas partes (aéreo y radical), se acondicionaron las muestras en sobres de papel rotulados, para el secado hasta peso constante a 60-70 °C en estufa Vefben® (**Figura 14, b**), donde luego de dejar enfriar dentro de un desecador con sílica gel hasta temperatura ambiente se determinó el peso seco de las muestras.

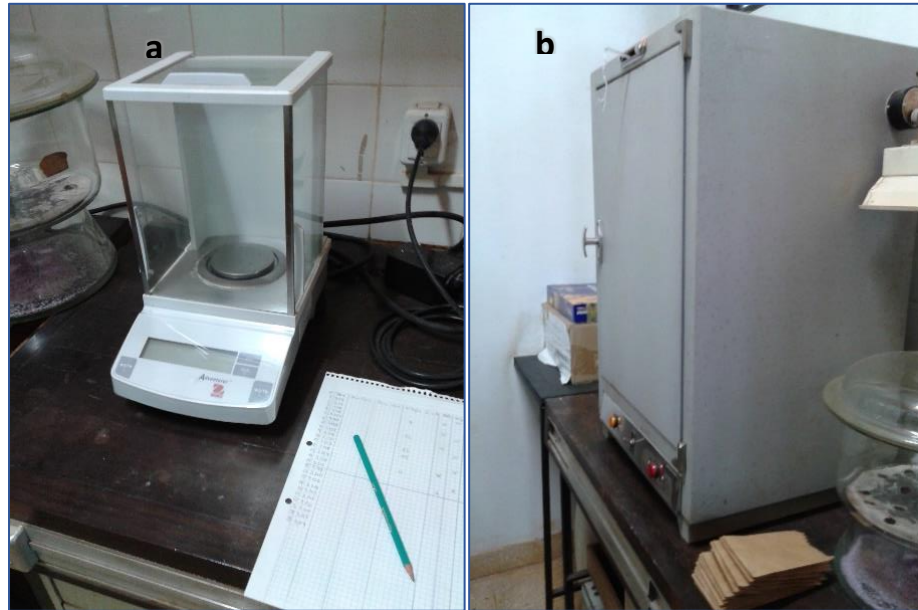


Figura 14. Balanza de precisión (a) y estufa (b), para la determinación de peso seco en *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate).

8. Hidratos de carbono solubles totales (HCST).

Para las muestras tomadas al inicio (0 días), intermedio (159) y final (253 días) del experimento se determinó la cantidad de hidratos de carbono solubles totales en tallo, por el método Fenol-sulfúrico (Dubois *et al.*, 1956). Este método presenta las ventajas de ser simple, estable y reproducible, logrando acortar el tiempo necesario para la determinación de carbohidratos comparado con otros métodos colorimétricos (Lopez Legarda *et al.*, 2017).

Las muestras secas fueron molidas con molinillo para café (Braum®), hasta alcanzar una granulometría fina, prácticamente polvo. Luego se tomó entre 50-100 µg de muestra, en tubos de ensayo de 15 ml con tapa, y se agregó 10 ml de agua destilada homogeneizando la muestra por agitado manual. Los tubos de ensayo, conteniendo la muestra, fueron centrifugados a 2500 rpm durante 5 minutos, luego calentados a baño María durante 10 minutos a 100 °C. Este procedimiento se repitió tres veces, para luego dejar enfriar hasta temperatura ambiente. Del sobrenadante se tomó 50 µl de extracto, al que se adicionó 3 ml de ácido sulfúrico concentrado y 1 ml de fenol al 80%, para producir una reacción fuertemente exérgica. Ocurre la formación de furanos de coloración amarilla, que es directamente proporcional a la concentración de azúcares de la muestra. Se realizaron las mediciones correspondientes, a 490 nm de longitud de onda en absorbancia, con un espectrofotómetro Spectrom 1500®. Los valores fueron calculados según una curva

patrón de D (+)-glucosa anhidra pro-análisis (Cirarelli®), calibrada para el equipo previamente (ver **Apéndice VII**).

Cabe aclarar que se realizó una modificación de la metodología original, cambiándose la secuencia de reactivos. El ácido sulfúrico se agregó primero a la solución, para generar una hidrólisis de los carbohidratos presentes, seguido por la adición de fenol, generando la reacción colorimétrica a medir y sin modificar la longitud de onda de 490 nm propuesta en el método original para las lecturas de absorbancia (Rao y Pattabiraman, 1989; Masuko *et al.*, 2005; Lopez-Legarda *et al.*, 2017).

E. Análisis de crecimiento.

Con las variables área foliar y peso seco obtenidas para los distintos tratamientos se realizó un análisis clásico de crecimiento. Dicho análisis se basó en las consideraciones de los trabajos de Hunt *et al.* (2002); Villar *et al.*, (2008); Barrera *et al.* (2010) y Di Benedetto y Tognetti, (2016), para plantas leñosas. Se calcularon y analizaron los parámetros de crecimiento que se presentan en la **Tabla 5**.

Además se analizaron los componentes de RGR (NAR x LAR), para conocer la contribución relativa de los aspectos morfológicos (LAR, SLA y LWR), frente a los fisiológicos (NAR), interpretando la variabilidad de RGR respecto a los distintos tratamientos.

Tabla 5. Parámetros de crecimiento, con sus siglas y traducción en inglés, relaciones o significado de cada parámetro y unidades.

	Parámetro	Sigla	En ingles	Relación/Significado	Unidad
Acumulación de Biomasa	tasa de crecimiento absoluto	AGR	absolute growth rate	Incremento de peso seco por unidad de tiempo	$g^1 \text{ día}^{-1}$
	tasa de crecimiento relativo	RGR	relative growth rate	Acumulación de biomasa por unidad vegetal y por unidad de tiempo, es igual al producto de LAR por NAR	$[g \text{ g}^{-1} \text{ día}^{-1}] = [cm^2 \text{ (hoja) g}^{-1} \text{ (planta)}] \times [g \text{ (planta) cm}^{-2} \text{ (hoja) día}^{-1}]$
	tasa de asimilación neta	NAR	net assimilation rate	Tasa de incremento en el peso de la planta por unidad de área foliar	$g \text{ (planta) cm}^{-2} \text{ (hoja) día}^{-1}$
	razón de área foliar	LAR	leaf area ratio	Relación de área foliar y peso total de la planta, igual al producto de SLA por LMF	$[cm^2 \text{ (hoja) g}^{-1} \text{ (planta)}] = [cm^2 \text{ (hoja) g}^{-1} \text{ (hoja)}] \times [g \text{ (hoja) g}^{-1} \text{ (planta)}]$
	área foliar específica	SLA	specific leaf area	Relación de área foliar y peso de hoja	$cm^2 \text{ (hoja) g}^{-1} \text{ (hoja)}$
	relación de peso foliar	LWR	leaf weight ratio	Relación de biomasa de hojas y la biomasa total de la planta	$g \text{ (hoja) g}^{-1} \text{ (planta)}$

Tabla 5. Continuación.

	Parámetro	Sigla	En ingles	Relación/Significado	Unidad
Expansión del área foliar	tasa de expansión foliar relativa	RLAE	relative rate of leaf area expansion	Incremento de área foliar por unidad vegetal y por unidad de tiempo	cm ² cm ⁻² (hoja) día ⁻¹
	tasa de aparición de hojas	RLA	rate of leaf appearance	Pendiente de la regresión lineal del número de hojas en función del tiempo	hoja día ⁻¹
	filocrono	1/RLA	philochron	Tiempo entre la expansión de dos hojas sucesivas .Inversa de RLA.	día hoja ⁻¹
Proporciones o ratios	proporción de parte aérea	LMF	leaf mass fraction	Relación de biomasa de parte aérea y la biomasa total de la planta	g (parte aérea) g ⁻¹ (planta)
	proporción de tallo	SMF	stem mass fraction	Relación de biomasa de tallo y biomasa total de la planta	g (tallo) g ⁻¹ (planta)
	contenido de materia seca	DM	dry matter	Relación de peso seco y el peso fresco de la planta	g (peso seco) g ⁻¹ (peso fresco)
	proporción de raíz	RMF	Root mass fraction	Relación de biomasa de raíz y biomasa total de la planta	g (raíz) g ⁻¹ (planta)
	relación raíz: parte aérea	R/S	root/shoot ratio	Relación de peso seco de raíces y peso seco de tallos, peciolas y hojas.	g (raíz) g ⁻¹ (hojas+tallos+peciolas)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A. Variables meteorológicas.

Las variables meteorológicas se registraron con data logger dentro del invernáculo y en la estación meteorológica ubicada a 170 m de distancia (**Figura 15**).



Figura 15. Imagen satelital de la ubicación de la estación meteorológica e invernáculo, en Cerro Azul, Misiones; Centro de imagen: 27°39'23.16" S; 55°26'28.45" O (Fuente: Google Earth Pro, Google Inc. 2018).

Tabla 6. Valores (media, desvío estándar-SD, mínimo y máximo) de temperatura del aire, temperatura de suelo, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa (PAR), en invernáculo y en estación meteorológica (además heliofanía), registrados durante el ensayo.

		<i>Media</i>	<i>SD</i>	<i>Mín</i>	<i>Máx</i>
<i>Data Logger- invernáculo</i>	Temp aire (° C)	20,42	5,88	0,4	44,5
	Temp suelo (° C)	27,28	2,33	5,7	39,5
	HR (%)	88,11	8,29	30,2	100,0
	PAR ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$)	40,78	29,21	0,0	469,0
	PAR (Σ diaria)	3931,62	2905,76	117,0	14174,0
<i>Estación meteorológica</i>	Temp aire (° C)	20,47	7,80	-0,7	37,8
	Temp suelo (° C)	18,76	4,67	8,7	26,2
	HR (%)	64,48	28,54	42,0	100,0
	PAR ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$)	n/d	n/d	n/d	n/d
	Heliofanía (horas)	6,30	4,23	0,0	13,1

Las variables obtenidas por el data logger entre febrero-junio de 2016 fueron recopiladas normalmente y desde setiembre de 2015 a febrero de 2016 los datos no

fueron registrados, debido a un mal funcionamiento del equipo. En la **Tabla 6** se presentan las variables resumidas registradas en el transcurso del ensayo.

En el **Apéndice IV**, se puede observar la información climática detallada.

B. Análisis de suelos.

En la **Tabla 7**, se pueden observar los valores de los análisis de suelo, al inicio y luego de aplicados los tratamientos, al final del experimento. Se destacan los tratamientos T₂, T₄, T₅ y T₆ con alto contenido de P.

Tabla 7. Análisis de suelo, muestras compuestas del inicio y final del ensayo.

Tratamiento	Inicio	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Materia orgánica Fácilmente oxidable (%)	1,22	1,41	1,58	1,65	1,56	1,09	1,26
Materia orgánica Total (%)	1,59	1,84	2,05	2,16	2,03	1,41	1,64
Carbono Fácilmente oxidable (%)	0,71	0,82	0,92	0,96	0,90	0,63	0,73
Nitrógeno total (%)	0,17	0,21	0,23	0,21	0,23	0,22	0,19
Relación C/N	5,32	5,04	5,20	6,01	5,22	3,68	5,09
Fósforo extractable P ₂ O ₅ (ppm)	1,69	3,16	291,76	2,11	317,28	200,20	276,15
Potasio intercambiable. K (meq/100g)	0,24	0,57	0,40	0,74	0,58	0,61	0,53
Calcio intercambiable. Ca (meq/100g)	5,54	6,66	8,92	5,98	8,62	7,35	8,62
Magnesio intercambiable. Mg (meq/100g)	0,54	0,78	0,73	0,69	0,83	0,73	0,64
Sodio intercambiable. Na (meq/100g)	0,15	0,10	0,14	0,11	0,19	0,22	0,20
Suma de Bases. S (meq/100g)	6,47	8,12	10,20	7,52	10,23	8,91	9,99
Acidez intercambiable. (meq/100g)	6,39	4,49	5,59	5,26	5,79	7,09	6,06
CIC Total (meq/100g)	12,86	12,61	15,80	12,78	16,01	16,00	16,05
Saturación de Bases. V (%)	50,31	64,42	64,59	58,82	63,86	55,71	62,25
pH agua (1:2.5)	5,19	5,70	5,92	5,38	5,82	5,34	5,78
pH CIK (1:2.5)	4,27	4,65	4,87	4,31	4,89	4,27	4,72
Aluminio intercambiable. Al (meq/100g)	0,56	N/D ¹⁶	N/D	0,36	N/D	0,46	N/D

La diferencia entre lo que necesitan las plantas y la cantidad que contiene el suelo es el aporte que se debe realizar, excluyendo las posibles pérdidas por lavado o inmovilización (Garrido, 1997). Por lo tanto, considerando la fijación que presentan los suelos rojos con respecto al P, es posible estimarla, pero no saber puntualmente su magnitud y cómo será la disponibilidad del nutriente (Vazques y Morales, 2002).

¹⁶ N/D: Dato No disponible.

Debido a esto, los valores de análisis de suelo referidos a P, presentan valores elevados en algunos tratamientos. El N, mantuvo los mismos valores entre el inicio y el final, con cambios mínimos en la concentración, relacionado principalmente a la gran movilidad y dinámica de este nutriente en el sistema (Malavolta, 1989).

Los demás indicadores y nutrientes se encuentran dentro de los valores normales para suelos aptos para el cultivo de yerba mate (Sosa, 1992, 1995; Lourenço, 1997; Santín *et al.*, 2008, 2013).

C. Parámetros evaluados.

1. Altura.

Al inicio del ensayo las plantas alcanzaban una altura promedio de 21,18 cm desde el cuello hasta el ápice, con diámetro de 3 mm al cuello, con 12 hojas y no presentaban brotes (**Tabla 8**).

Tabla 8. Valores medios y error estándar de los parámetros analizados en las plantas al inicio del ensayo (0 dda).

Parámetros	Valores promedio	Error estándar
Altura (cm)	21,1818	1,1957
Diámetro a la altura de cuello (mm)	2,9924	0,0611
Número de brotes	0,0000	0,0000
Ramificaciones	0,0000	0,0000
Número de hojas	12,2000	0,9309
Área foliar (cm²)	122,2513	2,8170
Peso fresco hojas (g)	2,4396	0,1018
Peso seco hojas (g)	0,5530	0,0687
Peso fresco tallo (g)	0,9604	0,0503
Peso seco tallo (g)	0,0788	0,0246
Peso fresco raíz (g)	0,9410	0,0735
Peso seco raíz (g)	0,0640	0,0277
Peso fresco total por planta (g)	4,3414	0,1758
Peso seco total por planta (g)	0,6956	0,1020
Hidratos de carbono (mg/g) en base seca.	19,6645	1,5157
Nitrógeno foliar (%N)	1,61	N/D
Fósforo foliar (%P₂O₅)	0,28	N/D
Potasio foliar (%K₂O)	0,39	N/D

En la **Figura 16** se observa la evolución en altura de las plantas durante el ensayo según los distintos tratamientos. Todos los tratamientos son superiores al T₁ (testigo) donde se destaca, a los 159 días, el T₅ (N1+½P).

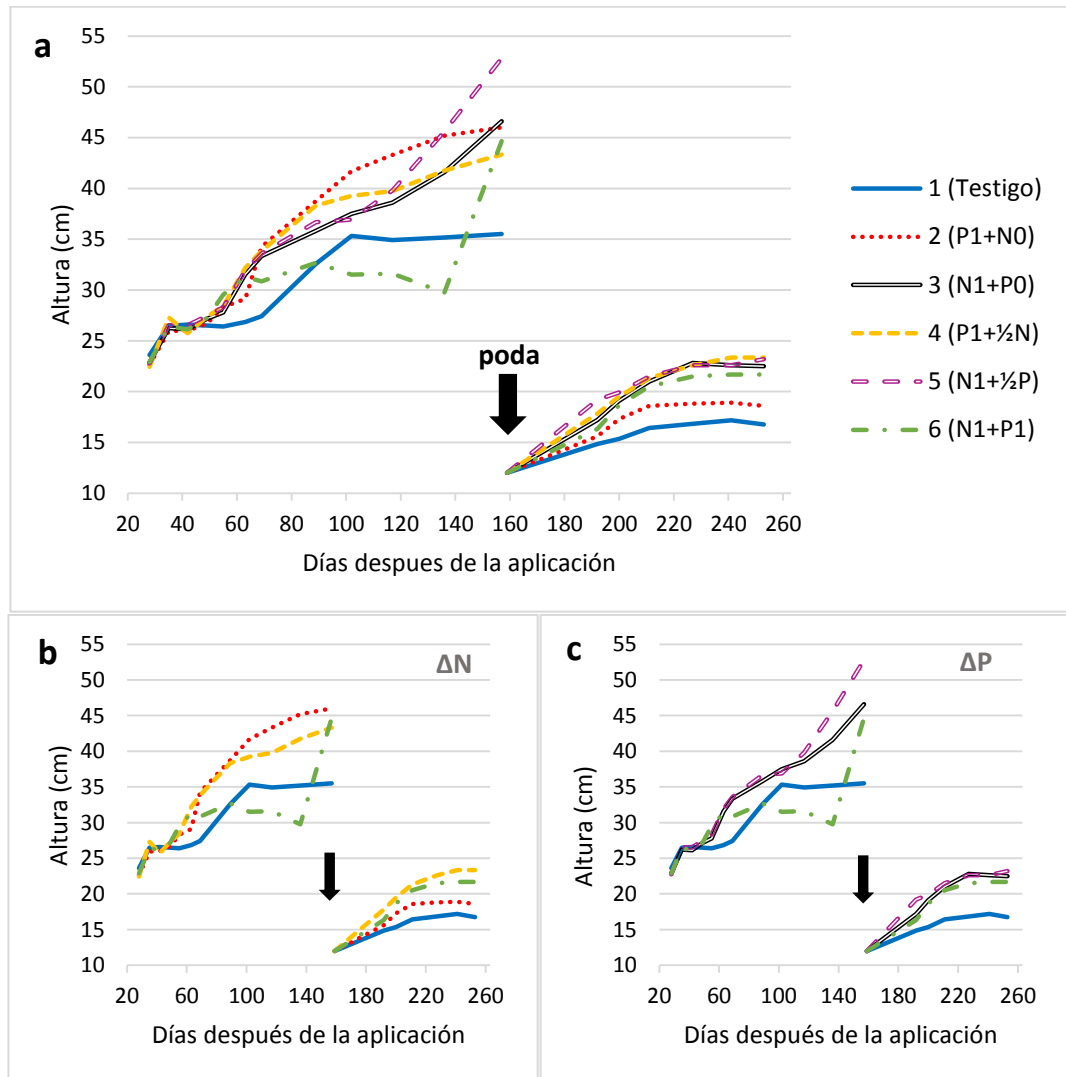


Figura 16. a) Altura acumulada de plantas en los distintos tratamientos; **b)** dosis de fósforo constante (P₁) y solo varía la dosis de nitrógeno y **c)** dosis de nitrógeno constante (N₁) y solo varía la dosis de fosforo, desde el inicio del ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda).

Los tratamientos T₃ (N1+P0), T₄ (P1+½N) y T₅ (N1+½P) se diferenciaron estadísticamente ($p \leq 0.05$) del T₁ (testigo), presentando la mayor altura de plantas al final del ensayo, seguido por T₂ (P1+N0) y T₆ (N1+P1). El menor valor observado fue en el T₁ (testigo) (**Figura 17**).

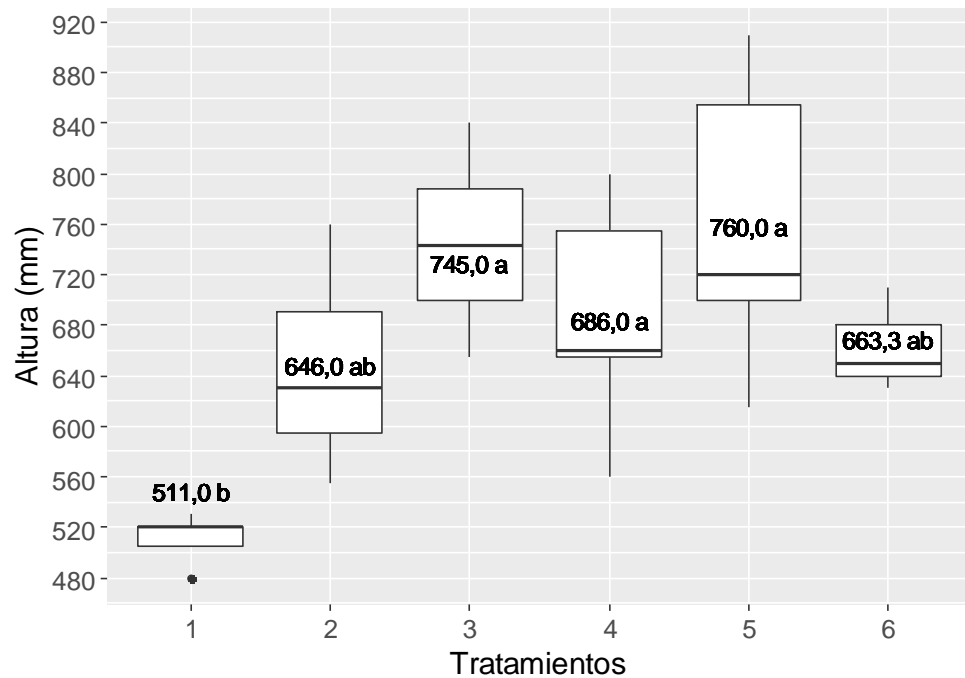


Figura 17. Altura total, sumatoria antes (159 dda) y después de la poda (253 dda), letras distintas representan diferencias estadísticas significativas (Test de Tukey ($p \leq 0.05$)). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

a. Altura según variaciones de P (ΔP). En la **Figura 16 c**, se observa la evolución de la altura de las plantas donde la dosis de nitrógeno permanece constante (N1) y solo varía la dosis de fósforo ($T_3:0P$, $T_5:1/2P$ y $T_6:1P$) y el T_1 (testigo).

Los tratamientos con menores dosis de P ($T_5:1/2P$; $T_3:0P$), presentaron mejor desempeño en altura, superando significativamente al testigo a los 159 días ($p \leq 0,05$) (Figura 18).

Las plantas del tratamiento T_6 (N_1+P_1) no prosperaron normalmente, se observaron síntomas característicos de exceso de N y en algunos casos las plantas murieron a los 2 o 3 meses debido a un elevado nivel de nutrientes que resultó tóxico. Esto indica que, los niveles ideales de nutrientes no pueden ser alcanzados solamente con fertilización química. Datos similares han sido descriptos por Mazuchowski et al. (2007), donde mencionan pérdidas de plantas por dosis altas de N, al evaluar fertilización en Yerba mate.

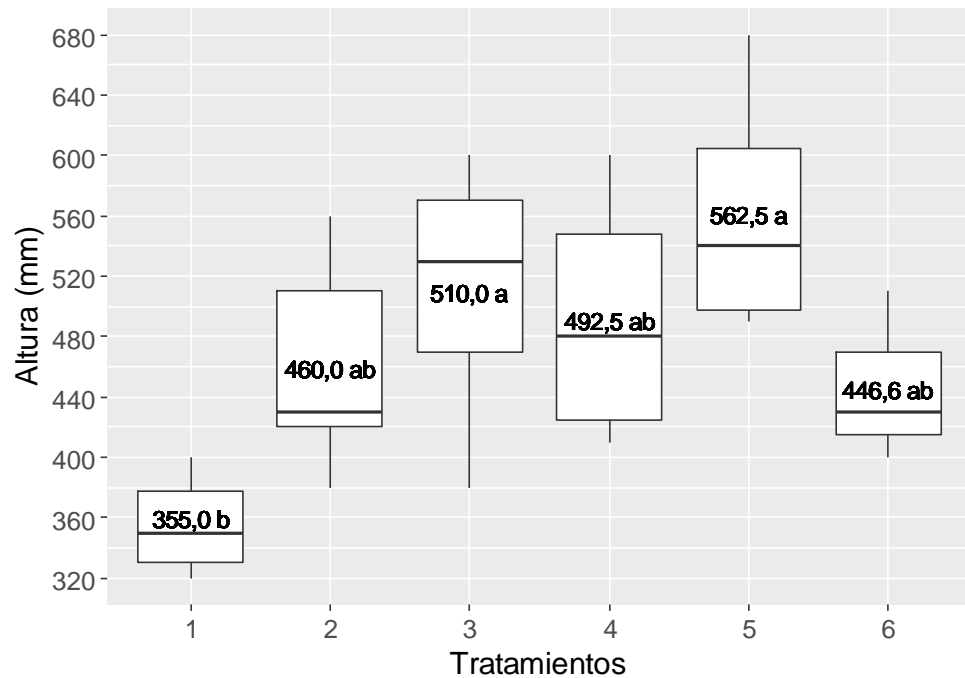


Figura 18. Valores medios de altura de plantas a los 159 dda, previo a la poda. Letras distintas representan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Test de Tukey ($p \leq 0.05$)). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

Al final del ensayo, todos los tratamientos, excepto T_2 , mostraron mayor altura que T_1 (Testigo) ($p \leq 0,05$). Posiblemente el desarrollo de las plantas en los 159 días previos, condicionó la capacidad de rebrote, con mayor crecimiento para las plantas que tenían más altura y mejor nutrición. Se observaron diferencias significativas en la altura total de plantas entre las diferentes dosis de fósforo, luego de las podas ($p \leq 0,05$) con respecto al testigo, destacándose T_3 y T_4 respecto a las demás, pero sin diferencias estadísticas significativas.

b. Altura según variaciones de N (ΔN). En los tratamientos donde la variante fue el nitrógeno ($T_2:0N$, $T_4:\frac{1}{2}N$ y $T_6:1N$) (**Figura 16 b**), con igual dosis de fósforo (P_1), no se observaron diferencias estadísticas respecto al testigo hasta los 159 días, excepto T_4 ($p \leq 0,05$).

La dosis máxima de nitrógeno del T_6 (N_1+P_1), presentó un comportamiento fitotóxico, observado anteriormente, generando una menor altura de las plantas. Luego de los 135 días este efecto se ve superado. Todas las dosis de nitrógeno alcanzaron similar altura hasta los 159 días ($p \leq 0,05$) (**Figura 18**). Luego del corte, la dosis media

de nitrógeno (T_4 : $P1+1\frac{1}{2}N$) superó a T_1 y T_2 , y T_6 superó a T_1 , con diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$), (**Figura 19**).

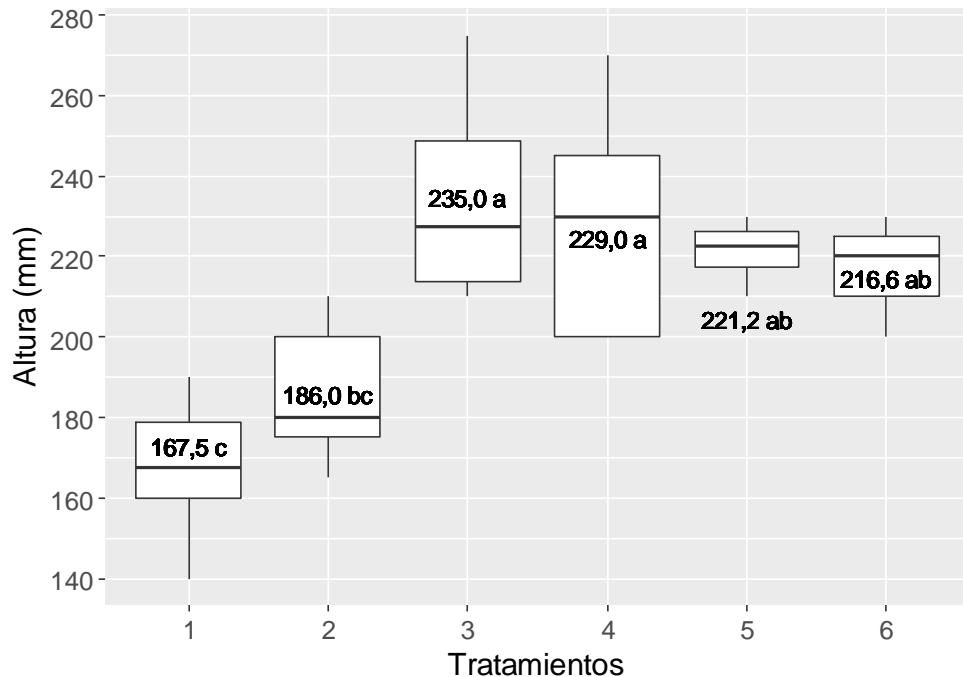


Figura 19. Valores medios de altura de plantas, después de la poda, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0,05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

c. Incrementos de altura. Por otro lado, analizando el incremento diario de altura, se observaron tres picos marcados en el T_1 , a los 30 dda (noviembre 2015), a los 80-90 dda (enero 2016) y luego de la poda de despunte a los 200 dda (mayo 2016). Entre estos picos el incremento de altura fue nulo (**Figura 20**), observándose desarrollo foliar (maduración de hojas) y lignificación de tallos, paradas mencionadas por Bazzo y Rakocevic (2000). Estos incrementos de altura coinciden con los picos de crecimiento que se observan fenológicamente en el cultivo), como lo observan también Sansberro *et al.* (2000) y Rakocevic *et al.*, (2011). En este caso el segundo periodo de brotación es de mayor magnitud en el T_1 (testigo).

Todos los tratamientos presentaron un leve pico de crecimiento más que el T_1 (testigo), a los 60 días. Además el inicio del segundo y último pico de crecimiento se adelantó entre 30-40 días, respecto al T_1 (testigo). El mayor incremento de altura se presentó en el primer pico de brotación en los tratamientos T_4 y T_5 , con el mismo comportamiento luego de la poda a los 159 dda.

Los tratamientos con la variación de fósforo ($T_3:0P$, $T_5:1/2P$ y $T_6:1P$) y sin limitante de nitrógeno (N_1) (**Figura 20 c**), no registraron diferencias en el primer pico de incremento de altura a los 30 dda, pero sí, se diferenciaron del T_1 (testigo) y presentaron incrementos de altura a los 60 dda. A los 90 dda, todos los tratamientos tuvieron picos de menor magnitud que T_1 (testigo). El último pico de crecimiento se adelantó, para todos los tratamientos, a los 120 dda y con un máximo a los 150 dda, se prolongó después de la poda, hasta los 190 dda. Los mayores incrementos se observaron en el T_5 ($N_1+1/2P$).

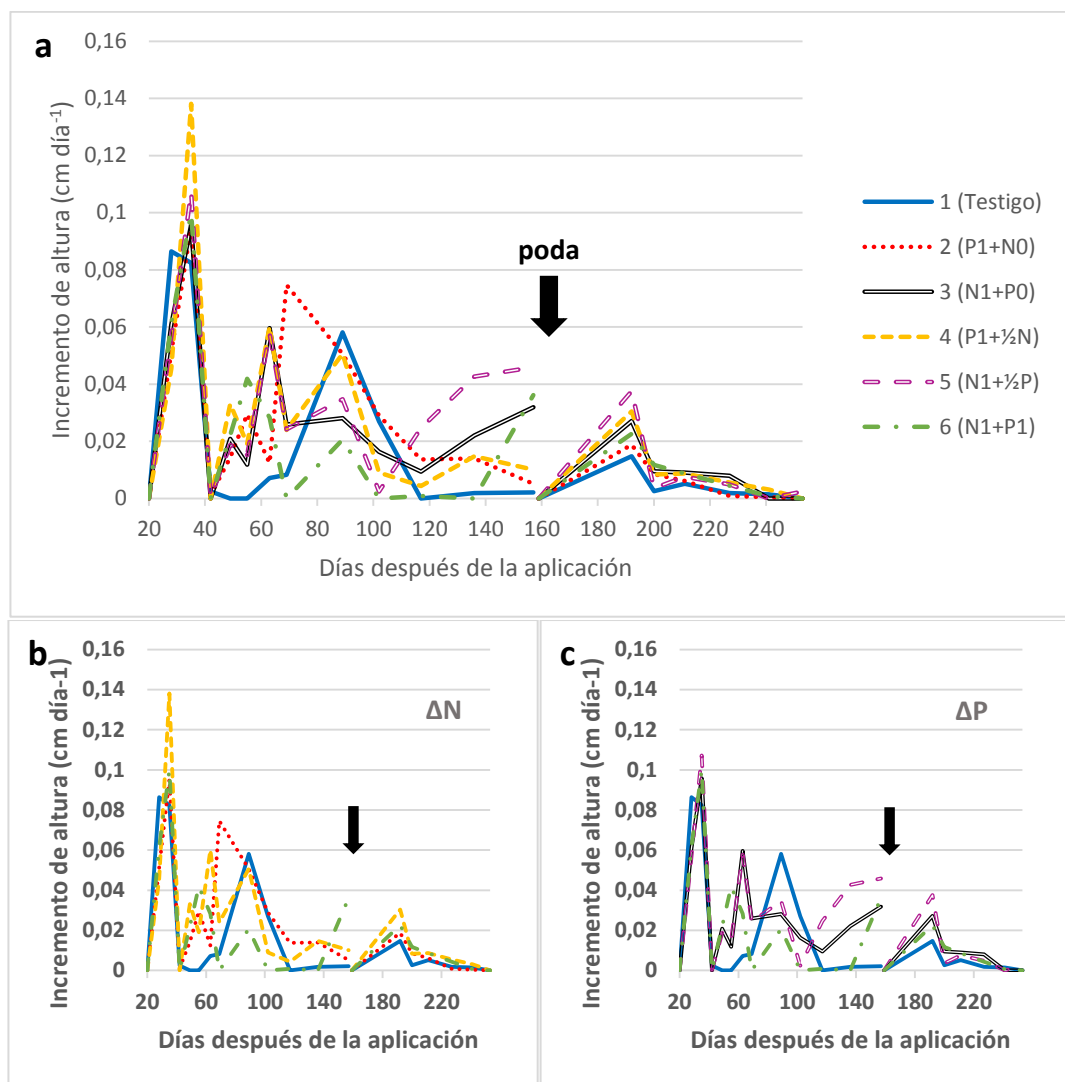


Figura 20. a) Incrementos de altura (cm día⁻¹) en los distintos tratamientos, **b)** dosis de fósforo constante (P_1) y solo varía la dosis de nitrógeno y **c)** dosis de nitrógeno constante (N_1) y solo varía la dosis de fosforo, desde el inicio del ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda).

Con respecto a los demás tratamientos (**Figura 20 b**) donde la variación estaba representada por las dosis de nitrógeno ($T_2:0N$, $T_4:\frac{1}{2}N$ y $T_6:1N$), sin limitantes de fósforo (P1), los tratamientos se comportaron de manera similar, excepto a los 140 días donde las dosis media de nitrógeno y sin nitrógeno presentaron un pico de crecimiento leve.

Antes y después de la poda, el T_4 ($N\frac{1}{2}+P1$) y T_5 ($N1+\frac{1}{2}P$), mostraron gran respuesta en incrementos de altura, como indicador de mayor energía para la brotación, con picos elevados e intensos.

2. Diámetro.

Al inicio del ensayo las plantas presentaban un diámetro de 2,99 mm medido a 5 cm de altura desde el suelo. A los 159 días, los tratamientos T_3 ($N1+P0$) y T_5 ($N1+\frac{1}{2}P$) presentaron diámetros superiores, aunque sin diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$) (**Figura 21**).

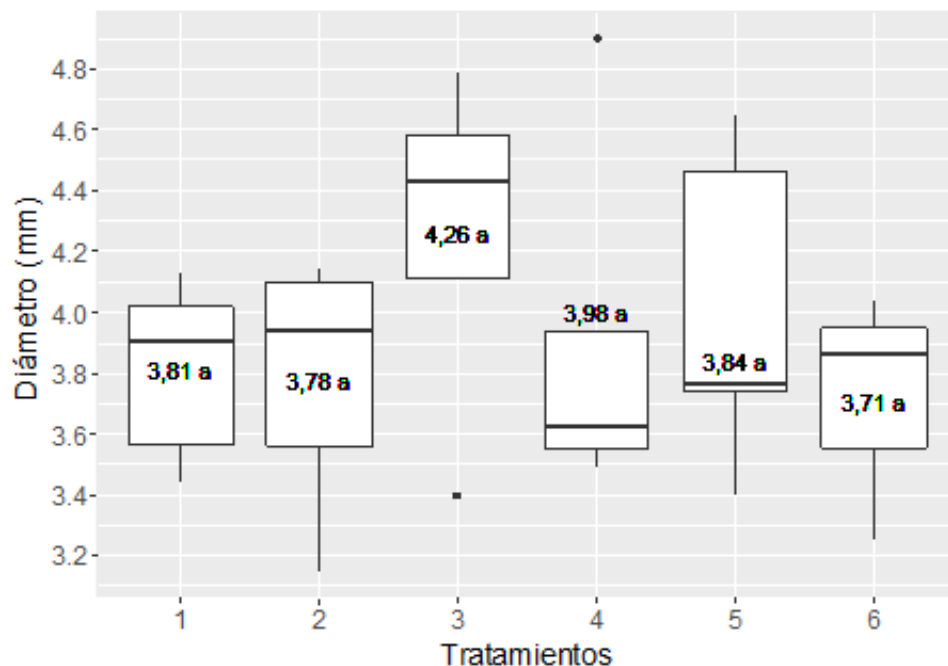


Figura 21. Diámetro a la altura del cuello en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p\leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

Al finalizar el ensayo (253 dda), no se observaron diferencias estadísticas significativas en el diámetro de las plantas entre los tratamientos (**Figura 22**). Resultados similares fueron encontrados en otras especies, como duraznero y

manzano (Gómez, 1998), donde no observaron diferencias en dicha variable para diferentes dosis y tipo de fertilizantes. Esta variable tal vez sea de importancia en plantas de yerba mate de mayor edad, como tejido de reserva, ya que gran parte de la arquitectura de la planta perdura durante las cosechas anuales y posteriormente depende de las reservas de raíces y tallo para la brotación. La cinética de crecimiento y desarrollo de especies arbóreas es ampliamente descrito en Salisbury y Ross (1994), donde mencionan la importancia de tejidos de conducción y reservas, mencionando como se producen paradas de crecimiento en altura y prosigue el desarrollo en espesor a través del cambium, formando estos tejidos.

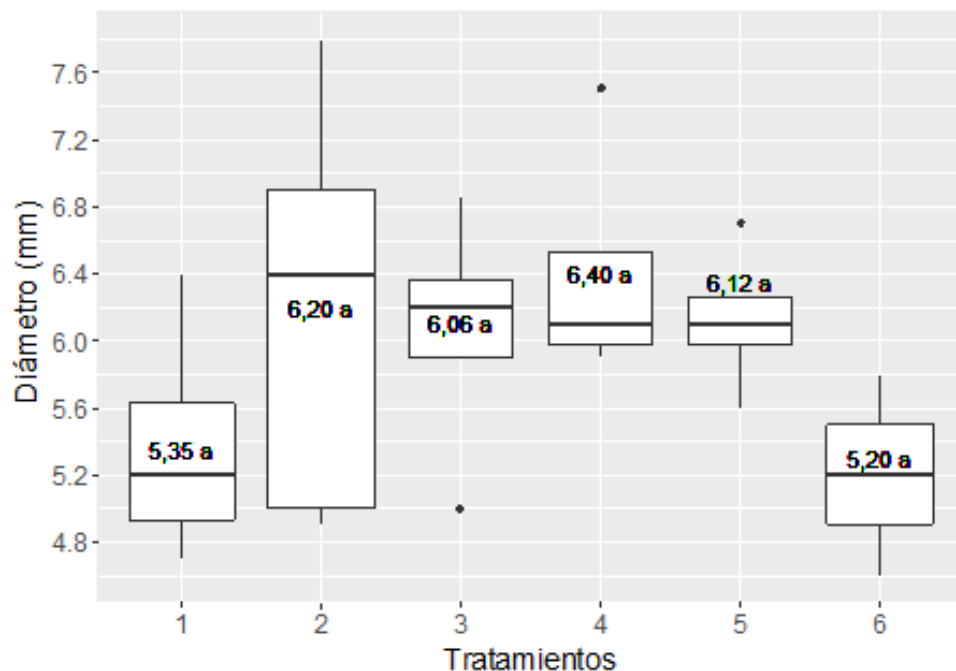


Figura 22. Diámetro a la altura de cuello en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

3. Brotación.

Los datos del número de brotes por planta se presentan en la **Figura 23 a**. El T_1 (Testigo) presenta dos picos de brotación, uno a los 80-90 dda (fines de diciembre) y otro los 180-190 dda (principio de abril). Los demás tratamientos adelantaron su primer pico brotación a los 60 dda (fines de noviembre), y tuvieron otro pico igual al tratamiento T_1 (Testigo) a los 180-190 dda, luego de la poda a 12 cm de altura.

Se destaca el adelantamiento de la brotación en el primer pico, aproximadamente 30 días, atribuible a las condiciones nutricionales de los tratamientos, respecto al testigo (**Figura 23 a**).

Los picos de crecimiento observados en Yerba mate, también son característicos de muchas especies. Cuando el balance fotosintético es favorable, se produce un fuerte crecimiento en longitud del brote, durante la primavera y principios del verano. Al final del verano y principios del otoño, hay un segundo pico mucho menos importante que el primaveral. Luego, el crecimiento se atenúa hasta llegar en muchos casos a detenerse, para formar la yema terminal que pasará cubierta por catáfilas durante el invierno (Tourn *et al.*, 1999).

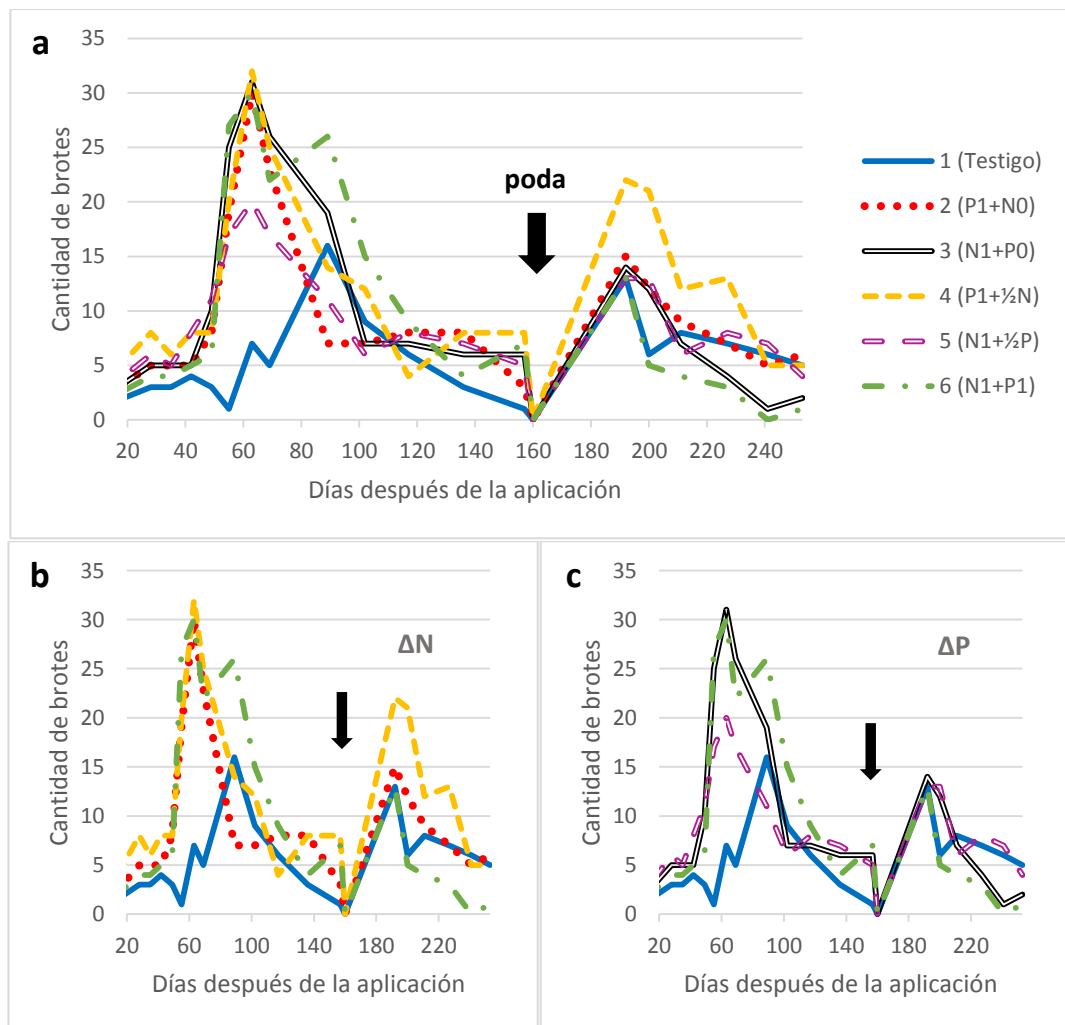


Figura 23. a) Número de brotes por planta en los distintos tratamientos, **b)** dosis de fósforo constante (P₁) y solo varía la dosis de nitrógeno y **c)** dosis de nitrógeno constante (N₁) y solo varía la dosis de fosforo, desde el inicio del ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda).

Bazzo y Rakocevic (2005), al comparar dos ambientes, sombreado y a pleno sol, diferencian tres fases en el crecimiento de la yerba mate, fase de crecimiento rápido (brotación), fase de disminución del ritmo de crecimiento y parada total del crecimiento, mencionan que dichas paradas de crecimiento están directamente ligadas a factores climáticos, temperatura baja en el invierno y oscilador circadiano (fotoperíodo) en verano.

Según el número de brotes acumulados (**Figura 24**), todos los tratamientos fueron superiores al T₁ (testigo) durante todo el ensayo. Desde los 65 dda, en adelante, T₂ (P1+N0) y T₅ (N1+½P) registraron los valores más bajos de esta variable.

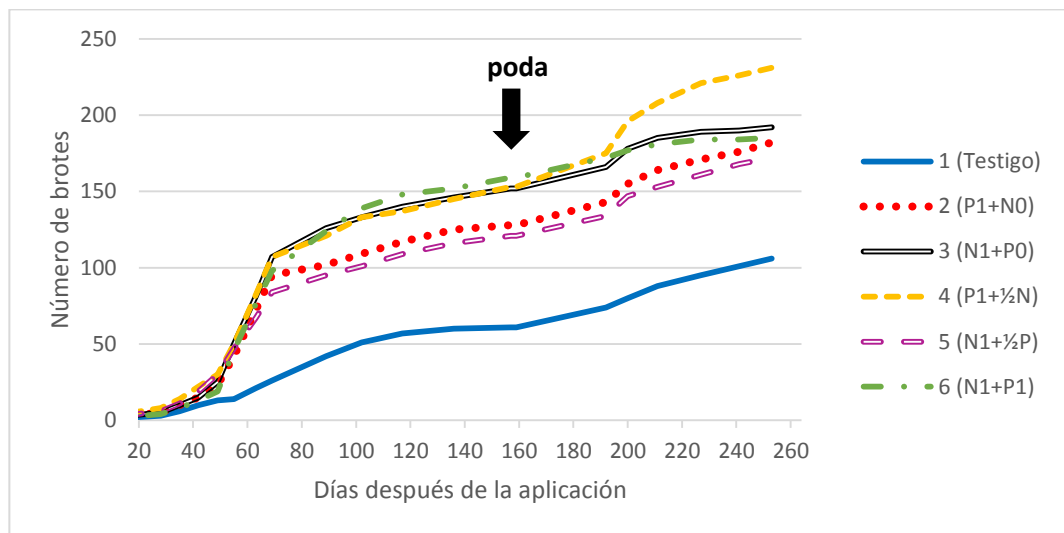


Figura 24. Número de brotes acumulado por planta en los distintos tratamientos.

Luego de la poda a los 12 cm de altura, a los 159 dda, el T₄ (P1+½N) tuvo la mayor acumulación de brotes respecto a los demás tratamientos. A los 253 dda los tratamientos T₄ (P1+½N) y T₆ (N1+P1) fueron los que mayor número de brotes presentaron al final del ensayo (**Figura 25**).

Estas respuestas dependen del crecimiento inicial del brote, de las podas, de las sustancias de reservas acumuladas en la planta, ligado al suministro de agua y nutrientes, y de la capacidad fotosintética implicada en el crecimiento (Salisbury y Ross, 1994; Taiz y Zeiger, 2006 b; Azcon Bieto y Talón, 2000).

En la **Figura 23 c**, para una misma dosis de nitrógeno (N1), variando dosis de fósforo, se encontró que todos los tratamientos promovieron la brotación, adelantándola unos 30 días con respecto al testigo. Se destacan los tratamientos T₃ y T₆, respecto a T₅. Luego de la poda, no se observan diferencias entre las dosis de P y el T₁ (testigo).

En el comportamiento de la brotación de las plantas bajo diferentes dosis de nitrógeno (**Figura 23 b**), no se observaron diferencias hasta los 60 dda. A los 180-190 dda, el T₄ con dosis media de nitrógeno, superó a los demás tratamientos.

La brotación no tiene una tendencia clara, marcada por el N o P, por lo cual se podría inferir que ambos participan en dicho proceso y que la relación N/P sería cercana a la dosis de N y P correspondiente al T₄.

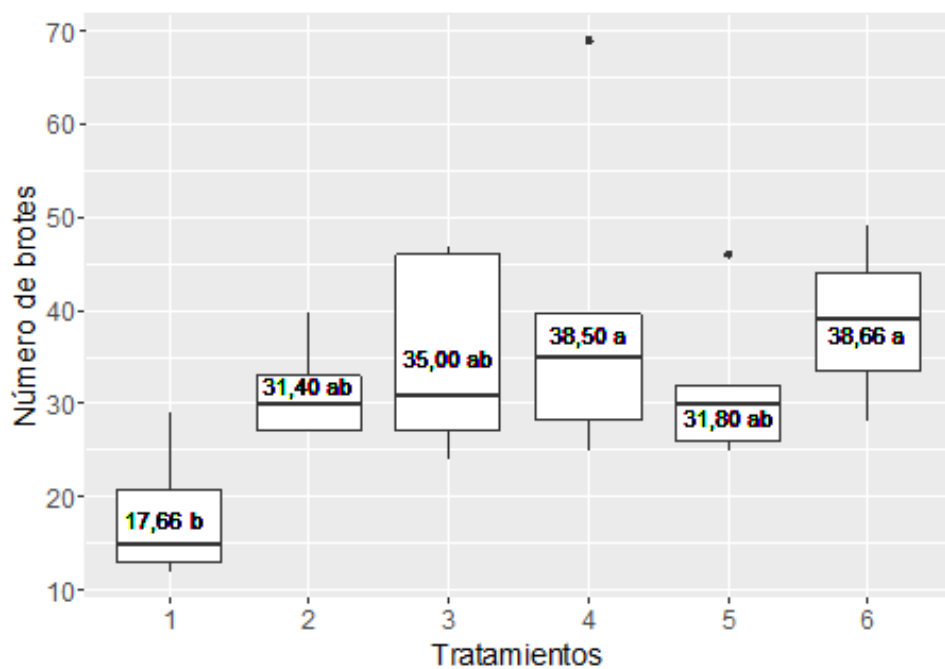


Figura 25. Número total de brotes por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

El N, tiene estrecha relación con las hormonas (promotores e inhibidores) que desempeñan un rol importante en el crecimiento de los brotes. Con la superación del reposo invernal se producen cambios en el complejo hormonal de la planta, aumentando los promotores de crecimiento respecto de los inhibidores. Un caso particular es el de las giberelinas que participan en el desarrollo del brote y en el alargamiento de los entrenudos (Salisbury y Ross, 1994; Azcon Bieto y Talón, 2000; Taiz y Zeiger, 2006 b). En Yerba mate, la aplicación de giberelinas favorece el crecimiento en longitud de los brotes, como mencionan Sansberro *et al.* (2002). Por otro lado, el ácido abscísico se sintetiza en las hojas adultas y neutraliza el efecto de las giberelinas, siendo el determinante de la latencia de las yemas. Además el ABA

favorece la abscisión de las hojas. El control hormonal del crecimiento es muy complejo ya que interviene en el equilibrio de numerosas sustancias, además de las condiciones nutricionales de los órganos donde participan el N y P en las rutas metabólicas hormonales (Bidwell, 2000).

Queda demostrado, que la aplicación de nutrientes (N y P), intervendrían en algunos de los factores antes mencionados, por lo cual se registran estas diferencias respecto al T₁ (testigo) en la producción de brotes. Por otro lado, se analiza las reservas carbonadas y su efecto sobre el crecimiento (**ver punto E**).

4. Ramificaciones.

Si se elimina el ápice del brote, se provoca la emisión de brotes anticipados en las primeras yemas laterales que se encuentran correlativamente por debajo del corte. Cabe citar que la emisión de brotes anticipados también se produce de forma natural, aunque exista el ápice de crecimiento, presentando dicha emisión diferentes pautas según la especie considerada. En la emisión de brotes anticipados también influye la velocidad de crecimiento del brote y la época del año en que se encuentra. Estos brotes luego constituyen las ramificaciones características de la especie o incentivadas por las podas.

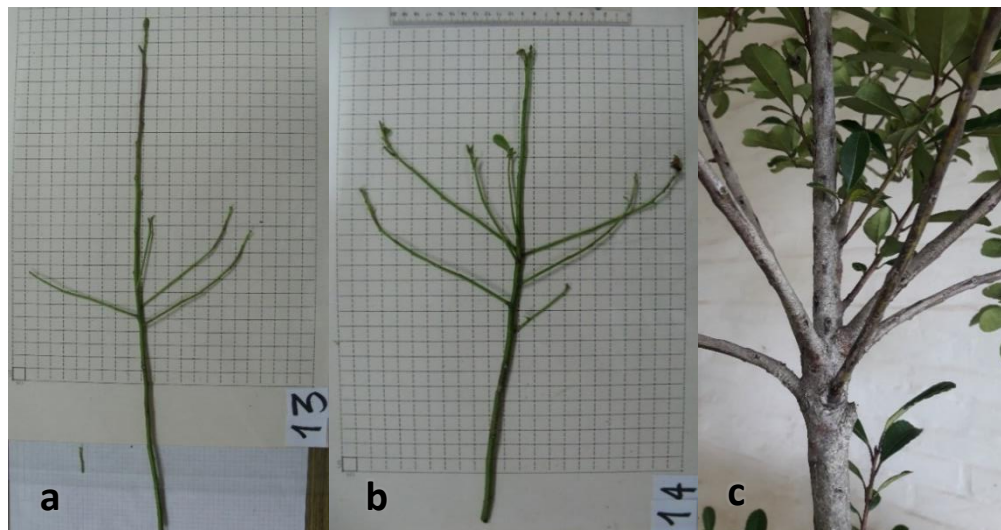


Figura 26. Ramificaciones en los tratamientos 3 (N₁+P₀) (a), 4 (N_½+P₁) (b) y en planta adulta (c), donde se puede observar el tipo de ramificación natural en *Ilex paraguariensis* Yerba mate).

Al inicio del ensayo las plantas no presentaban ramificaciones. En el transcurso del experimento, la variable ramificaciones no tuvo diferencias estadísticas significativas

($p > 0.05$) entre tratamientos, aunque el tratamiento T₄ registró el promedio más alto a los 159 dda (**Figura 27**) y el T6 a los 253 dda (**Figura 28**).

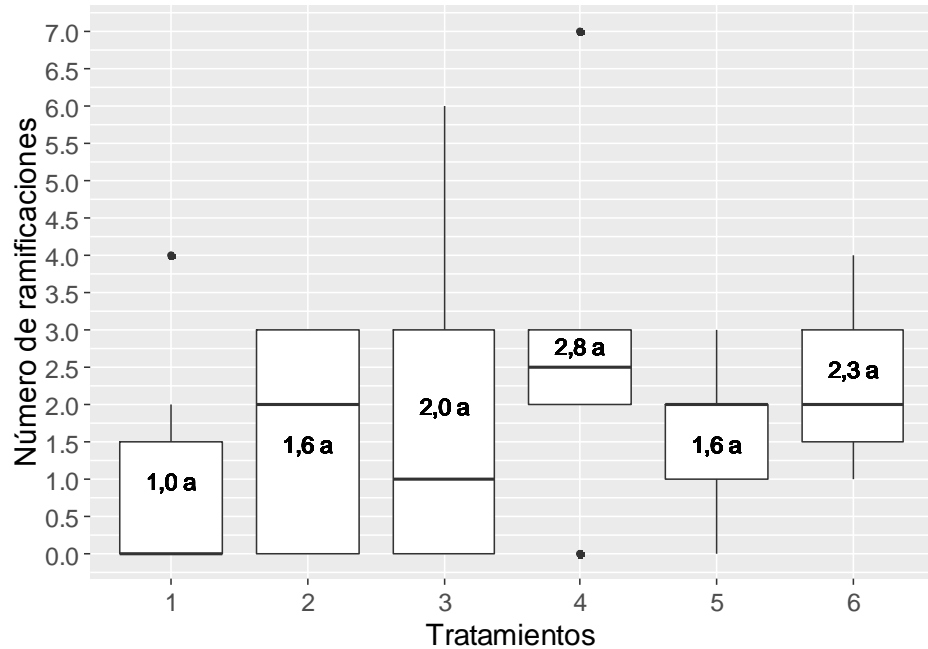


Figura 27. Número de ramificaciones totales por planta en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

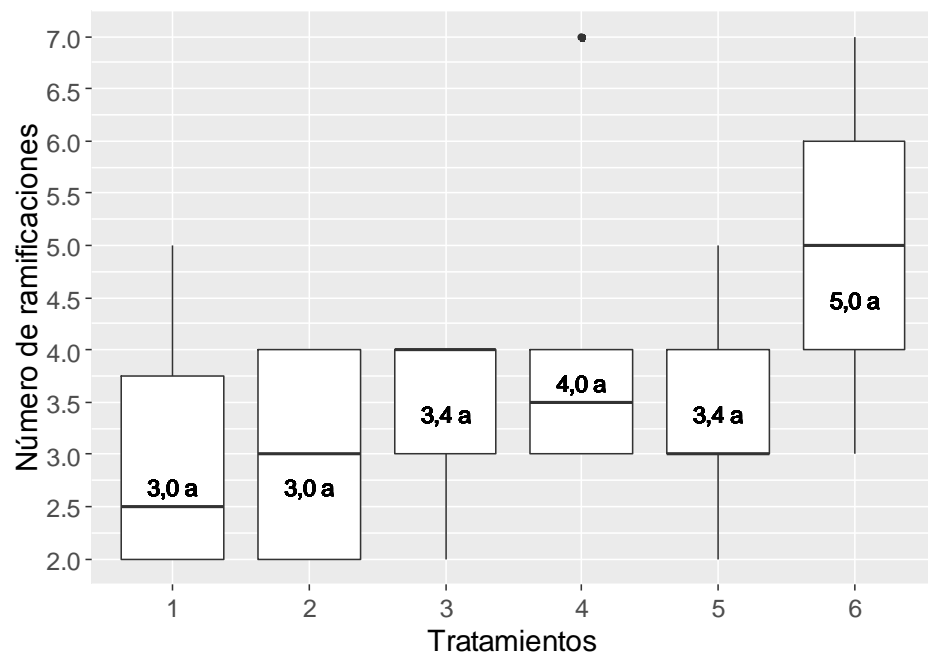


Figura 28. Número de ramificaciones totales por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o

mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

En la **Figura 29**, se presenta la evolución de la cantidad de ramificaciones en el transcurso del experimento. A pesar que no se observaron diferencias estadísticas significativas, todos los tratamientos superaron al testigo en el número de ramificaciones, con mayor diferencia en los tratamientos T₃ (N₁+P₀), T₄ (P₁+½N) y T₆ (N₁+P₁) hasta los 159 días. Luego de realizado el corte a 12 cm, las ramificaciones fueron mayores en T₄ (P₁+½N) y T₆ (N₁+P₁), cayendo notablemente la brotación en T₃ (N₁+P₀), posiblemente debido a la ausencia de P.

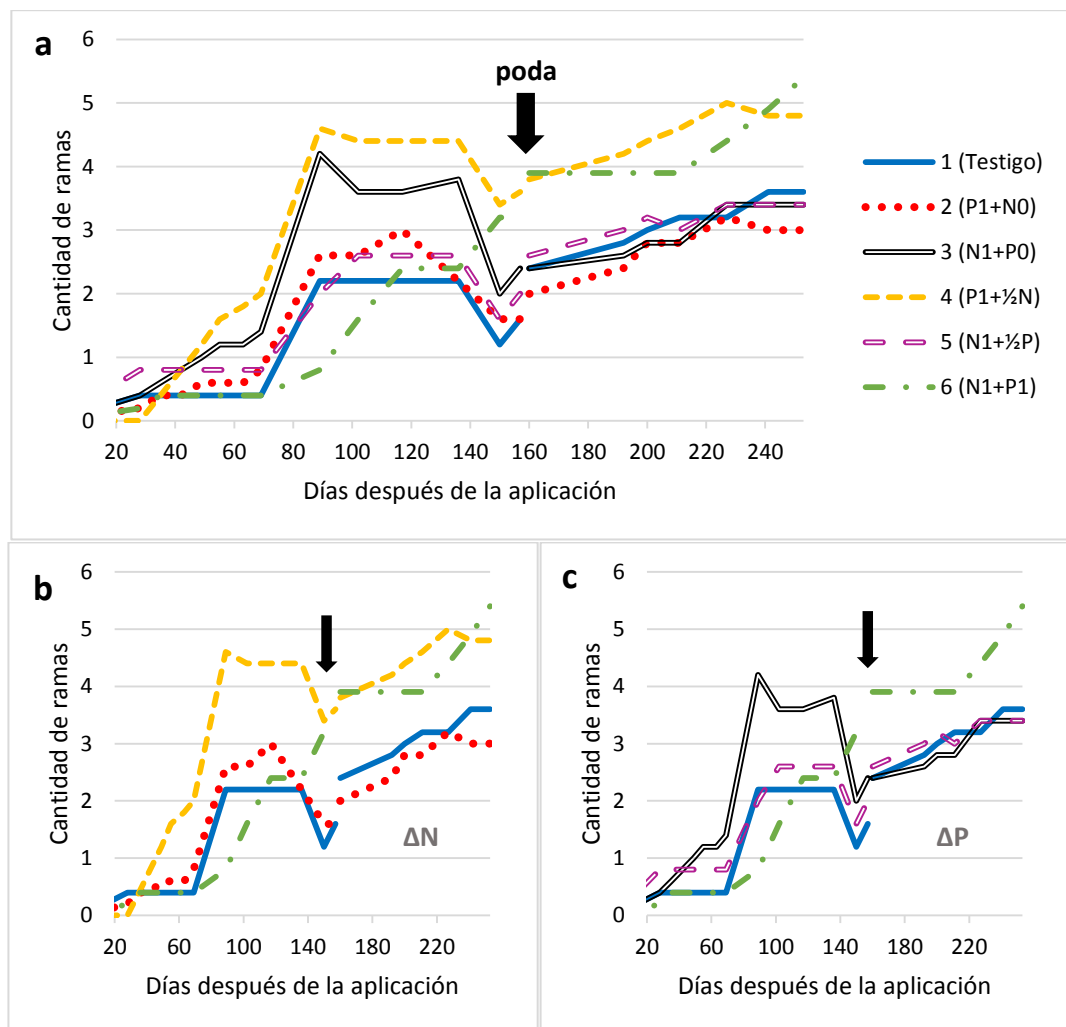


Figura 29. a) Número de ramificaciones en los distintos tratamientos, **b)** dosis de fósforo constante (P₁) y solo varía la dosis de nitrógeno y **c)** dosis de nitrógeno constante (N₁) y solo varía la dosis de fosforo, desde el inicio del ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda).

En las **Figura 29 b** y **Figura 29 c**, se observa la importancia que tiene el fósforo luego de las podas para volver a regenerar la estructura de la planta por medio de ramificaciones. En la **Figura 29 c**, el T₃ se destaca porque presentaba buena cantidad de ramificaciones previo a la poda y luego redujo las ramificaciones por planta notablemente, indicando la incidencia de la falta de P después de las podas. En la **Figura 29 b**, los tratamientos T₄ y T₆, se comportaron sin inconvenientes frente a las podas, no así, los demás tratamientos.

Se demuestra la importancia de la combinación N-P y sobre todo el rol del P, expresado en el T₄, para la formación de nuevas ramificaciones antes y después de la poda (**Figura 30**). El T₃ se comporta igual a T₄, previo a la poda y siendo similar a T₁ luego de la poda, es decir que, decae en la nueva formación de ramificaciones, este efecto es atribuible a la ausencia de P. En cambio, el T₄ no decae en cantidad de ramas luego de realizada la poda, siendo siempre superior al testigo.

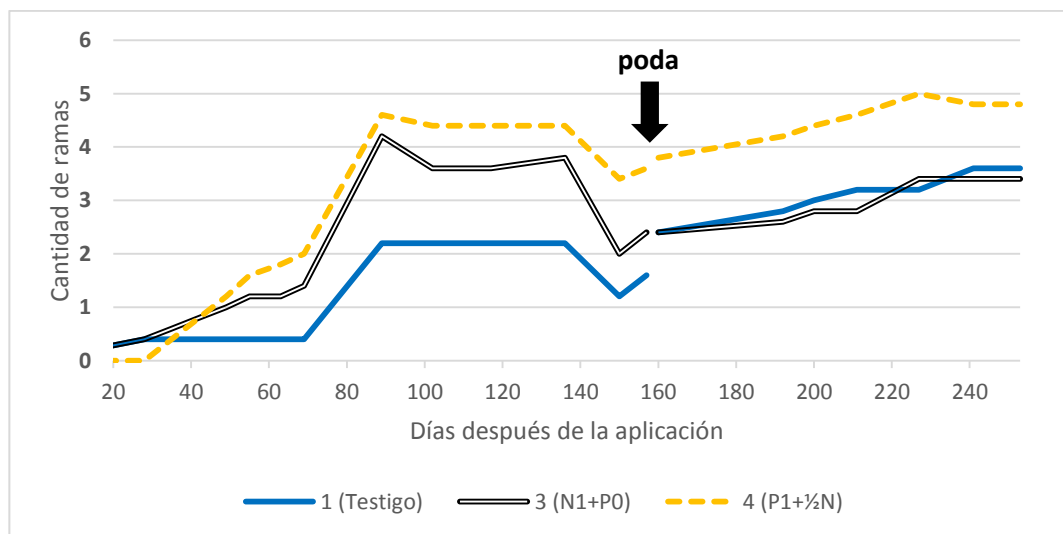


Figura 30. Número de ramificaciones en los tratamientos T₃ y T₄ con respecto al (T₁) testigo, antes y después de la poda (159 dda).

En el **punto E** se detalla la importancia del P y su relación en la cantidad de HCST del tallo, los cuales estarían implicados en las brotaciones y ramificaciones posteriores a la poda como energía rápidamente disponible.

Arquitectura de la Yerba mate. Desde el punto de vista de la arquitectura vegetal, definida por Bell (1994), como la morfología dinámica que lleva a la construcción de una planta y siguiendo la descripción de la arquitectura vegetal de Tourn *et al.* (1999), se define a la yerba mate como una especie de crecimiento indefinido o

indeterminado, ya que su meristema apical tiene la potencialidad de funcionar indefinidamente en el tiempo, pudiendo ser continuo o rítmico.

Sansberro *et al.* (2002) y, Bazo y Rakocevic (2005), definen al crecimiento como rítmico, cuando existe una alternancia regular de fases de alargamiento y de reposo. Estos estudios realizados en *Ilex paraguariensis*, definen periodos de crecimiento o picos que se relacionan a las condiciones climáticas y fenológicas del cultivo.

En este trabajo, se observan adelantos en diferentes tratamientos, respecto a los picos de crecimiento, lo cual se puede atribuir a la importancia de la nutrición vegetal sobre el crecimiento rítmico. Cuando una especie cuenta con crecimiento indefinido, del tipo rítmico, se delimitan unidades de crecimiento, que corresponden a la porción de vástago que se desarrolla durante un periodo de alargamiento ininterrumpido del tallo (Tourn *et al.*, 1999). En general dos unidades de crecimiento sucesivas presentan una zona de entrenudos cortos, asociados a catáfilas, que protegen al meristema durante la fase de reposo.

Debido a este tipo de crecimiento, la yerba mate presenta ramas que forman grupos o pisos (**Figura 31.b**) regularmente espaciados, que en promedio oscilan en 10-12 nudos en el braquiblasto y otros 20-25 nudos en los espacios entre grupos de ramas, es comparable al de otras especies como *Araucaria sp.*, *Pinus sp.*, *Fraxinus sp.* o *Populus sp.*

Considerando la agrupación de troncos y ramas, morfológicamente idénticos, monopodios ortótropos, con crecimiento y ramificación rítmicos, con inflorescencias siempre laterales, se define a *Ilex paraguariensis* dentro del modelo arquitectural de Rauh (Tourn *et al.*, 1999; Hallé, 2010).

Debido a las podas, un árbol de yerba mate no desarrolla completamente su modelo arquitectural (modelo de Rauh), sino que repite varias estructuras básicas de crecimiento (**Figura 31.a**) donde una o dos ramas tienden a reemplazar el tronco. Luego de podas de rejuvenecimiento, la planta tiene la capacidad de regenerarse completamente volviendo a formar su modelo arquitectural. Este tipo de regeneración se conoce como “reiteración total”, pero cuando la estructura no se extrae completamente y se forman nuevas estructuras con gran vigor, llamadas chupones¹⁷, estas tienden a duplicar la secuencia de desarrollo y reciben el nombre de “reiteración parcial”. Estas estructuras surgen de yemas latentes y se definen como reiteraciones

¹⁷ chupones: vástago que brota de las ramas principales, del tronco o de las raíces de los árboles con gran dominancia apical y vigor.

que, en el caso de las podas específicamente, se habla de una “reiteración traumática” o “reiteración adaptativa” (Tourn *et al.*, 1999).

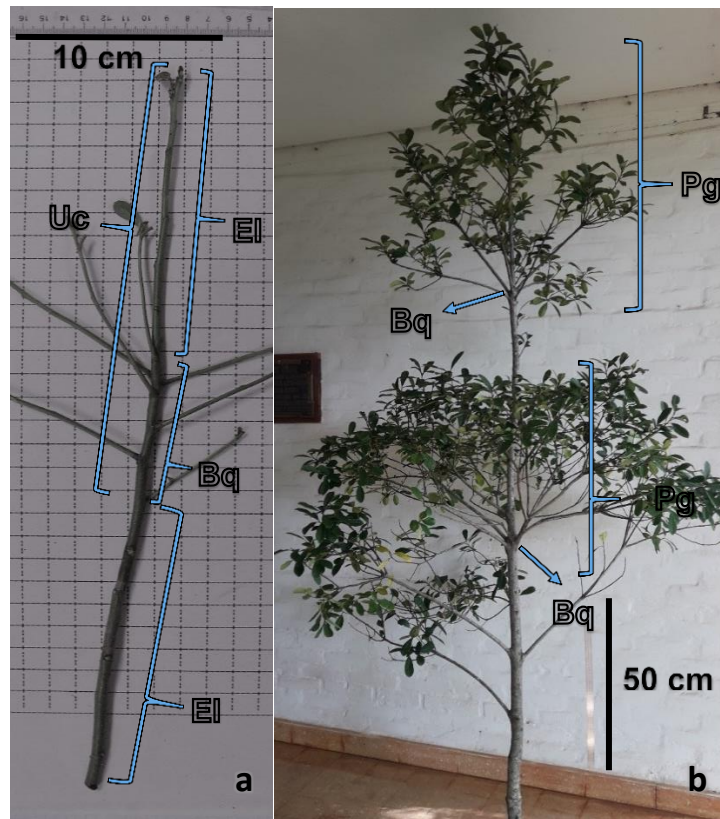


Figura 31. a. Ramificación en *Ilex paraguariensis* (Yerba mate), se puede observar una zona de entrenudos cortos (braquiblasto) y otra zona libre de ramas con entrenudos largos, que conforman la unidad de crecimiento típica para la especie. b. Rama de planta adulta sin podas, se observan los pisos o estratos que forman las ramas. (**Bq**: Zona de ramificación, Braquiblasto. **EI**: entrenudos largos, poca o nula ramificación, **Uc**: unidad de crecimiento, **Pg**: piso o grupo de ramas).

Una planta de yerba mate en producción intensiva, no es capaz de expresar toda su arquitectura, ya que constantemente está en reiteración traumática o adaptativa, generando nuevas unidades arquitecturales que reemplazan su modelo arquitectural.

El estudio arquitectural permite entender mejor las relaciones inter e intra específicas, entre las plantas y la luz, agua o nutrientes, y la arquitectura de la copa parece tener una importancia mayor en plantas de mayor tamaño (Villar, 2008). Por otro lado, comprender la incidencia de estos factores a nivel morfológico y poder cuantificarlos, permite el uso de modelos matemáticos para modelización y simulaciones de desarrollo, como los utilizados por muchos investigadores (Bazzo y Rakocevic (2005), Rakocevic *et al.* (2006^a, 2006^b); Rakocevic *et.al.* (2008); Silva y

Rakocevic (2010); Matsunaga y Rakocevic (2011); Rakocevic y Picarelli (2011) y Matsunaga *et al.* (2012)), para Yerba mate.

5. Hojas.

a. Producción de Hojas. Las plantas presentaban al inicio del ensayo 12,2 hojas en promedio. La aplicación de nutrientes produjo un aumento en esta variable, alrededor de los 60 dda, en todos los tratamientos, con excepción de T₁ (testigo) que aumentó el número de hojas aparecidas a partir de los 90 dda (**Figura 32**).

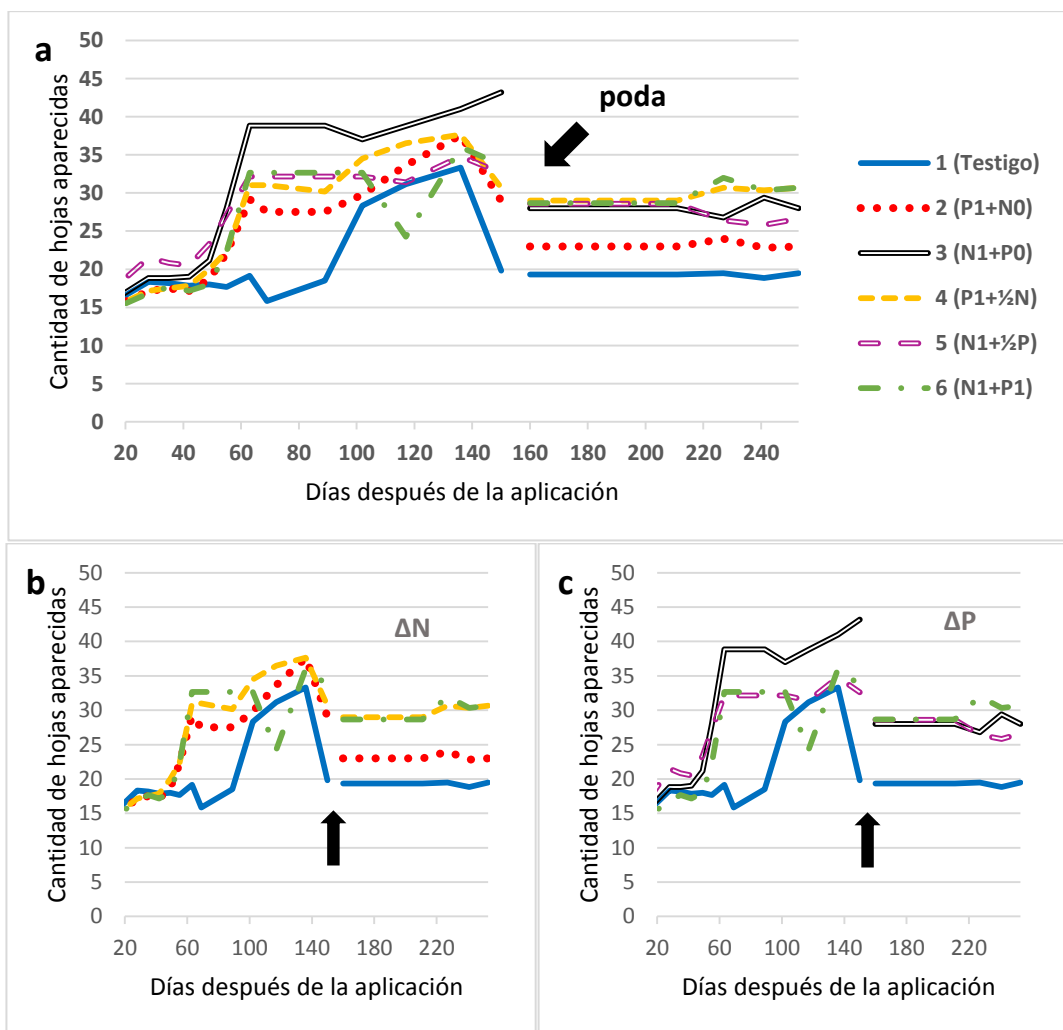


Figura 32. a) Número de hojas aparecidas acumulado por planta en los distintos tratamientos, b) dosis de fósforo constante (P_1) y solo varía la dosis de nitrógeno y c) dosis de nitrógeno constante (N_1) y solo varía la dosis de fósforo, desde el inicio del ensayo (0 dda) hasta el final (253 dda), donde las flechas indican la poda a 12 cm de altura (159 dda).

En el T₂ (P_1+N_0), T₄ ($P_1+\frac{1}{2}N$) y T₆ (N_1+P_1), el número de hojas aparecidas varía luego de la poda, en función de la dosis de nitrógeno (N_0 , $\frac{1}{2}N$ y N_1) aplicada. Se observa en la **Figura 32 b**, que la dosis media y total de nitrógeno son las que mejor

respuesta presentaron. Sin nitrógeno, solo con el efecto del fósforo, se encuentra muy cercano al testigo luego de la poda. El T₄ (P1+½N), fue el que mejor respuesta presentó, aumentando el número de hojas aparecidas.

En T₃ (N1+P0), T₅ (N1+P½) y T₆ (N1+P1), donde la dosis de nitrógeno es fija (N1) y la variación se encuentra en el fósforo (P0, ½P y P1) (**Figura 32 c**), la cantidad de hojas aparecidas no responde a las diferentes dosis de fósforo, pero se diferencian del testigo.

Las hojas juegan un importante papel en el crecimiento del brote, el cual puede comprobarse mediante su supresión. Las hojas jóvenes intervienen en la elongación del entrenudo y en la inhibición de las yemas axilares, como ya se ha comentado. Las hojas adultas alimentan al brote favoreciendo su crecimiento. Debido al análisis previo, es posible que la combinación de N y P del T₄ sea la más adecuada para producción de hojas luego de podas. Además, se observó una relación directa entre dosis de nitrógeno y el número de hojas (T₃).

b. Área foliar. El área foliar representa la capacidad que tiene la planta para captar la luz incidente, representando de manera directa la capacidad de transformar la energía lumínica en química, y tiene relación directa con la cantidad de hojas, analizado previamente (**ver punto C.5.a**).

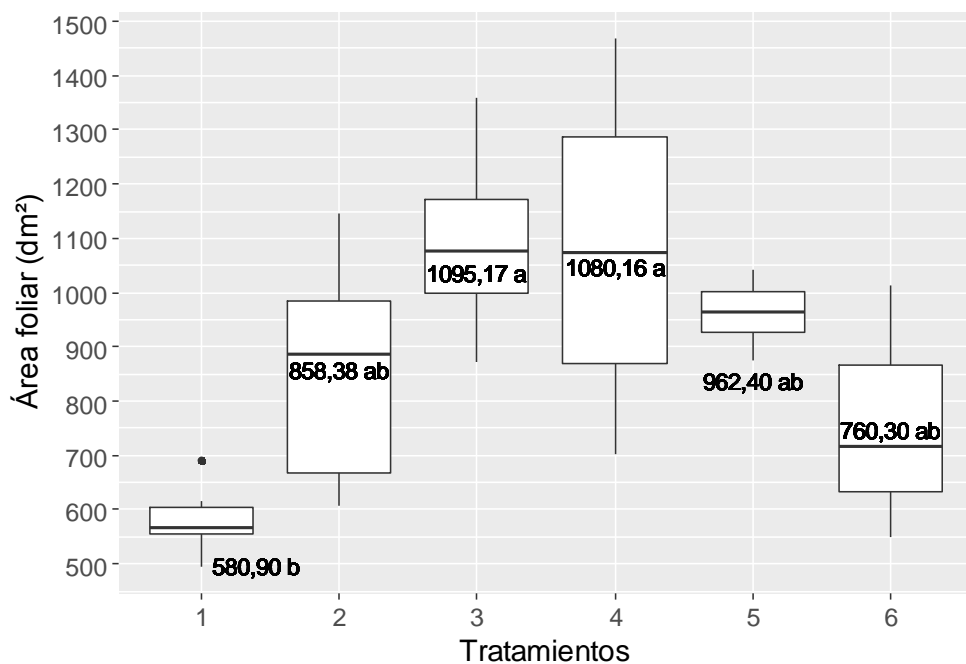


Figura 33. Área foliar (dm²) promedio por planta en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey (p≤0.05). En cada caja se

observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

El mayor área foliar previo a la poda (**Figura 33**), a los 159 dda, se observó en los tratamientos T_3 y T_4 . Luego de la poda, a los 253 dda, el tratamiento T_3 , fue el que mayor área foliar generó, indicando la importancia del N para regenerar superficie foliar perdida por la poda (**Figura 34**).

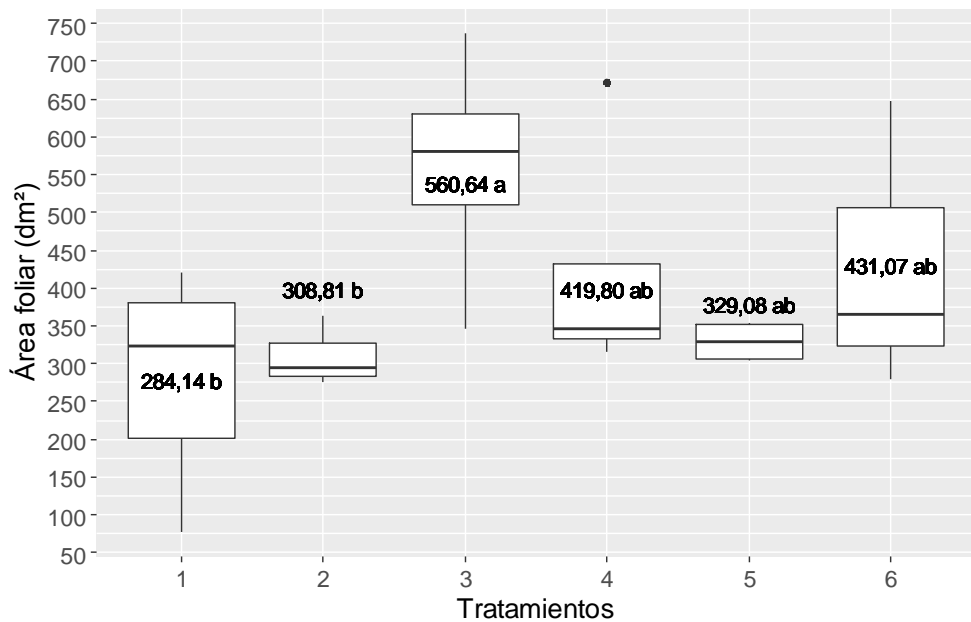


Figura 34. Área foliar (dm^2) por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales los extremos representan valores máximos y mínimos respectivamente y los puntos valores extremos.

El área foliar total que produjeron las plantas durante todo el ensayo se presentan en la **Figura 35**, donde se destacan los tratamientos T_3 y T_4 , con diferencias estadísticas significativas, respecto al T_1 (testigo).

Una consecuencia de la variación del área foliar, por ejemplo en la disminución debido a las podas, determina una menor captación de luz y por ende una reducción en el aporte de carbohidratos, principalmente sacarosa, destinada a la formación de compuestos (ej. proteínas) y energía para el crecimiento (**ver punto E**). Aparejado a esto, el rebrote de la planta depende en un comienzo del nivel de carbohidratos y posteriormente del área foliar remanente (Vickey, 1981; Ward y Blaser, 1961), es por esto que no se pueden separar los efectos del N y P, referidos a la brotación y generación de área fotosintética (T_4 y T_3 , respectivamente).

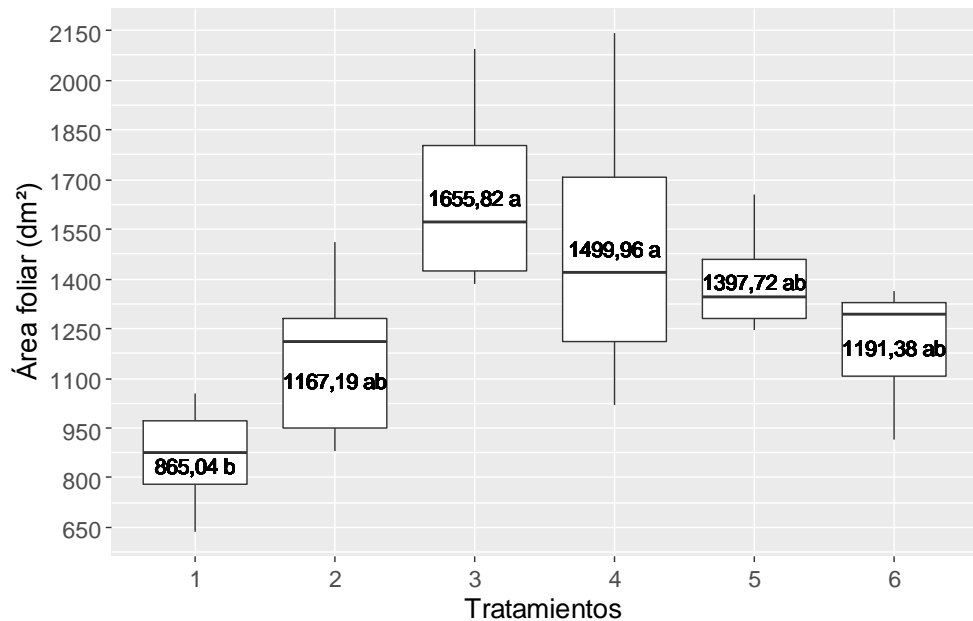


Figura 35. Área foliar (dm²) total por planta, en los distintos tratamientos. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente.

Algunos investigadores sostienen que al dejar una mayor área foliar favorecería el rebrote, por quedar un mayor número de puntos de crecimiento (Smith, 1972), otros cuestionan el valor de las hojas residuales puesto que son viejas y menos eficientes en el proceso de la fotosíntesis, constituyendo más una demanda que fuente de energía (Brown, 1982; Leach, 1968).

c. Largo y ancho. Las medidas lineales de las hojas en ciertas especies tienen estrecha relación a su área foliar, por lo cual, se midió largo y ancho de cada hoja al inicio (0 dda), pre-poda (159 dda) y post-poda (253 dda) (**Tabla 9**).

En este trabajo se puede atribuir un índice general de: 0,72, medido en hojas adultas bien maduras, con el cual es posible estimar el área foliar de la planta por medio de las medidas lineales de las hojas.

Por otro lado, se analizó en hojas de yerba mate de plantas adultas estas medidas lineales, para lograr ajustar la estimación del área foliar en plantas de *Ilex paraguariensis*, teniendo en cuenta la incidencia de diferentes factores sobre el área foliar. Se consideraron hojas de acuerdo a la edad (flash, post-flash, madura), la posición en la planta (abajo, medio y alto) y la orientación (norte, sur, este, oeste),

donde se recomienda utilizar hojas maduras; para más detalles ver el trabajo de Skromeda *et al.* (2017).

Tabla 9. Mediciones lineales (largo y ancho) en hojas de plantas de *Ilex paraguariensis*, área foliar (obtenida por análisis de imágenes), producto de largo y ancho, índice¹⁸ y número de muestras, en el inicio (0 dda), pre poda (159 dda) y post poda (253 dda) durante el ensayo.

	Largo (mm)	Ancho (mm)	Largo x Ancho (dm ²)	Área Foliar (dm ²)	Índice	n
Inicio (0 dda)	53,0866 ± 25,71	22,7335 ± 9,74	14,4629 ± 11,44	9,7652 ± 7,52	0,6947 ± 0,04	62
Pre poda (159 dda)	82,9274 ± 36,45	36,7429 ± 15,45	35,8046 ± 26,26	26,1202 ± 18,93	0,7536 ± 0,11	936
Post poda (253 dda)	63,5854 ± 31,46	28,9080 ± 12,28	21,9748 ± 16,78	15,2222 ± 11,69	0,7010 ± 0,25	772
General	73,4459 ± 35,51	32,8350 ± 14,61	29,0250 ± 23,35	20,7940 ± 16,84	0,7286 ± 0,19	1770

d. Análisis foliar: Los valores de nutrientes en las hojas al inicio (0 dda), pre poda (159 dda) y post poda (253 dda), se presentan en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Contenido de nitrógeno (N), Fósforo (P) y potasio (K) en porcentaje (%), al inicio (0 días), pre-poda (159 días) y al final, post-poda (253 días). Valores promedios obtenidos de análisis foliar en el laboratorio de suelos de la EEA Cerro Azul, con muestras compuestas de 6 sub- muestras, para cada tratamiento.

Días		1 (Testigo)	2 (P1+N0)	3 (N1+P0)	4 (P1+N½)	5 (N1+P½)	6 (N1+P1)
0 (inicio)		1,61					
N	150 (pre-poda)	1,06	1,24	2,21	1,71	2,11	2,14
%	240 (post-poda, final)	0,90	0,92	1,15	1,10	1,21	1,09
0 (inicio)		0,13					
P	150 (pre-poda)	0,12	0,08	0,09	0,13	0,11	0,12
%	240 (post-poda, final)	0,16	0,21	0,08	0,12	0,10	0,11
0 (inicio)		0,32					
K	150 (pre-poda)	0,42	0,40	0,42	0,35	0,37	0,37
%	240 (post-poda, final)	0,42	0,42	0,37	0,42	0,37	0,32

Se considera que la hoja es el órgano de la planta que refleja mejor el estado nutricional (Malavolta, *et al.*, 1986). Sin embargo, en Yerba Mate, los valores de P del suelo (ver **tabla 7**) en relación con los valores foliares, no muestran una tendencia clara. Los métodos analíticos de suelos intentan emular la forma en que las plantas extraen los nutrientes del suelo, esperando concentraciones similares a nivel

¹⁸ índice: Representa la relación entre el área determinada por el método de imágenes y el área determinada por largo y ancho de las hojas.

foliar, pero es muy difícil que se puedan imitar las condiciones reales de cada caso concreto y para cada especie (Garrido, 1997).

En el caso de Yerba mate, se observa valores estables a nivel de P foliar, no relacionados con los niveles de P del suelo en los distintos tratamientos. Similares resultados observó Zas (2003) en *Pinus radiata*, donde la falta de correlación significativa entre el P foliar y el P edáfico, indican que otros factores, como el exceso de N o el pH del suelo, estarían interfiriendo en la asimilación de este nutriente. En el **punto E.2** se analiza la relación de nutrientes foliares respecto al contenido de HCST.

6. Raíces.

a. Volumen. En la **Figura 36** se presenta el volumen de raíces por cada tratamiento, donde no se observaron diferencias estadísticas significativas, pero hay una tendencia del T₂ y el T₃ a presentar mayor volumen radical respecto a los demás tratamientos.

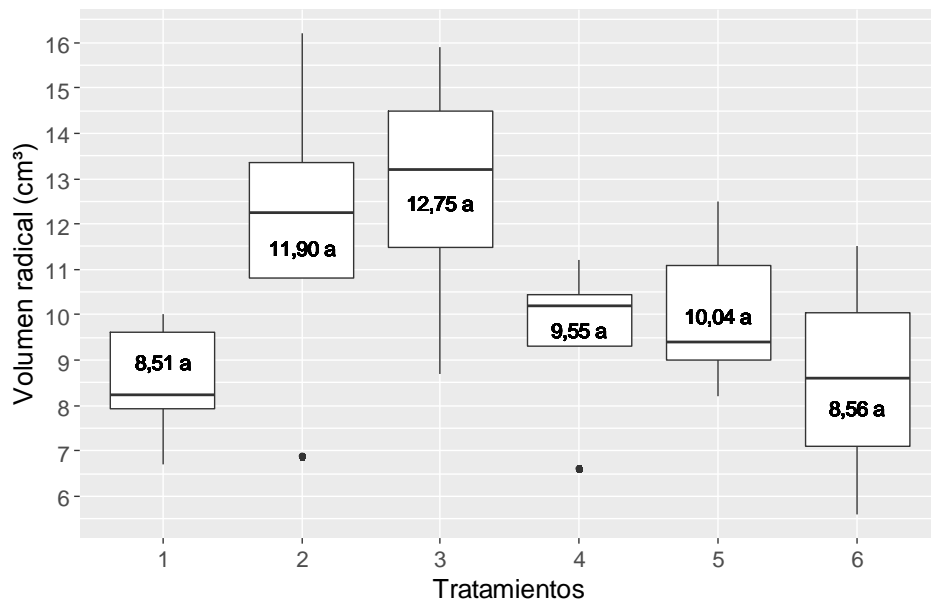


Figura 36. Volumen radical (cm³) por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuartil 0.25, cuartil 0.5 o mediana y cuartil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

El volumen total de raíces indica la exploración que ejerce la planta en el volumen de suelo. Muchos autores presentan estos valores como densidad de raíces, o peso de raíces sobre peso de suelo, pero el fin es el de conocer cómo se comporta la planta en un determinado tipo de suelo respecto a la exploración que pueda realizar. Las

plantas exploraron entre 0,28-0,42% del volumen de la maceta llegando a la base de las mismas, tal vez con leves limitaciones al final del estudio. Esta exploración en profundidad es característica de la especie con el fin de asegurar el suministro de agua a través de su raíz pivotante, en los primeros meses de vida.

b. Longitud. El largo máximo de la masa de raíces para cada planta (desde el cuello hasta el ápice radical) evidenció que, en determinadas ocasiones las plantas hubiesen explorado más volumen de suelo si las macetas hubieran tenido mayor profundidad y diámetro.

En la **Figura 37**, se presenta la longitud máxima que alcanzaron las raíces durante todo el experimento. Es conocido el efecto del fósforo que en exceso determina, al contrario que en el caso del nitrógeno, un gran desarrollo de las raíces en relación con la parte aérea, lo que determina una baja proporción parte aérea-raíz (Bonilla, 2000), estas relaciones se presentan en la **Tabla 4**.

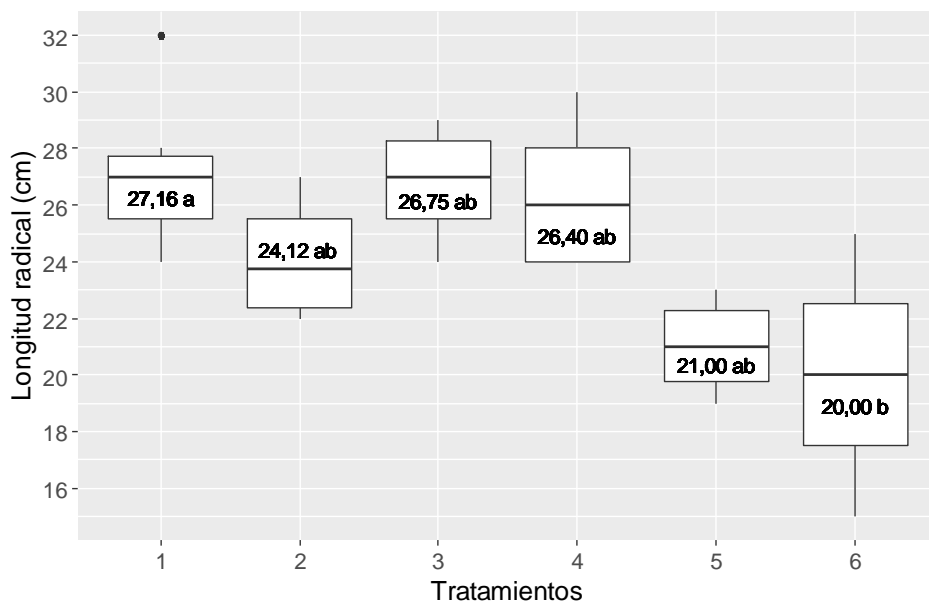


Figura 37. Longitud de la masa radical (cm) por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

El factor principal que condiciona la longitud de raíces es el agua, debido a que las plantas con agua disponible, no requieren explorar el suelo para abastecerse en cantidades suficientes, y viceversa (Taiz y Zeiger, 2006 b). En este experimento el agua se aseguró con riego por goteo, por lo cual las diferencias no se atribuyen a este factor.

Otro factor que implica la elongación de la raíz es la deficiencia de nutrientes, ya que, la planta invierte energía en la exploración del suelo, para suplir dicha falta de nutrientes, por lo cual, el T₁ (testigo) presentó la mayor longitud de raíces, con diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) respecto al T₆. Los tratamientos T₂, T₃ y T₄, presentaron longitudes similares al T₁ (Testigo), tal vez por presentar un desbalance nutricional que también propició la búsqueda de nutrientes.

Por otro lado, se observó menor longitud de raíces en el T₆, seguido por T₅, donde la disponibilidad de nutrientes fue mayor y la planta no necesitó explorar suelo en profundidad para suplir sus demandas nutricionales (**Figura 37**). Cabe recordar que la dosis de nutrientes del T₆, mostró síntomas de toxicidad (ver **Apéndice V**) que luego se revirtieron, lo cual también implicó poco desarrollo radical. Solo se observaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$), entre el T₁ (Testigo) y el T₆.

7. Peso seco.

La cuantificación del crecimiento de las plantas se basa fundamentalmente en la biomasa que producen las plantas en un tiempo y espacio determinado. Se presenta en la **Figura 38**, la producción de materia seca de las plantas de yerba mate diferenciado en hojas, tallos y raíces, según los tratamientos.

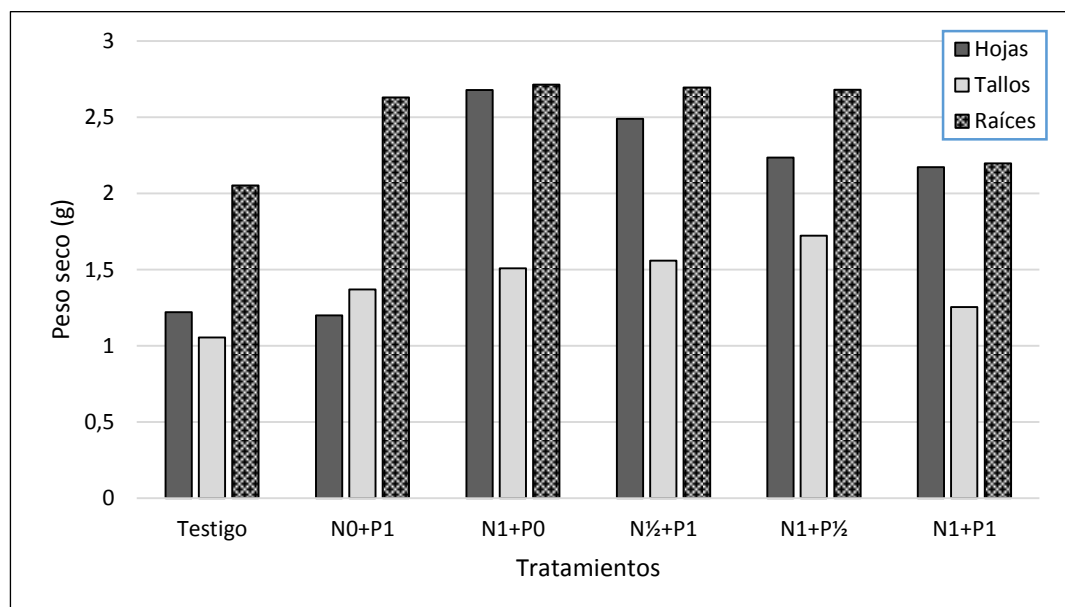


Figura 38. Peso seco (g) promedio, de hojas, tallo y raíces en los distintos tratamientos a los 253 dda (T₁: Testigo; T₂: N0+P1; T₃: N1+P0; T₄: N½+P1; T₅: N1+P½; T₆: N1+P1), luego de las podas.

Hasta los 159 dda, no se observaron diferencias estadísticas significativas en peso seco total (**Figura 39**), debido a las diferencias de crecimiento en las etapas iniciales,

aparejado con una alta variabilidad que enmascaró la diferencia de acumulación de materia seca que presentaron las plantas según los tratamientos, pero la tendencia muestra a T₂, T₃ y T₄ a acumular mayor cantidad de biomasa.

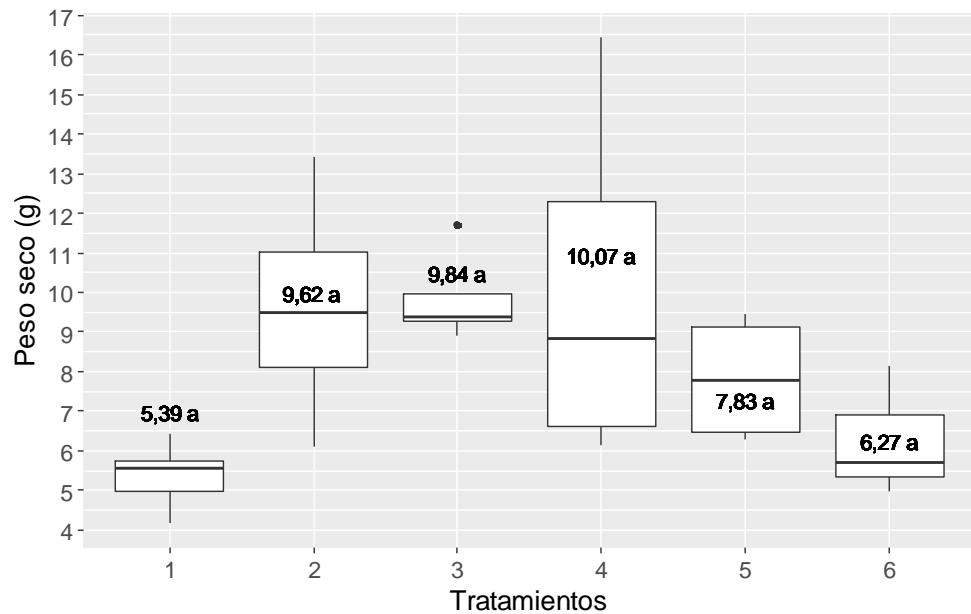


Figura 39. Peso seco (g) por planta en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

A los 253 dda, luego de las podas, se observaron diferencias estadísticas significativas (**Figura 40**), donde el T₃ presentó la mayor cantidad de biomasa seguido por el T₄, ambos diferenciados del T₁.

El total de biomasa producida se observa en la **Figura 41**, donde el T₃ y T₄ superaron significativamente ($p \leq 0.05$) al T₁ (Testigo), con valores promedios de 14,5 y 14,8 g por planta, respectivamente.

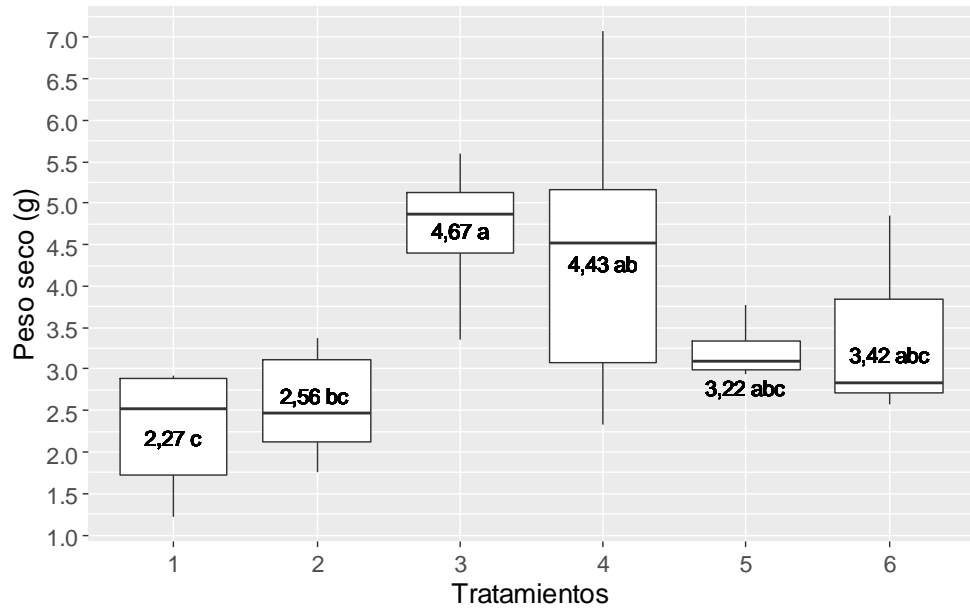


Figura 40. Peso seco (g) por planta en los distintos tratamientos luego de la poda, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales los extremos representan valores máximos y mínimos respectivamente.

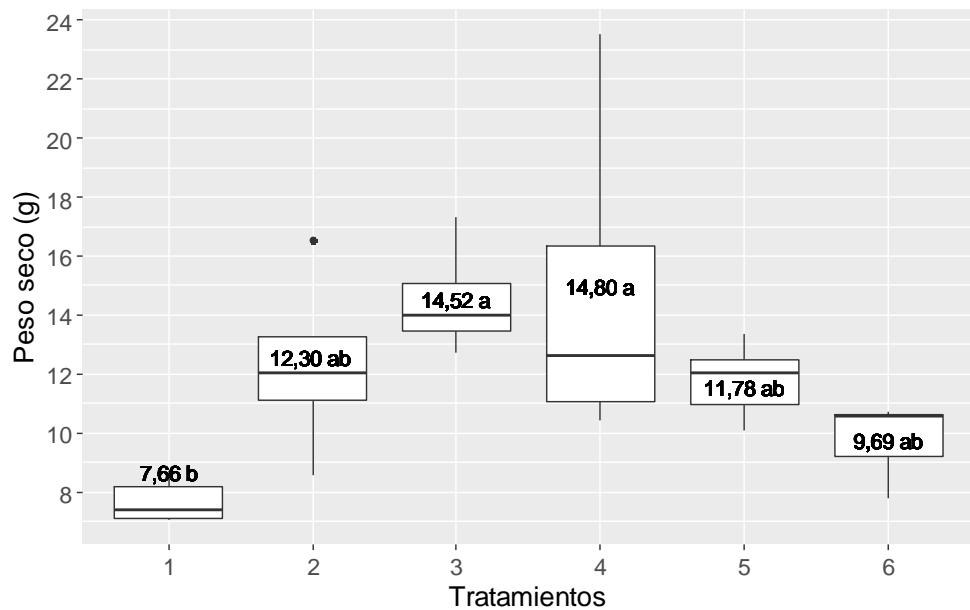


Figura 41. Peso seco (g) de la biomasa total por planta, en los distintos tratamientos durante todo el experimento. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

En la **Tabla 11** se presentan las proporciones de las partes, tallo, hojas y raíces, y la relación parte aérea/raíz, para cada tratamiento.

Tabla 11. Valores medios de distribución de biomasa en plantas de Yerba mate, para cada tratamiento. Relación entre la proporción de la parte aérea (S) con respecto a la parte subterránea (R), y proporción de hojas (LMF), tallos (SMF) y raíces (RMF) con respecto al peso total de la planta.

Tratamientos	S/R	LMF	SMF	RMF
1	3,8061	0,5782	0,2105	0,2112
2	4,5383	0,5754	0,2392	0,1852
3	4,5864	0,5786	0,2389	0,1823
4	4,5354	0,5935	0,2245	0,1819
5	4,5250	0,5539	0,2613	0,1846
6	4,5554	0,5830	0,2339	0,1830
Media	4,4244 ($\pm 0,75$)	0,5771 ($\pm 0,03$)	0,2347 ($\pm 0,03$)	0,1881 ($\pm 0,02$)

No se observaron diferencias estadísticas ($p > 0.05$) entre tratamientos, pero es apreciable una tendencia a menores valores de S/R y mayores de RMF en el T₁ (testigo), con respecto a los demás tratamientos, esto se justifica debido a que con bajo nivel de N y P aumenta la proporción de raíces, como indicativo de que la planta explora mayor volumen del suelo en búsqueda de dichos nutrientes.

Los valores promedios indican que, las plantas de Yerba mate en estas condiciones destinaron un 57,71 % de la biomasa producida a la formación de hojas, un 23,47 % a la formación de tallos y un 18,80% a la formación de raíces (**Figura 42**).

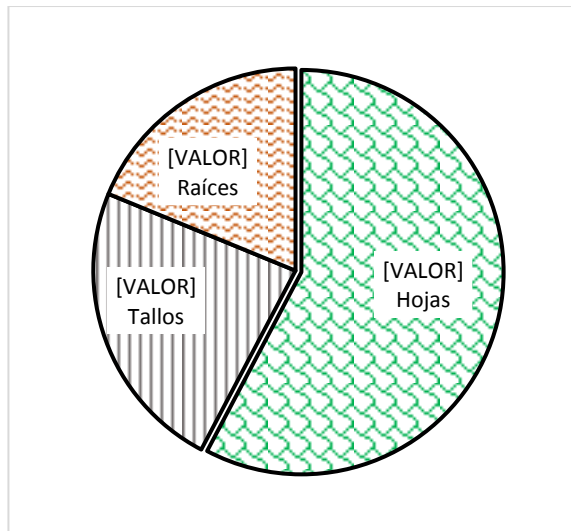


Figura 42. Diagrama de sectores, valores medios de proporciones de raíces, tallos y hojas, respecto a la biomasa total, en plantas de yerba mate con 14 meses de edad.

Es de esperar que en plantas adultas de Yerba mate esta proporción sea diferente aumentando la biomasa de raíces y disminuyendo la proporción de tallos y hojas (Villar *et al.* 2008; Di Benedetto y Tognetti, 2016;), quedando directamente relacionado a las distintas intensidades de poda y a la ontogenia del cultivo. Esto también condicionaría

la brotación posterior en plantas adultas, relacionado a mayor cantidad tejidos de reservas en tallo y raíces.

D. Análisis de crecimiento.

La medición del área foliar por hoja o por planta, el peso seco y el tiempo que la planta utiliza para formar dicha biomasa permite obtener las medidas derivadas de crecimiento: tasa de crecimiento relativo (RGR), tasa absoluta de crecimiento (AGR), tasa de asimilación neta (NAR), área foliar específica (SLA), relación de área foliar (LAR), área foliar específica (SLA), relación de peso foliar (LWR) (**Tabla 12**).

Tekalign y Hammes, (2005) reportan que estos índices permiten analizar el crecimiento de la planta a través de la acumulación de materia seca, la cual depende del tamaño del área foliar, de la tasa a la cual funcionan las hojas y el tiempo que el follaje persiste.

Tabla 12. Variables del análisis de crecimiento, tasa de crecimiento relativo (RGR), tasa absoluta de crecimiento (AGR), tasa de asimilación neta (NAR), área foliar específica (SLA), relación de peso foliar (LWR) y relación de área foliar (LAR), según tratamientos.

TRATAMIENTOS	RGR (g g ⁻¹ día ⁻¹)	AGR (g día ⁻¹)	NAR (g cm ⁻² día ⁻¹)	SLA (cm ² g ⁻¹)	LWR (g g ⁻¹)	LAR (g g ⁻¹ día ⁻¹)
1	0,0125	45,7200	0,1148	0,1316	0,5783	0,0474
2	0,0141	66,8505	0,1355	0,1296	0,5755	0,0448
3	0,0143	72,5907	0,1260	0,1354	0,5787	0,0503
4	0,0141	71,0917	0,1301	0,1326	0,5935	0,0477
5	0,0144	68,8897	0,1332	0,1315	0,5539	0,0465
6	0,0135	56,6305	0,1135	0,1370	0,5830	0,0520
TOTAL	0,0138	63,7472	0,1261	0,1326	0,5773	0,0478

Nota: No se observaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) entre tratamientos.

Algunas plantas herbáceas producen en un día una cantidad de biomasa equivalente a casi la mitad de su peso total (ej., 400 mg g⁻¹ día⁻¹ en *Arabidopsis thaliana*). En el otro extremo, las especies leñosas suelen presentar valores mucho más bajos (ej., 10 mg g⁻¹ día⁻¹). La capacidad de producción de fotoasimilados a través de la fotosíntesis y su distribución dentro de la planta dependen de la capacidad de fijación del dióxido de carbono y su partición entre los distintos órganos de la planta (Di Benedetto y Tognetti, 2016). Para dar una idea aproximada de esta variabilidad, se pueden citar los intervalos de valores de RGR encontrados en plantas herbáceas (100 - 400 mg g⁻¹ día⁻¹), lianas (promedio de 150 mg g⁻¹ día⁻¹), árboles caducifolios (50 - 200 mg g⁻¹ día⁻¹) y perennifolios (10 - 130 mg g⁻¹ día⁻¹); (Reich et al., 1992; Villar, 2008). En

el caso de la yerba mate se obtuvieron valores entre 12,5 - 14,4 mg g⁻¹ día⁻¹ (**Tabla 12**), acorde a especies arbóreas.

Analizando la eficiencia de uso de la radiación solar en *Ilex paraguariensis* (St. Hil.), Caron *et al.* (2014 b) concluyen que la acumulación en biomasa total, biomasa de hojas y biomasa de las ramas, presentó una relación significativa con la edad, demuestran que el crecimiento depende del saldo de biomasa acumulada, lo que a su vez es una función de la cantidad de radiación fotosintética interceptada acumulada, cuando las cantidades de agua y nutrientes no son factores limitantes. Entonces, a medida que se acumula la radiación fotosintética a lo largo del ciclo de cultivo es de esperar que la producción siga la misma tendencia. En este estudio, a pesar de no detectarse diferencias estadísticas significativas, observamos que los nutrientes, N y P, afectan la tasa de asimilación neta y en consecuencia la tasa de crecimiento, generando variaciones en el crecimiento cuando la radiación fotosintética se mantiene constante. El área foliar tiene un papel importante aportando a la biomasa total de la planta y su incremento en el tiempo puede ser calculado a través de la tasa de expansión foliar relativa RLAE (cm² cm⁻² día⁻¹), por sus iniciales en inglés “relative rate of leaf area expansión”, que permite conocer el crecimiento sin ser una medida destructiva (Di Benedetto y Tognetti, 2016). Para yerba mate se observó 0,0113 cm² cm⁻² día⁻¹ para este estudio, desde el inicio al final del experimento, sin diferencias estadísticas (p>0.05) entre tratamientos. La relación entre crecimiento y área foliar se observa bien en especies con menor longevidad foliar (caducifolias) que suelen presentar unas tasas altas de fotosíntesis, una concentración alta de nitrógeno en hoja y un área específica foliar elevada, en consecuencia, las especies caducifolias suelen crecer más rápidamente que las perennifolias, como la Yerba mate. (Reich *et al.* 1992; Villar *et al.*, 2008).

Otra medida, es la tasa de aparición de hojas (RLA) y filocrono, que se calcularon en base a la pendiente de la regresión lineal desde el inicio al final del experimento y su inversa, respectivamente, para todos los tratamientos. La tasa de aparición de hojas (RLA) fue mayor en T₃ seguido por los T₆ y T₄ (**Tabla 13**). Estas diferencias pueden comprenderse por el comportamiento de los primordios foliares y su desarrollo.

Algunos primordios foliares se detectan normalmente cerca del ápice del tallo del embrión en la semilla, pero en la mayoría de los casos, en especial en especies perennes, se forman después de la germinación. El crecimiento de primavera implica

la expansión de los primordios foliares que se formaron durante la estación anterior, así como la extensión de los entrenudos entre estos, como lo describen Salisbury y Ross (1994). Se estima que luego del primer ritmo de crecimiento de primavera, para fines de verano se forman los nuevos primordios, es decir, en el segundo ritmo de brotación de la Yerba mate. Algunos de los nuevos primordios se desarrollarán y otros formarán yemas latentes, en condiciones de sequías, falta de nutrientes o simplemente por respuesta a otros factores ambientales, como las que se forman en el último ritmo de brotación de otoño para pasar el invierno.

Considerando las diferencias en la RLA y filocrono del T₁ (Testigo) con respecto a los demás tratamientos, se puede inferir que, debido al tipo de crecimiento de la Yerba mate, las condiciones nutricionales pueden modificar la aparición de hojas y su desarrollo o latencia.

Tabla 13. Tasa de aparición de hojas (RLA, “rate of leaf appearance”) y filocrono para los distintos tratamientos.

Tratamientos	Regresión lineal	R ²	RLA (hojas día ⁻¹)	Filocrono (día hoja ⁻¹)
1	y = 0,1425x + 8,1238	0,736	0,1425	7,01
2	y = 0,1838x + 6,8857	0,915	0,1838	5,44
3	y = 0,2781x + 4,0571	0,887	0,2781	3,59
4	y = 0,2290x + 5,5286	0,666	0,2290	4,36
5	y = 0,2171x + 5,8857	0,944	0,2171	4,60
6	y = 0,2457x + 5,0286	0,975	0,2457	4,07
General	y = 0,2121x + 6,0381	0,5023	0,2121	4,71

Desde otra perspectiva, es posible desdoblar la tasa de crecimiento relativo (RGR, g g⁻¹ día⁻¹, por sus iniciales en inglés, “Relative growth rate”) como el producto entre tasa de asimilación neta (NAR, g cm⁻² día⁻¹, por sus siglas en inglés, “Net assimilation rate”) o también “componente fisiológico” y la relación de área foliar (LAR, cm² g⁻¹, por sus siglas en inglés, “Leaf area ratio”) o también “componente morfológico” (Johnson *et al.*, 2003; Osone *et al.*, 2008, Hunt, *et al.*, 2002).

Dada la relación:

$$\boxed{\text{RGR} = \text{NAR} \times \text{LAR}}$$

podemos inferir que los tratamientos incidieron en mayor medida en NAR, o componente fisiológico afectando la tasa de crecimiento de las plantas de yerba mate

(Figura 43) y el efecto en el componente morfológico (LAR) fue mínimo o sin tendencia clara (Figura 44).

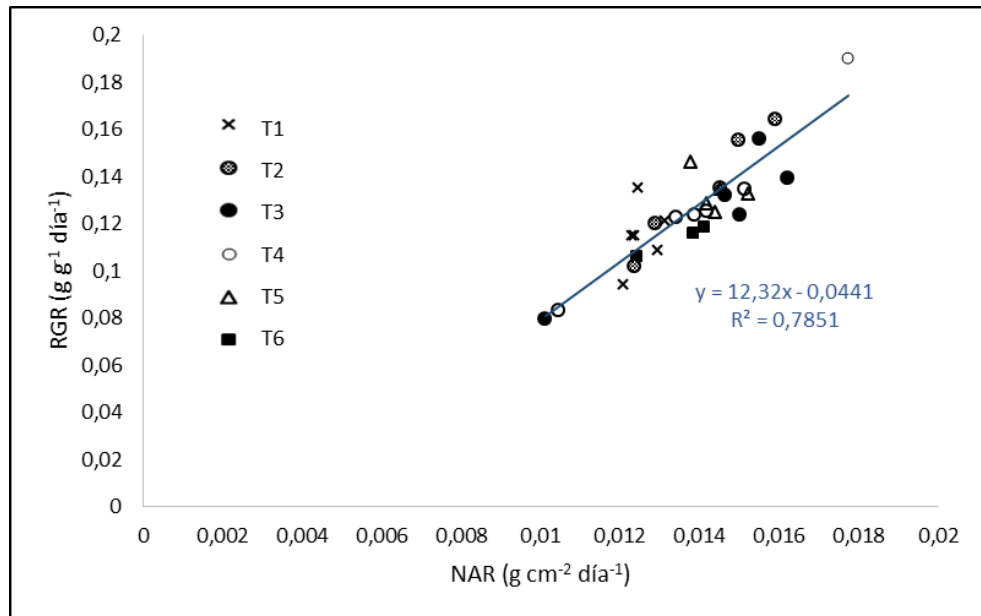


Figura 43. Relación entre RGR, tasa de crecimiento relativo (por sus siglas en inglés, “Relative growth rate” en $\text{g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$) y NAR, tasa de asimilación neta (por sus siglas en inglés, “Net assimilation rate” en $\text{g cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) indicando cada tratamiento.

NAR es el resultado del balance neto entre las ganancias generadas a través de la fotosíntesis neta y las pérdidas o consumos relacionados con la respiración de hojas, tallos y raíces (Poorter, 1989). Dado que en el estudio se utilizó el híbrido INTA 538 y las condiciones de luminosidad, temperatura y riego fueron similares, se puede atribuir el cambio en la tasa de crecimiento relativo exclusivamente a las condiciones nutricionales.

No ocurre lo mismo con LAR, componente morfológico, que es el producto entre el área foliar específica ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$) y la relación de peso foliar (g g^{-1}) (Broadley *et al.*, 2000; Poorter *et al.*, 2009), que representa el área foliar, su espesor, forma y distribución para la captura de luz. La relación entre RGR y LAR para yerba mate no presenta tendencias claras, a pesar que se observaron diferencias estadísticas significativas en el área foliar para los distintos tratamientos (**ver punto C.5.b**). Datos similares reportaron Di Benedetto y Tognetti, (2016) en *Impatiens walleriana* y *Spinacea oleracea*, donde los incrementos en RGR, en respuesta a tratamientos hormonales, se encontraron básicamente asociados con aumentos en NAR, mientras que LAR, es una variable que reduce el valor de RGR.

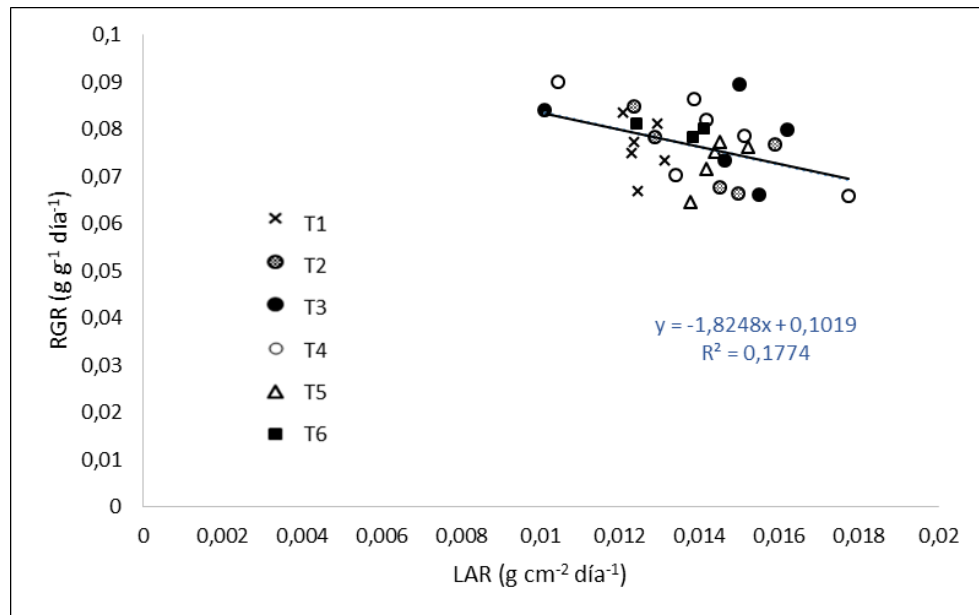


Figura 44. Relación entre RGR, tasa de crecimiento relativo (por sus siglas en inglés, “Relative growth rate” en $\text{g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$) y LAR, relación de área foliar (por sus siglas en inglés, “Leaf area ratio” en $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$) indicando cada tratamiento.

El ambiente y las condiciones de manejos pueden tener un elevado impacto sobre RGR y la contribución relativa de sus componentes (LAR, NAR, LWR, SLA), puede variar mucho según cual sea el factor ambiental considerado. En este caso, para Yerba mate manteniendo constante todos los factores ambientales y variando el suministro de nutrientes los cambios en RGR, pasan principalmente por NAR. Es de esperarse que esté relacionado directa o indirectamente al N, como mencionan Osone *et al.*, (2008), ya que NAR se puede desdoblar en dos componentes, la productividad del nitrógeno foliar, (LNP, $\text{g g}^{-1} \text{ N día}^{-1}$, por sus iniciales en inglés “leaf nitrogen productivity”) y la concentración de nitrógeno por unidad de área foliar (LNC_a , gN cm^{-2} , por sus iniciales en inglés “leaf area-based nitrogen concentración”).

La Yerba mate por su ocurrencia natural en suelos ácidos y con baja fertilidad natural, como se mencionó anteriormente, llevó a la especie a ser considerada de baja exigencia nutricional, principalmente en relación al fósforo, aunque poco se conozca también sobre la exigencia de N y K. Frente a esto, Santín *et al.* (2013) evaluaron el crecimiento, el contenido de nutrientes en el suelo, en plantas jóvenes de yerba mate sometidas a dosis de P combinadas con NK. El crecimiento de la yerba mate fue afectado por la interacción entre P y NK, demostrando mejor crecimiento cuando el contenido de P en el suelo estaba entre $18,5$ a $28,6 \text{ mg dm}^{-3}$ combinado con 100 mg dm^{-3} de N y K_2O . En las dosis superiores a 400 mg dm^{-3} de P_2O_5 , presentaron clorosis

internerval, síntoma típico de deficiencia de Fe. El orden decreciente de los macronutrientes más exigidos y que más contribuyeron para el crecimiento de la yerba mate es P, N, K, Mg y Ca. La yerba mate crece bien en suelos con altos niveles de P, pero depende de la buena disponibilidad de N, K y Ca. Tal es el caso, de la relación de N y P de este trabajo.

También Ceconi *et al.* (2007) utilizando diferentes dosis de P, evaluaron la altura de la parte aérea, diámetro del cuello, biomasa sobre el suelo, biomasa radicular y biomasa total en mudas de *Ilex paraguariensis*. Verificaron que las dosis de máxima eficiencia técnica y crecimiento de las mudas de se ha producido con las dosis 360 - 450 mg Kg⁻¹ de P.

En varios estudios se ha demostrado que, el crecimiento estaba correlacionado positivamente con la tasa de fotosíntesis (Pereira 1995) o con una estima del balance de carbono diario (Quero *et al.* 2008), por lo cual, con base en los antecedentes y en los resultados de este trabajo, el T₄ se posiciona en general como uno de los mejores, bien podría considerarse para este cultivo la relación N/P, ya que se observa la importancia de esta relación en la respuesta luego de las podas en parámetros relacionados al crecimiento y también en la acumulación de hidratos de carbonos solubles totales (ver **punto E**).

E. Hidratos de carbono solubles totales (HCST).

Los HCST representan glúcidos que forman parte del material básico del metabolismo. En las plantas los monosacáridos están representados principalmente por pentosas y hexosas, siendo los demás (triosas, tetrasas y heptosas) importantes casi exclusivamente como productos intermedios, transitorios, en la fotosíntesis y en la respiración (Müller, 1964). Estos compuestos buenos indicadores de los niveles de reservas de las plantas en un momento determinado.

Tabla 14. Contenido de hidratos de carbono solubles totales, al inicio (0 días), pre-poda (159 días) al final, post-poda (253 días), letras diferentes en filas representan diferencias estadísticas significativas según Tukey, $p \leq 0.05$.

Días	1 (Testigo)	2 (P1+N0)	3 (N1+P0)	4 (P1+N½)	5 (N1+P½)	6 (N1+P1)
0 (inicio)	19,66	19,66	19,66	19,66	19,66	19,66
159 (pre-poda)	19,13 a	30,22 a	27,72 a	35,07 a	31,23 a	33,27 a
253 (post-poda, final)	42,94 a	55,73 a	42,34 a	47,54 a	21,08 a	27,76 a

1. Variación de HCST con la poda.

La medición de carbohidratos solubles totales (HCST) tomado de muestras de tallo, al inicio (0 dda), 159 dda (previo a la poda) y 253 dda (posterior a la poda) se pueden observar en el **Tabla 14**.

Al inicio del ensayo las plantas presentaron una concentración de $19,66 (\pm 3,71)$ mg HCST g^{-1} peso seco en tallo, esta concentración prácticamente se mantuvo constante hasta los 159 dda en el T₁ (testigo) (**Figura 45**), el cual no tuvo tampoco diferencias en las variables evaluadas anteriormente. En todos los tratamientos hubo un aumento considerable en los HCST, estimulado por la disponibilidad de los nutrientes de cada tratamiento, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas (Tukey, $p > 0.05$), debido a la alta variabilidad observada en las mediciones.

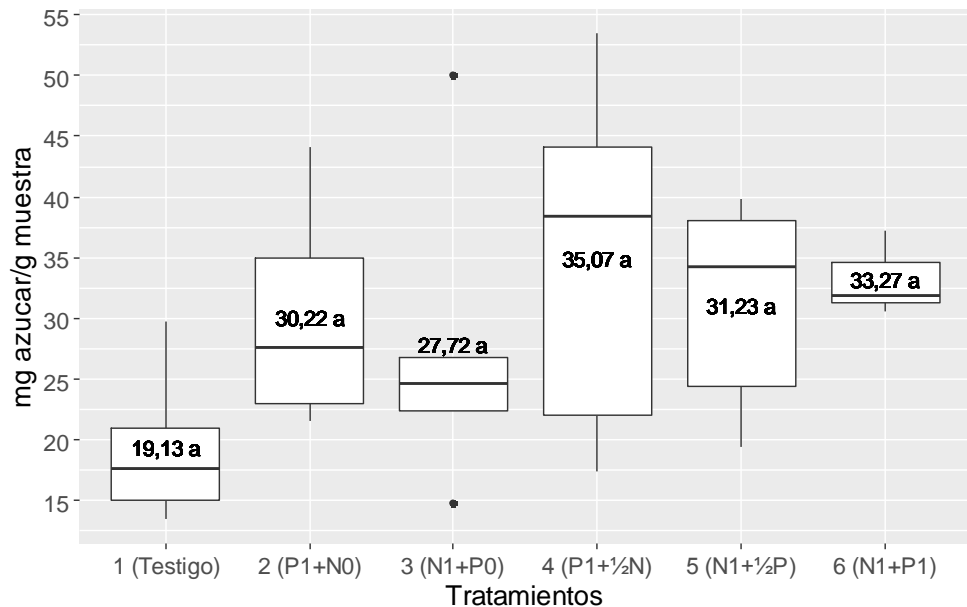


Figura 45. Hidratos de carbono solubles totales en tallo, expresado en miligramos por gramo de muestra seca, promedio total por planta en los distintos tratamientos, a los 159 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

El mayor contenido de HCST, se observa en T₄ (P1+1/2N), T₅ (N1+1/2P) y T₆ (N1+P), pero sin diferencias estadísticas significativas (**Figura 45**), aparentemente las dosis de fósforo y nitrógeno combinadas juegan un papel importante en la acumulación y destino de HCST.

A los 253 dda (**Figura 46**) T₅ y T₆, con mayores cantidades de N y P, mostraron menores concentraciones de azúcares solubles en tallo, pero sin diferencias

estadísticas significativas (Tukey, $p > 0.05$). Esto podría explicarse, considerando que la mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo permite un mayor crecimiento, demandando una mayor proporción del carbono asimilado para crecimiento, en detrimento del stock en reservas carbonadas. Sun *et al.* (2002) observaron un aumento de azúcares solubles cuando el N era limitado, regulando la actividad de la Rubisco para favorecer una reducción del crecimiento. En este estudio, puede observarse este efecto de acumulación de reservas previo a la poda (**Figura 45**) y la utilización de dichas reservas carbonadas luego de las podas (**Figura 46**), para una posterior brotación.

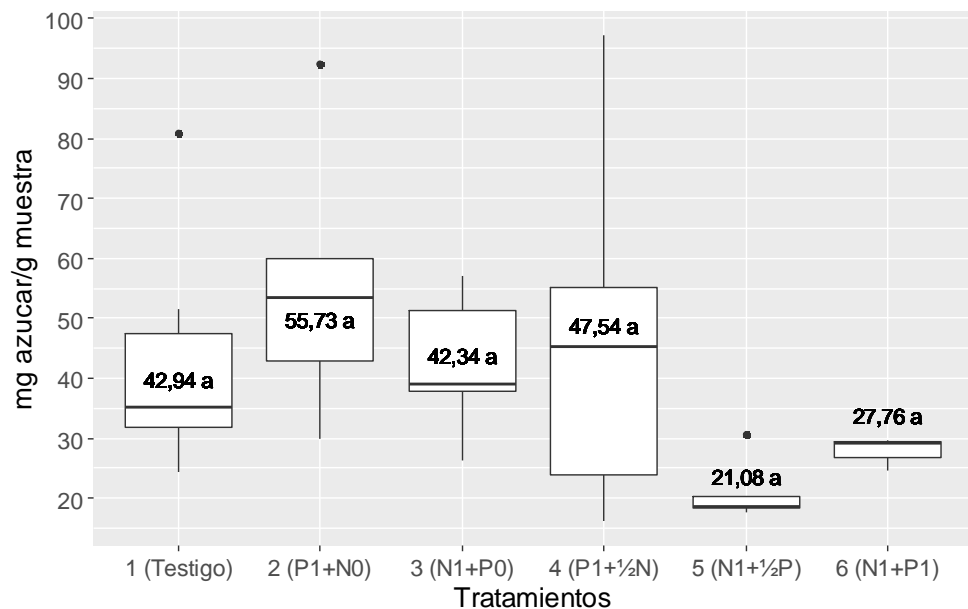


Figura 46. Diagrama de cajas, hidratos de carbono solubles totales en tallo, expresado en miligramos por gramo de muestra seca, promedio total por planta en los distintos tratamientos, a los 253 dda. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$). En cada caja se observa, número y letra para la media; en líneas horizontales cuantil 0.25, cuantil 0.5 o mediana y cuantil 0.75; en líneas verticales en los extremos representan valores máximos y mínimos, respectivamente y los puntos, valores extremos.

Las diferencias antes y después de las podas se representan en la **Figura 47**, donde se observa la variación en el contenido de HCST (con diferencias estadísticas según Tukey ($p \leq 0.05$) entre el T_1 y los tratamientos T_5 y T_6), evidenciando la utilización de reservas para la brotación en los tratamientos que suplen las demandas nutricionales (T_5 y T_6), permitiendo a las plantas renovar la estructura perdida. Por otro lado, los tratamientos con bajo nivel de nutrientes (T_1) o con desbalances entre N y P (T_2 y T_3), presentan valores más negativos que evidencian el poco uso de las reservas

por condicionantes nutricionales, incluso aumentando el contenido de HCST después de las podas y sin poder utilizarlas para la regeneración de las estructuras. El T_4 se aproxima a la dosis en donde las reservas se utilizarían casi en su totalidad luego de la poda para regenerar estructuras, debido a una diferencia antes y después muy cercana a 0, destinando una parte al mantenimiento.

El tronco y las ramas tienen un volumen grande de tejidos con capacidad para almacenar sustancias de reserva procedentes de la sabia elaborada, las cuales serán necesarias para iniciar el crecimiento de la planta después del reposo invernal, hasta que el balance fotosintético sea positivo, en cuyo momento comienza de nuevo el almacenamiento que alcanzará su máximo con la entrada en reposo.

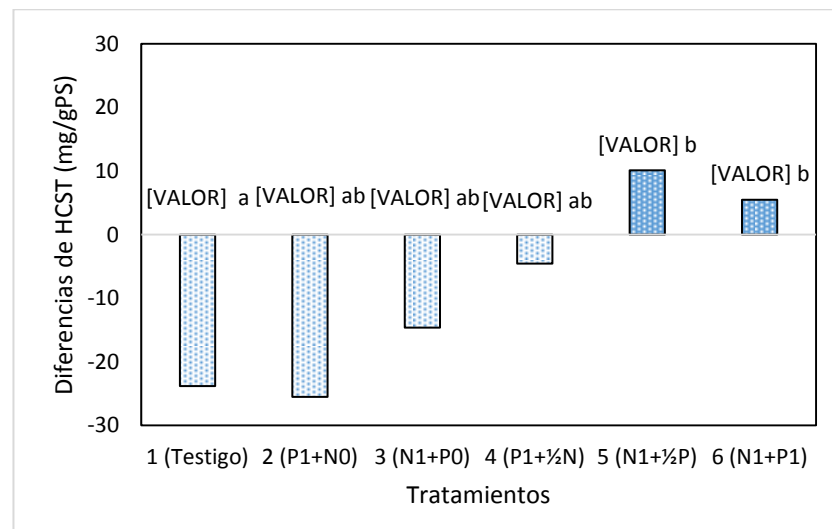


Figura 47. Diferencia entre el contenido de hidratos de carbono solubles totales en tallo (HCST) antes y después de la poda, expresado en miligramos por gramo de muestra seca, valores promedio total para cada tratamiento. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Las reservas actúan también como reguladores de la alimentación de los diferentes órganos, por eso, algunas deficiencias nutritivas tardan más en manifestarse al ir consumiendo la planta sus reservas. La forma más frecuente de acumulación es el almidón, aunque las sustancias almacenadas son muy variadas y cambian a lo largo del año según las necesidades de la planta.

Este análisis permite inferir que no solo es importante el nivel de nutrientes en suelo sino también el nivel de nutrientes en planta y como se encuentra el estado de reservas al momento de realizar las intervenciones de poda. En *Morus alba*, Boschini (2001) comparte la opinión de otros autores, indicando que la disminución de

carbohidratos depende de la estación del año y que la recuperación de la planta depende de la magnitud de la poda durante la cosecha.

Taiz y zeiger (2006 b), mencionan que el ápice recibe una gran cantidad de hormonas y otros factores del resto de la planta, además de carbohidratos y otros nutrientes que regulan su desarrollo, mencionando a la sacarosa como el compuesto que podría participar en la transición del ápice del estado juvenil al adulto.

Para la determinación de reservas, Smith y Silva (1970) concluyen que es más relevante analizar los carbohidratos no estructurales totales (CNET) en conjunto que las fracciones individuales, puesto que tienen funciones similares y la cantidad de CNET es una estimación de la energía rápidamente disponible para el metabolismo y/o translocación a otras partes de la planta.

La tendencia del contenido de hidratos de carbono en Yerba mate fue de disminuir con el mayor contenido de nutrientes, un comportamiento similar a los reportados por Sanz Pérez *et al.* (2005), quienes analizaron las concentración de almidón en raíz y tallo de *Quercus ilex* y *Q. coccifera* y obtuvieron que fue inversamente proporcional al nivel de fertilización. Por otro lado, la concentración de glucosa foliar mostró mayores concentraciones en las plántulas que experimentaron déficit hídrico. La especie que más carbohidratos almacenó fue *Q. faginea*. Dicho estudio sugiere, que el efecto de un incremento de aridez sobre el almacenamiento de carbohidratos depende, no sólo de la especie, sino también de la fertilidad del suelo sobre el que se asiente.

2. Relación de HCST con N y P.

En general, el estado nutricional de una planta se refleja mejor por el contenido de los elementos de las hojas que por el de otros órganos (Gárate y Bonilla, 2000). Analizando la relación de nutrientes, a nivel foliar (ver **Tabla 10**), se obtuvo una relación promedio nitrógeno-fósforo-potasio (N-P-K) de 16-1-3,5 antes y 8-1-3 después de la poda. Estos valores indican mayor porcentaje de nitrógeno en hoja en comparación a los demás nutrientes, concuerdan con los estudios de Sosa (1992, 1994) donde los análisis foliares indican una relación NPK: 15,3-1-13,9, y 15,3-1-12 respectivamente, pero difiere de estas referencias en el porcentaje de cada nutriente, sobre todo en potasio.

Recientemente, Santín *et al.* (2013) estudiando el efecto de dosis crecientes de P en plantas jóvenes de Yerba Mate, llegó a la conclusión que la dosis ideal se encuentra entre 18,5-28,6 mg/dm³ de P por cada 100 mg/dm³ de N y K, de lo cual

surge una relación N/P entre 3,49 y 5,40, es decir una relación aproximada de NPK: 5-1-5. Es de esperar que los valores difieran debido al estado particular de la planta en el momento del muestreo, que dependen del tipo de suelo y condiciones ambientales, entre otros factores.

Tanto el N como el P, son constituyentes fundamentales de los vegetales, por lo cual Wright *et al.* (2004), hacen referencia a la importancia del nitrógeno y fósforo foliar, junto a la relación de peso foliar (LMA), la tasa de asimilación fotosintética, la tasa de respiración y la vida útil de la hoja, como factores determinantes de rasgos foliares para caracterizar especies agrupadas por formas de crecimiento, biomas o grupos funcionales de las plantas a nivel mundial. En el caso de la Yerba mate esta caracterización por fósforo o nitrógeno no se observa, debido al rol que tienen estos nutrientes en las reservas de HCST, que van de la mano con las podas y la translocación desde hojas más viejas hacia la regeneración de las estructuras perdidas. Por lo tanto, los análisis foliares en Yerba mate pueden representar condiciones nutricionales puntuales de acuerdo al momento de muestreo y el manejo de las podas.

El aumento de nitrógeno incide de manera decreciente en los niveles de HCST (**Figura 48**), en cambio el aumento de fósforo implica aumentos en la concentración de HCST (**Figura 49**).

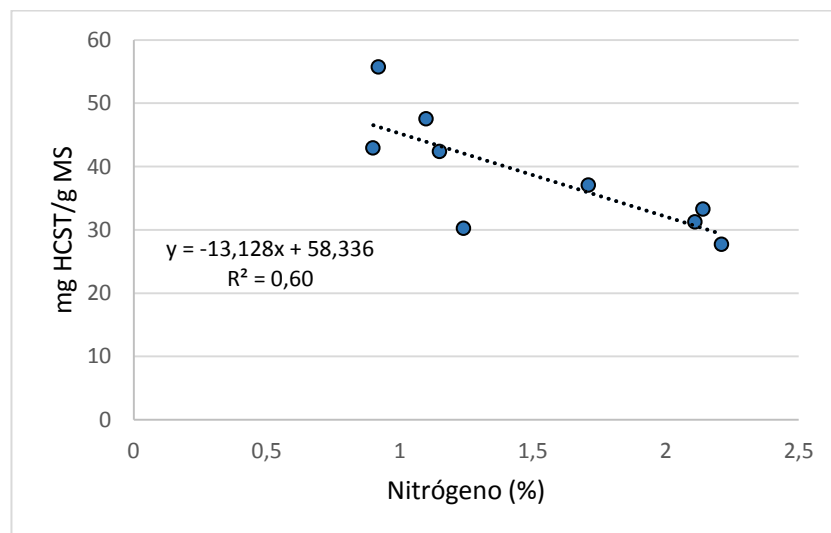


Figura 48. Relación entre hidratos de carbono solubles totales en tallo (HCST), expresado en mg g^{-1} de muestra seca y N foliar (%), valores de media por planta incluyendo tratamientos y fechas (159 dda y 253 dda), quedan exceptuados valores extremos.

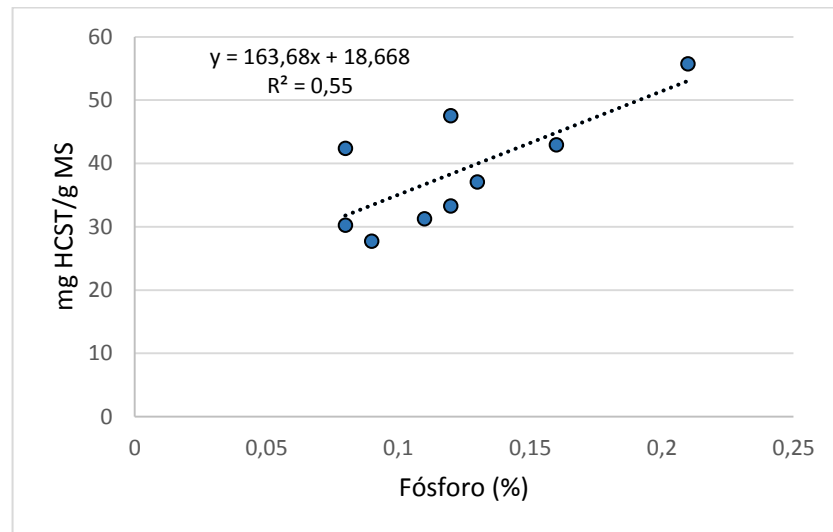


Figura 49. Relación entre hidratos de carbono solubles totales en tallo (HCST), expresado en mg g^{-1} de muestra seca y P foliar (%), valores de media por planta incluyendo tratamientos y fechas (159 dda y 253 dda), quedan exceptuados valores extremos.

La relación N/P representa mejor la relación con el contenido de HCST ($R^2:0,79$), es decir, que no debe contemplarse la incidencia de los nutrientes de manera aislada respecto al balance de reservas disponibles en tallo (**Figura 50**). Los nutrientes no funcionan aisladamente y Stewart (2007) destaca que es importante la interacción entre nutrientes ya que la deficiencia de uno limita la absorción y uso de otro. Según el IPNI (International Plant Nutrition Institute, 2018), numerosos estudios han demostrado la importancia del balance de nutrientes. Gárate y Bonilla (2006), mencionan como ejemplo para el índice N/P para la hoja bandera de maíz un valor medio de 10,13, pero es de 8,91 en Sudáfrica y de 11,13 en el sudoeste de Estados Unidos, indicando un parámetro útil para comparar diferentes lugares, en este estudio oscilaron entre 4,4 y 24,5 para Yerba mate. También Bonilla (2000), menciona la interrelación P y N, observada en varios cultivos, reflejada por los niveles de N expresado como amonio en savia, determinando que existe una acumulación de amonio en el estado deficiente de P que retrasa la maduración y la riqueza de sacarosa.

En cultivos leñosos, el nivel de N orgánico en savia corresponde a N protéico y de aminoácidos que, junto a los azúcares tanto reductores como totales, nos informa de las reservas del cultivo, por lo tanto disponer de valores de referencia de N y P foliar o niveles de azúcares solubles en tallo permite indicar a modo de referencia el estado nutricional a nivel de reservas en un momento determinado (Salisbury y Ross, 1994; Bonilla, 2000).

Desde el punto de vista fisiológico, las reservas de HCST requeridas para el rebrote disminuyen luego de las podas y se acrecienta si las podas son muy frecuentes.

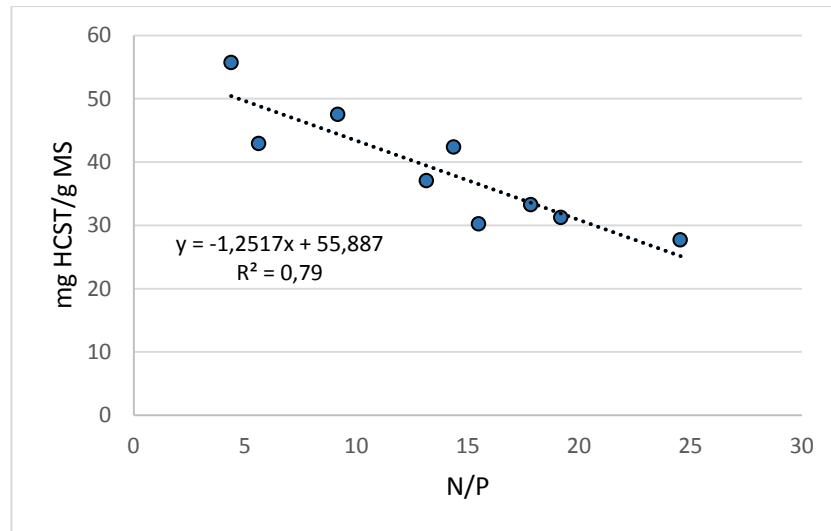


Figura 50. Relación entre hidratos de carbono solubles totales en tallo (HCST), expresado en mg g^{-1} de muestra seca y N/P foliar, valores promedio por planta incluyendo tratamientos y fechas (159 dda y 253 dda), quedan exceptuados valores extremos.

La asimilación del nitrógeno por las plantas, es decir, la conversión de nitrógeno inorgánico (nitrato o amonio) en nitrógeno orgánico (glutamato, glutamina o asparragina) es un proceso que requiere poder reductor, ATP y esqueletos carbonados, estos últimos provenientes de reducción del CO_2 a través de la fotosíntesis o por la glicólisis y respiración. Es un proceso íntimamente conectado al metabolismo del carbono debido que en ausencia de fotosíntesis, el almidón o la sacarosa, pueden suministrar el carbono. La absorción y posterior reducción del nitrato por las plantas, como también el flujo de carbono orgánico generado en la fotosíntesis hacia la formación de azúcares o aminoácidos, se modula a través de enzimas claves en estas rutas metabólicas, nitrito reductasa (NiR) y nitrato reductasa (NR), en respuesta a la luz, disponibilidad de carbono y nitrógeno. El nitrato es la principal señal que controla la síntesis de las enzimas, ambas inducibles por nitrato. La acumulación de metabolitos nitrogenados, como la glutamina o el glutamato, que son productos finales de la ruta asimiladora del nitrógeno, reprime la síntesis de NR y NiR. La adición de azúcares (glucosa, fructosa o sacarosa) a hojas en oscuridad aumenta la actividad de las enzimas, al igual que el efecto de la luz. Así pues, la inducción de la transcripción de los genes de ambas enzimas parece estar regulada por el balance interno entre azúcares solubles y aminoácidos, lo que constituye una prueba de que el

metabolismo del nitrógeno y el del carbono están coordinados y regulados entre sí (Maldonado, 2000; Maldonado *et al.*, 2013).

La biosíntesis de aminoácidos es un importante punto de confluencia entre el metabolismo del carbono y del nitrógeno. Las rutas del nitrógeno y el carbono consumen la mayor parte de los recursos energéticos y de carbono en organismos fotosintéticos. Ambas rutas están interconectadas y fuertemente reguladas a través de diferentes sistemas, como efectores alostéricos, fosforilación y reacciones redox. Bajo condiciones limitantes de nitrógeno, los compuestos de almacenamiento de carbono se acumulan, y la eficiencia fotosintética puede reducirse (García-Fernandez *et al.*, 1997).

Esta ampliamente demostrado por diferentes autores (Tognetti *et al.*, 2013; Rameau *et al.*, 2014; Mason *et al.*, 2014; Van Den Ende, 2014; Buskila *et al.*, 2016), la importancia de la relación N/P, su incidencia en diferentes rutas metabólicas y el efecto que generan en las plantas como promotores de hormonas, corroborando además, una importante actuación de estos nutrientes al nivel de reservas, que son trascendentales para el cultivo de yerba mate por los diferentes tipos de poda y distintas épocas en que se realizan.

3. Relación de HCST con la brotación.

Analizando los HCST antes de la poda (159 dda) y posterior a la misma (253 dda), con la Brotación, se observó una correlación entre variables de r^2 0,88 y r^2 0,57 (r Pearson), respectivamente. Se puede observar en la **Figura 51 y 52** dicha relación.

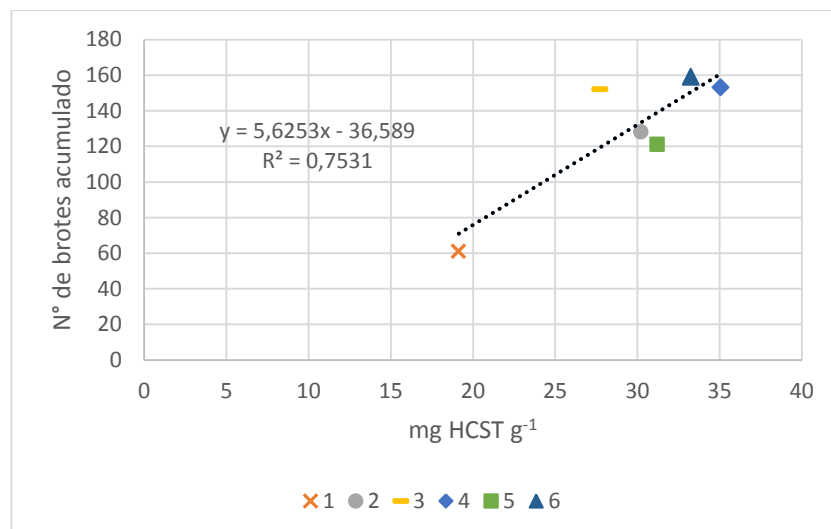


Figura 51. Relación entre número de brotes acumulados hasta antes de la poda (159 dda) y el contenido de HCST (mg g⁻¹ de MS), valores promedio para cada tratamiento y variable.

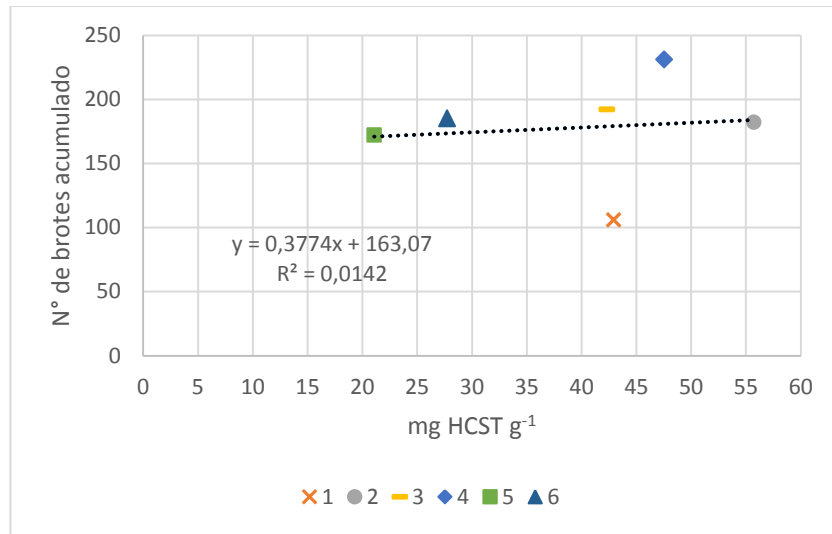


Figura 52. Relación entre número de brotes acumulados después de la poda (253 dda) y el contenido de HCST (mg g⁻¹ de MS). Valores promedio para cada tratamiento y variable.

La relación es directa y mejor representada por el contenido de HCST previo a la poda y la brotación que se produce posteriormente (**Figura 53**).

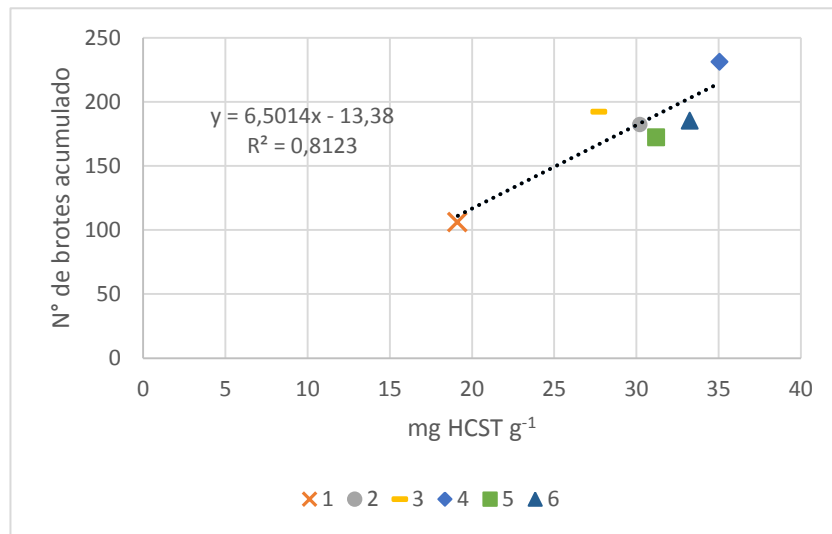


Figura 53. Relación entre número de brotes acumulados después de la poda (253 dda) y contenido de HCST (mg g⁻¹ de MS) previo a la poda (159 dda). Valores promedio para cada tratamiento y variable.

Los datos de este trabajo indican que las reservas que la planta de yerba mate acumula previo a la poda, determinan la posterior brotación. Como mencionan algunos autores (Ward y Blaser, 1961; Vickey, 1981), la planta necesita de reservas rápidamente disponibles como los HCST, para reponerse de las podas y en segundo lugar, del área foliar, como estructura fotosintética. Otros autores, Sanz Pérez *et al.*

(2005) en *Quercus sp.*, Cetina-Alcalá *et al.* (2001) en *Pinus gregii*, Boschini (2001) en *Morus alba*, también confirman la importancia de las reservas carbonadas en los cultivos arbóreos.

F. Respuestas esperadas en plantas adultas.

Si pensamos en transpolar los resultados obtenidos en este estudio a plantas adultas en producción, debemos considerar varios factores, como el manejo de la planta, la nutrición, la competencia por recursos con malezas, las fertilizaciones y los factores climáticos, entre otros, que condicionan las reservas que las plantas utilizan para su ciclo de crecimiento.

El manejo de la planta es fundamental para lograr una arquitectura adecuada, con muchos puntos de crecimiento y bien distribuidos. Conociendo el crecimiento rítmico de la Yerba mate, podemos adecuar las prácticas de poda a épocas donde se ocasione el menor daño posible, evitando intervenciones cuando las plantas estén en activo crecimiento.

Desde el punto de vista de la nutrición, las plantas de Yerba mate adquieren o utilizan reservas en diferentes etapas de su ciclo anual. En la primera brotación en primavera, las plantas utilizarán las reservas que acumularon en la estación de crecimiento anterior, generando una brotación vigorosa, con un aumento en la cantidad de hojas y ramas. Los primordios foliares que pasaron el invierno como yemas latentes, cubiertas por catáfilas, iniciarán un aumento en el tamaño de sus células, generando la expansión foliar y el crecimiento en altura y diámetro de los tallos.

Antes de la segunda brotación en verano, suele observarse una detención del crecimiento, donde las plantas recuperan las reservas, adquieren nutrientes y las hojas generadas dejan de ser demandantes de carbohidratos, para tener un balance positivo en la fotosíntesis y finalmente transformarse en productoras o fuente. También se observa una detención del crecimiento antes de la última brotación, muchas veces relacionadas a sequías.

La tercera y última brotación en otoño, es la que generará las yemas que pasarán el invierno hacia la siguiente estación de crecimiento, y además se producirá la acumulación de nutrientes y reservas carbonadas. Preparándose para el ingreso al invierno, suele observarse caída de hojas, provocado por un reciclado de nutrientes de las hojas viejas que dejan de ser funcionales, y estos nutrientes son almacenados en

tejidos de reserva como tallos y raíces, los cuales se utilizarán en la primavera siguiente.

Los resultados nos indican que debemos aprovechar las etapas de mayores tasas de crecimiento, para acumular mayor área foliar, propiciado por el aporte de N. Una vez generada el área foliar, ésta debe mantenerse el mayor tiempo posible, sin intervenciones de poda.

Considerando que el P aumenta los niveles de HCST, una mayor disponibilidad de este elemento, se traduciría en el aumento del potencial osmótico, disminuyendo el riesgo de congelación en el invierno. Además, las reservas generadas se utilizarán como energía rápidamente disponible, cuando se den las condiciones ambientales para la brotación de primavera.

La relación directa entre HCST antes de la poda y la brotación posterior, permite inferir que las reservas carbonadas juegan un rol fundamental en el ciclo anual de la yerba mate por tratarse de un cultivo perenne. Mantener un equilibrio con las intervenciones de podas (de formación, rejuvenecimiento, limpieza y cosecha) dejando área foliar remanente, una estructura sana, ramas bien distribuidas con una copa abierta y sobre todo una nutrición balanceada, realizando cada práctica en la época fisiológica correcta, contribuirán a mayores rendimientos y mejor tolerancia ante factores de estrés.

V. CONCLUSIONES

Con la aplicación de distintas combinaciones de nitrógeno y fósforo en plantas de yerba mate de 6 meses de edad, se evidencian aumentos en la brotación, altura y biomasa. El nitrógeno tiene su aporte, principalmente, en un mayor área foliar y en el número de hojas que se forman por planta, "filocrono". El aporte del fósforo por su parte, se relaciona mayormente con un aumento del nivel de hidratos de carbono solubles totales del tallo, siendo utilizado como fuente de energía para la brotación luego de las podas, pero muy relacionado al N. La combinación de ambos nutrientes permite mayor crecimiento, en términos de peso seco y tasa de crecimiento relativo, esta última explicada por la variación fisiológica de las plantas (NAR), más que morfológica (LAR).

Ante el aporte de nutrientes, las plantas de Yerba mate responden adelantando el segundo pico de brotación, como así también la brotación luego de la poda. Además, se produce un incremento diario en altura y en el período de crecimiento. En tanto que, la baja disponibilidad de nutrientes prolonga el periodo sin crecimiento entre los picos de brotación. Esto indica, que los picos de brotación pueden modificarse según la disponibilidad de nutrientes, ajustado a la oferta y demanda de las reservas carbonadas de las plantas de yerba mate en sus diferentes estadios.

En función a los resultados obtenidos, se puede afirmar que el nitrógeno y el fósforo promueven la brotación de plantas de Yerba Mate y determinan un mayor número de brotes, con más hojas, mayor vigor y altura. Además, la respuesta en brotación de las plantas de Yerba Mate está correlacionada positivamente con las reservas disponibles previamente en el tallo, donde la relación N/P incide directamente sobre los HCST.

En plantas de mayor edad se podría esperar un mayor volumen de tejidos de reserva y por lo tanto, una capacidad de respuesta más vigorosa luego de las prácticas de poda, relacionado con la condición nutricional previa del cultivo. De los resultados obtenidos surgen interrogantes, del comportamiento de las plantas relacionado al adelantamiento y prolongación de los ritmos de crecimiento que presenta la especie en relación a la nutrición; además, la relación más eficiente de nitrógeno/fósforo para el crecimiento y el momento en que deberían estar disponibles; por otro lado, la relación de tejidos de reservas/tejidos fotosintéticos que debería quedar luego de las podas; entre otros, pero estos interrogantes sobrepasan los objetivos de este trabajo, habilitando la oportunidad para nuevas investigaciones.

VI. BIBLIOGRAFIA.

- ALMEIDA, J.J.; ARAUJO F.E. 1994. A poda nas árvores frutíferas. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Ceará – EPACE: Brasil. Circular Técnica nº9. 25p.
- ALVIM, P. 1957. Correlação entre chuva, temperatura e produção de cacahueiro. 6º Conferência interamericana de Cacao, Salvador Bahia, 20-27 de Maio de 1956, Brasil, Instituto de Cacao, pp.113-136.
- ANDRADE, F.H. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. INTA.EEA Balcarce: Argentina. Boletín Técnico nº106. 16p.
- ANDRADE, F.H. 2012. Contribuciones de la ecofisiología de cultivos a la producción agrícola. Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Buenos Aires. Argentina. Tomo 66, pp 345-377.
- ANDRADE, F.H.; SADRAS, V.; VEGA, C.; ECHARTE, L. 2005. Physiological determinants of crop growth and yield in maize, sunflower and soybean. Applications to crop management, modeling and breeding. J. Crop Improvement 14:51-101.
- AZCON-BIETO, J.; TALÓN, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw Hill Interamericana: Madrid. 522p.
- ASSUERO, S.G.; TOGNETTI, J.A. 2010. Tillering regulation by endogenous and environmental factors and its agricultural management. Am J Plant Sci. Biotecnol,4: 35-48.
- AUGUSTO, L.; ACHAT, D.L.; JONARD, M.; VIDAL, D.; RINGEVAL, B. 2017. Soil parent material a major driver of plant nutrient limitations in terrestrial ecosystems. Glob Chang Biol, 23(9):3808-3824.
- BACKES, P.; IRGANG, B. 2002. Árvores do sul: guia de identificação e interesse ecológico. 1º ed. Instituto Sousa Cruz, Programa Clube da Árvore: Santa Cruz do Sul. 325p.
- BARRAL, G.; POGGIO, L.; GIBERTI, G.C. 1995. Chromosome numbers and DNA content from *Ilex argentina* (Aquifoliaceae). Bol. Soc. Arg. Bot. 30: 243–248.
- BARRERA, J.; SUÁREZ, D.; MELGAREJO, L.M. 2010. Análisis de crecimiento en plantas. En: Melgarejo, L.M. (ed.) Experimentos en fisiología vegetal. Universidad Nacional de Colombia. Colombia, pp. 25-37.
- BAZZO, K. C.; RAKOCEVIC, M. 2005. Periodicidade no crescimento vegetativo de *Ilex paraguariensis* (St. Hil.) Aquifoliaceae. [en línea] Documentos - Embrapa Florestas <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/312613/1/2005RACPeriodicidadeeCrescimento.pdf>> [consulta: 15 julio 2017].
- BELINGHERI, L.D.; PRAT KRICUN, S.D. 1992. Selección de plantas. 1º Curso de capacitación en producción de yerba mate. EEA Cerro Azul, Misiones, 3 al 7 de agosto de 1992.

- BELL, A. D. 1994. A summary of the branching process in plants. In: Ingram, D. S.; Hudson, A. (eds.) Shape and form in plants and fungi. Academic Press: London. Linnean Society Symposium Series 16: 119-142.
- BENAVIDES, A. 2002. Ecofisiología y bioquímica del estrés en plantas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Horticultura: Buenavista, Saltillo, México. 89 p.
- BERLETH, T.; KROGAN, N.T.; SCARPELLA, E. 2004. Auxin signals-turning genes on and turning cells around. *Curr. Opin. Plant Biol.* 7(5):553-63.
- BEVERIDGE, C.A.; SYMONS, G.M.; MURFET, I.C.; ROSS, J.J.; RAMEAU, C. 1997. The rms1 mutant of pea has elevated indole-3-acetic acid levels and reduced root-sap zeatin riboside content but increased branching controlled by graft transmissible signal(s). *Plant Physiol.* 115: 1251-1258.
- BIDWEL, R.G.S. 2000. Fotosíntesis En: Fisiología vegetal. (1° ed. en español.) AGT Editor: México. pp.157-244.
- BONILLA, I. 2000. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. En: Ascon-bieto, J.; Talón, M. (eds.). Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw Hill - Interamericana: Madrid, pp. 83-97.
- BORCHERT, R. 1983. Phenology and control of flowering in tropical trees. *Biotropica* 15: 81-89.
- BORCHERT, R. 1994. Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. *Ecology* 75: 1437-1449.
- BOSCHINI, C. 2001. Producción y calidad de la morera (*Morus alba*) cosechada en diferentes modalidades de poda. *Agron Mesoam*, 12((2); 175-180
- BROADLEY, M.R.; ESCOBAR-GUTIERREZ, A.J.; BURNS, A.; BURNS, I.G. 2000. What are the effects of nitrogen deficiency on growth components of lettuce. *New Phytologist* 147 (3): 519-526.
- BROWN, R.H.; PEARCE, R.B.; WOLF, D.D.; BLASER, R.E. 1982. Energy accumulation and utilization. In: Harrison, C.H.; William R.K. Alfalfa Science and Technology. ASA. CSSA. SSSA, Madison, WI. Agronomy Monograph 15, pp. 147-166.
- BURGOS, A.M.; MEDINA, R.D. 2017a. Origen e historia, idas y vueltas de la infusión nacional. En: Capellari, P.L. et al. Yerba mate, reseña histórica y estadística, producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires, pp.13-20.
- BURGOS, M.A.; MEDINA, R.D. 2017b. Ecofisiología, acerca de los factores determinantes de los componentes del rendimiento. En: Capellari, P.L. et al. Yerba mate, reseña histórica y estadística, producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires, pp.59-76.
- BURTNIK, O.J. 2005. Yerba mate: manual de producción. 2ª. ed. INTA, Agencia de Extensión Rural Santo Tomé, Corrientes.52p.

- BURTRNIK, O.J.; CASCO, J.; SCROMEDA, P.; REICHEL, W. 1996. Yerba mate: manejo de plantas post-rebaje. INTA. EEA Cerro Azul: Misiones. Miscelánea n° 32. 8p.
- BUSKILA, Y.; SELA, N.; TEPER-BAMNOLKER, P.; TAL, I.; SHANI, E.; WEINSTAIN, R.;...;ESHEL, D. 2016. Stronger sink demand for metabolites supports dominance of the apical bud in etiolated growth, *J Exp Bot* 67(18):5495–5508.
- COMPAÑÍA Argentina Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos (C.A.R.T.A.), 1964. Informe Edafológico. Provincia de Misiones. C.A.R.T.A.: Buenos Aires, Argentina. 191p.
- CABRERA, A. L. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Bol. Soc. Arg. Bot.* 14: 1-42.
- CAPELLARI, P.L. 2017. Propagación sexual a escala comercial vivero tradicional y tecnificado, donde comienza todo. En: Capellari, P.L. et al.. Yerba mate, reseña histórica y estadística, producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires, pp.103-112.
- CARDONA, B.S.; GUTIERREZ, M.C. 2007. Un acercamiento a la ecofisiología del cacao. *CORPOICA.* 6(6):.44-51.
- CARON, B.O.; RHEINHEIMER DOS SANTOS, D.; SCHMIDT, D.; BASSO, C.J.; BEHLING, A.; ELOY, E.; BAMBERG, R. 2014. Biomassa e acúmulo de nutrientes em *Ilex paraguariensis* A. St. Hil. *Ciênc. Florest.* 24(2): 267-276,
- CARON, B.O.; SCHMIDT, D.; MANFRON, P.A.; BEHLING, A.; ELOY, E. e BUSANELLO, C. 2014. Eficiência do uso da radiação solar por plantas *Ilex paraguariensis* a. st. hil. cultivadas sob sombreamento e a pleno sol. *Ciênc. Florest,* 24(2): 257-265.
- CARVALHO, P. E. R. 1994. Espécies arbóreas brasileiras. Recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v.1. 1039 p. [en línea] <http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/temp/index_especies.htm> [consulta: 10 noviembre 2017].
- CASAL, J.J. 2000. Fotomorfogénesis: la luz como factor regulador del crecimiento. En: Azcon-Bieto, J.; Talón, M. (eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal.* McGraw – Hill Interamericana: Madrid, pp.377-388.
- CECONI, D.E.; POLETTO, I.; LOVATO, T.; BRIÃO MUNIZ, M.F. 2007. Exigência nutricional de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* a. st.-hil.) à adubação fosfatada. *Ciênc. Florest,* 17(1): 25-32.
- CETINA ALCALÁ, V.M.; ORTEGA, M.L.; GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, V.A.; VARGAS HERNÁNDEZ, J.; COLINAS, M.T.; VILLEGAS MONTER, A. 2001. Fotosíntesis y contenido de carbohidratos de *Pinus greggii* engelmann. En: respuesta a la poda y al régimen de riego en vivero. *Agrociencia,* 35(6): 599-607
- CHAIN, G. 1990. Bases fisiológicas para la utilización de alfalfa. En: Seminario Producción y Utilización de alfalfa. INIA. E.E. Quilamapu, pp 184-196

- CHAMPAGNAT, P.; BARNOLA, P.; LAVARENNE, S. 1986. Quelques modalités de la croissance rythmique endogène des tiges chez les végétaux ligneux, In: Edelin, C. (ed.), L'arbre, biologie et développement, Actes du 2e Colloq. Int. Sur L'arbre, Naturalia Monspeliensia, Montpellier, France, pp. 279–302.
- CHAZDAN, R.L.; MONTGOMERY, R.A. 2002. La adquisición de carbono en las plantas En: Guariguata, M.R; Kattan G.H (eds.) Ecología y conservación de bosques neotropicales, 1°ed. Libro Universitario Regional: Costa Rica, pp. 225-250.
- CHRISTIN, O. 1988. Cosecha de yerbales. INTA. EEA Cerro Azul, Misiones. Circular nº29, 3p.
- CHRISTIN, O. 1992. Control de malezas: distintas experiencias a nivel productor. 1° Curso de Capacitación en Producción de Yerba Mate, INTA. EEA Cerro Azul, Misiones, 3-7 de agosto de 1992.
- COELHO, G.C.; RACHWAL, M.; SCHNORRENBERGER, E; SCHENKEL, E.P. 2000. Efeitos do sombreamento sobre a sobrevivência, morfologia e química da Erva-Mate. 2º Congresso Sul Americano da Erva-Mate, 3º Reunião Técnica do Cone Sul sobre a Cultura da Erva-Mate, pp. 396-399.
- COLLAHUEZO, P. 2012. Plan de manejo de la especie Guayusa (*Ilex guyusa* L.) en la comunidad de Wapu. Proyecto de financiamiento para negocios basados en la biodiversidad y apoyo a actividades de desarrollo de mercados en la región andina. Macas, Ecuador. 44 p. [en línea] < <http://chankuap.org/wp-content/uploads/2014/03/4.-Plan-de-Manejo-Guayusa-Wapu.pdf> > [consulta: 10 noviembre 2018].
- CONDON, L.M.; TIESSEN, H. 2005. Interactions of organic phosphorus in terrestrialecosystems. In: Turner, B.L. *et al.* (eds.) Organic phosphorus in the environment. CAB International: Wallingfor, UK, pp 295-308.
- CORTEZZI GRAÇA, M.E.; COOPER, M.A.; TAVAREZ, F.R.; CARPENAZZI, A.A. . 1988. Estaquia de Erva-Mate. EMBRAPA, CNPF: Curitiba. Circular Técnica N° 18, 7p.
- DALURZO, H.C. 2017. Labranza. Influencia sobre parámetros del suelo y la compactación, la sustentabilidad del nicho de la yerba mate. En: Capellari, P.L. et al.. Yerba mate, reseña histórica y estadística, producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires, pp.129-152.
- DÁVALOS, M. 2017. Malezas, las competidoras más importantes. En: Capellari, P.L. et al. Yerba mate, reseña histórica y estadística, producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires, pp.167-214.
- DHELE R.A. 1992. Malezas en plantaciones de yerba mate, consideraciones sobre su control. 1° Curso de capacitación en producción de yerba mate, INTA. EEA Cerro Azul, Misiones, 3 al 7 de agosto de 1992.
- DI BENEDETTO, A.; TOGNETTI, J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. RIA, 42(3): 258-282.

- DUBOIS, M.; GILLES, K.A.; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.*, 28(3):350-356.
- DUN, E.A.; SAINT GERMAIN, A.; RAMEAU, C.; BEVERIDGE, C.A. 2012. Antagonistic action of strigolactone and cytokinin in bud outgrowth control. *Plant Physiol*, 158(1): 487-498.
- ERRECABORDE de LASERRE, N.E. 1973. Abonos en yerba mate. INTA, EEA Cerro Azul, Misiones. Informe Técnico nº 19, 25p.
- ESTABLECIMIENTO las Marías. 1992. Disertación sobre plantación de yerba mate. 1º Curso de capacitación en producción de yerba mate, INTA. EEA Cerro Azul, Misiones, 3-7 de agosto de 1992.
- FERGUSON, B.J.; BEVERIDGE, C.A. 2009. Roles for auxin, cytokinin, and strigolactone in regulating shoot branching. *Plant Physiol*, 149(4):1929-1944.
- FILIP, R. 2011. Yerba Mate: De bebida tradicional a alimento funcional. Perspectivas para el siglo XXI. En: 5º Congreso Sudamericano de la Yerba Mate, YNYM: Posadas, 5-6 de Mayo 2011. pp. 25-27.
- FILIP, R.; LÓPEZ, P.; GIBERTI, G.C.; COUSSIO, J.; FERRARO, G. 2001. Phenolic compounds in seven South American *Ilex* species. *Fitoterapia* 72: 774–778.
- FILIP, R.; LÓPEZ, P.; COUSSIO, J.; FERRARO, G. 1999. Phytochemical study of *Ilex dumosa*. *Acta Horticult.* 501: 333-335.
- FLORES DE LA TORRE, F. 1986. Influencia de la fenología sobre el enraizamiento de ramillas y prendimiento de injertos en clones de Cacao. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador, pp.5-10.
- FONTANA H.P.; PRAT KRICUN, S.D. 1992. Vivero y almacigo. 1º Curso de capacitación en producción de yerba mate, INTA. EEA Cerro Azul, Misiones, 3-7 de agosto de 1992.
- FONT QUER, P. 1975. Diccionario de Botánica. (5ª. reimp.) Labor:Barcelona. 1244p.
- FURET, P.M.; LOTHIER, J.; DEMOTES-MAINARD, S.; TRAVIER, S.; HENRY, C.; GUÉRIN, V.; VIAN, A. 2014. Light and nitrogen nutrition regulate apical control in *Rosa hybrida* L. *J. Plant Physiol.* 171: 7–13.
- GALVÃO F. 1986. Variação sazonal da fotossíntese líquida e respiração de *Cahralea canjerana* (Veil.) Mart., *Ilex paraguariensis* St. Hil. e *Podocarpus lambertii* Kl. em Função da Intensidade Luminosa e Temperatura. Tese Doutor em Ciências Florestais Setor de Ciências Agrárias. da Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 116p.
- GÁRATE, A.; BONILLA, I. 2000. Nutrición mineral y producción vegetal. In: Azconbieto, J.; Talón, M. (eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw–hill Interamericana, Madrid, pp.143-164.

- GARCÍA FERNANDEZ, J.M.; ALHAMA, J.; DIEZ, J.; LÓPEZ-RUIZ, A. 1997. Efecto de la disponibilidad de carbono y nitrógeno sobre la concentración intracelular de aminoácidos en el alga verde *Monoraphidium braunii*. En: Vega, J.M. et al. (eds.). Avances en el metabolismo del nitrógeno: de la fisiología a la biología molecular. IV Reunión Nacional. Marbella. Universidad de Sevilla, pp.403-414
- GARRIDO VALERO, M.S.. 1997. Interpretación de análisis de suelos. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, Dirección General de Infraestructuras y Cooperación: Madrid. Hojas Divulgadoras, 5/93, 40p.
- GBIF Secretariat. 2017. *Ilex* L [en línea] GBIF Backbone Taxonomy. Checklist Dataset <<https://www.gbif.org/species/3169013>> [consulta: 10 enero 2018].
- GIBERTI G.C. 1990. Clave de las especies argentinas del género *Ilex* (Aquifoliaceae), Bol. Soc. Argent. Bot. 26 (3-4): 159-162.
- GIBERTI, G.C. 1979. Las especies argentinas del género *Ilex* L. (Aquifoliaceae). Darwiniana (1-3) 22: 217-240.
- GIBERTI, G.C. 1989. Los parientes silvestres de la yerba mate y el problema de su adulteración. Dominguezia 7: 3–22.
- GIBERTI, G.C. 1994. Flora Fanerogámica de Argentina. Fascículo 1 (157). Aquifoliaceae. PROFLORA (CONICET): Córdoba, Argentina: 8 p.
- GIBERTI, G.C. 1995. *Ilex* en Sudamérica, florística, sistemática y potencialidades con relación a un banco de germoplasma para la yerba mate. En: Winge H. et al. (eds.) Erva-Mate: biología e cultura no Cone Sul. UFRGS: Porto Alegre, Brasil: pp.303-312.
- GIBERTI, G.C. 1998. Hallazgo de *Ilex brasiliensis* (Aquifoliaceae) en la Argentina. Bol. Soc. Arg. Bot. 33: 137 -140.
- GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F.C.; ANDRADE, J.L. 2002. El flujo del agua en los árboles del dosel: mecanismos y patrones En: Guariguata M.R y Kattan G.H (eds.) Ecología y conservación de bosques neotropicales, 1ª ed. Libro Universitario Regional: Cartago, Costa Rica, pp. 252-270.
- GOMES ROLDAN, V.; FERMAS, S.; BREWER, P.B.; PUECH-PAGES, V.; DUN, E.A.; PILLOT, J.P.;...; PORTAIS, J.C.. 2008. Strigolactone inhibition of shoot branching. Nature 455: 189-194.
- GOMEZ, R.M.P. 1988. Efecto del nitrógeno y fotoperiodo sobre las reservas nitrogenadas en durazno y manzano. Tesis (Ing Agr). Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, 92 p.
- GOOGLE EARTH PRO. 2018. Google Earth in Physics. US Dept State Geographer. Image Landsat / Copernicus. Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO. Versión 7.3.2.5776.
- GREGORY, F.G.; VEALE, J.A. 1957. A reassessment of the problem of apical dominance. Symp Soc Exp Biol 11: 1–20.
- GREIZERSTEIN, E.J.; GIBERTI, G.C.; POGGIO, L.. 2004. Cytogenetic studies of southern South American *Ilex* species. Caryologia 57:19–23.

- HALLÉ, F. 2010. Artículo invitado: arquitectura de los árboles. Bol. Soc. Argent. Bot. 45 (3-4): 405-418.
- HECK, C.I.; DE MEJIA, E.G.. 2007. Yerba mate tea (*Ilex paraguariensis*): a comprehensive review on chemistry, health implications, and technological considerations. J. Food Sci. 72: R138-151.
- HERMES, C.C.; MEDEIROS, S.L.P.; MANFRON, P.A.; CARON, B.; POMER, S.F.; BIANCHI, C. 2001. Emissão de folhas de alface em função da soma térmica. Rev Bras Agromet., 9(2):.269-275.
- HEUSER, E.D.; FERREIRA, A.G.; MARIATH, J.E.A. 1993. *Ilex paraguariensis* (Aquifoliaceae) Endosperma e embrião durante a embriogênese tardia, Bol. Soc. Argent. Bot. 29 (1-2): 39-48.
- HUANTE, P.; BARRADAS, V.L.; RINCON, E. 2002. Ecofisiología vegetal. En Noguera, A.F.; et al. (eds.). Historia Natural de Chamela, Instituto de Biología: México, pp 475-489.
- HUCHÉ-THÉLIER, L.; BOUMAZA, R.; DEMOTES-MAINARD, S.; CANET, A.; SYMONEAUX, R.; DOUILLET, O.; GUÉRIN, V. 2011. Nitrogen deficiency increases basal branching and modifies visual quality of the rose bushes. Sci. Hortic. 130, 325–334.
- HUNT, R.; CAUSTON, D.R.; SHIPLEY, B.; MOREIRA, M.Z.; HARIDASAN, M. 2002. A modern tool for classical plant growth analysis. Ann Bot .90(4): 485-488.
- IBRAMATE. 2018. Diagnóstico da cadeia produtiva da erva-mate no estado do rio grande do sul. Instituto Brasileiro da erva mate. Ilópolis, Rio Grande do Sul, Brasil. 22p.
- INYM. 2014. Datos estadísticos. [en línea] Instituto Nacional de la Yerba Mate. Argentina <<http://www.inym.org.ar/>> [consulta: 20 abril 2015].
- INYM. 2017. Datos estadísticos. [en línea] Instituto Nacional de la Yerba Mate. Argentina < <http://www.inym.org.ar/operador/plan-estrategico/publicaciones/>> [consulta: 24 noviembre 2017].
- IPNI. 2019. Balanced nutrition. [en línea] <<http://www.ipni.net/topic/balanced-nutrition>> International Plant Nutrition Institute. [consulta: 20 Agosto 2018].
- JONHSON, H.E.; BROADHURST, D.; GOODACRE, R.; SMITH, A.R. 2003. Metabolic fingerprinting of salt-stressed tomatoes. Phytochemistry 62 (6): 919-928.
- KLEPPER, B.; RICKMAN, R.W.; PETERSON, C.M. 1982. Quantitative characterization of vegetative development in small cereal grains. Agron J, .74(5): 789-792.
- KOZLOWSKY, T.T.; PALLARDY, S.G. 1979. Vegetative growth. In: Physiology of woody plants. 2nd. ed. Academic Press, pp.34-67 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-424162-6.X5017-0>
- KROUK, G.; RUFFEL, S.; GUTIÉRREZ, R.A.; GOJON, A.; CRAWFORD, N.M.; CORUZZI, G.M.; LACOMBE, B. 2011. A framework integrating plant growth with hormones and nutrients. Trends Plant Sci. 16(4):.178-182.

- KURTZ V. 1996. El cultivo de la yerba mate en el área de influencia de la agencia de Eldorado. En: 3° Curso de capacitación en yerba mate. INTA. EEA Cerro Azul: Misiones pp.163-188.
- KURTZ, V.; MAYOL, M. 2011. Evaluación de sistemas de cosecha de yerba mate. En: Actas 5° Congreso Sudamericano de la Yerba Mate, YNYM: Posadas, 5-6 de Mayo 2011, pp. 151-154.
- LASKOWSKI, L.E. 2014. Contenido de carbohidratos en hojas y raíces de plantas de naranja 'Valencia' y mandarina 'Dancy' durante un ciclo anual de crecimiento. Rev. Fac. Agron. (LUZ). 31: 1-22.
- LEACH, R.G. 1968. The growth of the lucerne plant after cutting. Aust J Agr Res. 19:517-530.
- LEE, D.W.; OBEBAUER, S.F.; JOHNSON, P.; KRISHNAPILAY, B.; MANSOR, M.; MOHAMAD, H.; YAP, S.K.. 2000. Effects of irradiance and spectral quality on leaf structure and function in seedlings of two Southeast Asian Hopea (Dipterocarpaceae). Am J Bot 87(4): 447-445.
- LIGIER, H.D.; MATTEIO, H.R.; POLO, H.L; ROSSO, J.R. 1990. Provincia de Misiones. En: Atlas de suelos de la República Argentina. Tomo II. INTA: Buenos Aires, pp. 105-154.
- LLERA, V.; MEDINA, R.D. 2017. Plantación y fertilización, hacia el logro del establecimiento exitoso de las plantas para garantizar una producción sustentable y duradera. En: Capellari, P.L. et al. Yerba mate, reseña histórica y estadística. Producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires,..pp.153-166.
- LLERA, V.; MAYOL, R.M.; MEDINA, R.D. 2017. Podas rebaje y de renovación, acciones para el rejuvenecimiento del yerbal y la recuperación de su productividad. En: Capellari, P.L. et al. Yerba mate, reseña histórica y estadística. Producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires, pp.267-276.
- LOESENER, T. 1901. Monographia Aquifoliacerum. Pars I. Nova Acta Acad. Caes. Leop.-Carol. German. Nat. Cur. 78: 1-598.
- LOIZEAU, P.A. 1994. Les Aquifoliaceae péruviennes: (éléments pour une révision des Aquifoliaceae néotropicales). Conservatoire et Jardin Botaniques: Ville de Genève. Boissiera 48(306):.3-5.
- LÓPEZ-LEGARDA, X.; TARAMUEL-GALLARDO, A.; ARBOLEDA-ECHAVARRÍA, C.; SEGURA-SÁNCHEZ, F.; RESTREPO-BETANCUR, L.F. 2017. Comparación de métodos que utilizan ácido sulfúrico para la determinación de azúcares totales. Rev Cuba Quím. 29(2):180-198.
- LOPEZ-RAEZ, J.A.; CHARNIKHOVA, T.; GÓMEZ-ROLDÁN, V.; MATUSOVA, R.; KOHLEN, W.; DE VOS, R.;...; BOUWMEESTER, H. 2008. Tomato strigolactones are derived from carotenoids and their biosynthesis is promoted by phosphate starvation. New Phytol. 178: 863–874.

- LOUBRY, D. 1994. La phénologie des arbres caducifoliés en forêt guyanaise (50 de latitude nord): illustration d'un déterminisme a composantes endogene et exogene. *Can J Bot* 72:1843-1857.
- LOURENZO, R.S. 1997. Adubação da Erva Mate .1º Congresso Sul-Americano da Erva Mate, 2º Reunião técnica do Cono Sul sobre a cultura da Erva Mate. Curitiba. pp. 299-315.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, A.S. 1989. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato: Piracicaba. 201p.
- MALDONADO, J.M. 2013. Asimilación del nitrógeno y del azufre. En: Azcón-Bieto J., Talón M. (eds.) *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill Interamericana. Madrid, pp. 287-306.
- MALDONADO, J.M.; AGÜERA, E.; PEREZ VICENTE, R. 2000. Asimilación del nitrógeno y del azufre. En: Azcón-Bieto J, Talón M. (eds.) *Fisiología y bioquímica vegetal*. McGraw-Hill Interamericana: Madrid, pp. 235-260.
- MALHEIROS DE OLIVEIRA, Y.M.; ROTTA, E. 1985. Área de distribución natural de la yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). *ANAIS Programa Nacional de Pesquisa de Florestas, Curitiba, (EMBRAPA/IBDF)*. pp. 17-35.
- MARIATH, J.E.; COELHO, G.C.; PIRES DOS SANTOS, R.; HEUSER, E.D.; AYUB, D.M.; COCUCCI, A.E. 1995. Aspectos anatómicos y embriológicos en especies del género *Ilex*. *Erva-mate: biología e cultura no Cone Sul*. Universidad Federal de Río Grande del Sur: Brasil, pp. 263-280.
- MARQUIS, R.J. 1988. Phenological variation in the neotropical understory shrub *Piper arieianum*: causes and consequences. *Ecology* 69: 1552-1565.
- MASON, M.G.; ROSS, J.J.; BABST, B.A.; WIENCLAW, B.N.; BEVERIDGE, C.A. 2014. Sugar demand, not auxin, is the initial regulator of apical dominance. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(16): 6092-6097. [en línea]. <<https://www.pnas.org/content/111/16/6092.full> > [consulta: 02 febrero 2019].
- MASUKO, T.; MINAMI, A.; IWASAKI, N.; MAJIMA, T.; NISHIMURA, S.; LEE, Y.C. 2005. Carbohydrate analysis by a phenol-sulfuric acid method in microplate format. *Anal Biochem*, 339 (1): 69–72.
- MATSUNAGA, F.T.; RAKOCEVIC, M. 2011. Evolução do software interpolmate para a representação do crescimento de erva-mate em 3D. *Actas 5º Congreso Sudamericano de la Yerba Mate, YNYM: Posadas, Misiones, 5-6 de mayo 2011*. pp. 119-125.
- MATSUNAGA, F.T.; RAKOCEVIC, M.; BRANCHER, J.D. 2012. InterpolMateSI- the Module for Interpolation of Growth and Production of Yerba Mate. 4º International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications. DOI: 10.1109/PMA.2012.6524859

- MAYOL R.M.; GIANCOLA S.I.; LAVECINI M.V.; AIASSA J.F.; DI GIANO S.; SALVADOR M.L.;...; RABAGLIO M.D. 2014. Causas que afectan la adopción de tecnología en productores de yerba mate en la provincia de Misiones: Enfoque cualitativo. Ediciones INTA: Buenos Aires. Estudios socioeconómicos de la adopción de tecnología nº8, 74p.
- MAYOL, R.M. 1997. La experiencia argentina en sistemas de podas en yerba mate. I Congreso Sul-Americano da Erva Mate, II Reunião técnica do Cono Sul sobre a cultura da Erva Mate. Curitiba. pp. 337-349.
- MAYOL, R.M. 2017. Podas de formación, limpieza y cosecha, el cuidado fundamental para la sustentabilidad de la planta. En: Capellari, P.L. et al. Yerba mate, reseña histórica y estadística, producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires. pp.249-266.
- MAZUCHOWSKI, J.Z.; TEIXEIRA DA SILVA, E.; MACCARI JUNIOR, A. 2007. Efeito da luminosidade e da adição de nitrogênio no crescimento de plantas de *Ilex paraguariensis* St. Hil. Revista *Árvore*, 31(4):619-627.
- MC-INTYRE, G.I. 2001. Control of plant development by limiting factors: a nutritional Perspective. *Physiol Plant*, 113: 165–175.
- MC-INTYRE, G.I.1997. The role of nitrate in the osmotic and nutritional control of plant development. *Aust J Plant Physiol*, 24(2): 103–118.
- MEDEIROS A.C. 1998. Dormência em sementes de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). Embrapa CNPF: Brasília, Documento nº36, .22p. [en línea]: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/290859/dormencia-em-sementes-de-erva-mate-ilex-paraguariensis-st-hil>> [consulta: 15 de Junio 2016].
- MEDINA, E. 1977. Introducción a la ecofisiología vegetal. Organización de los Estados Americanos: Washington, D.C. 102 p.
- MEDINA, R.D.; BURGOS, A.M. 2017. Sistemática y morfología, de su identidad, sus aspectos externos y algunos más íntimos. En: Capellari, P.L. et al Yerba mate, reseña histórica y estadística, producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires. pp.37-58.
- MELGAREJO, L.M. 2010. Experimentos en fisiología vegetal. Universidad Nacional de Colombia: Bogotá. pp: 25-38.
- MILTON, K. 1991. Leaf change and fruit production in six neotropical Moraceae species. *J Ecol* 79: 1-26.
- MILTON, K.; WINDSOR, D.M.; MORRISON, D.W.;ESTRIBI, M.A. 1982. Fruiting phenologies of two neotropical. *Ficus* species. *Ecology* 63::752-762.
- MOLINA, S.P. 2017. Vivero clonal para producción comercial, tecnología para potenciar la producción. En: Capellari, P.L. et al. Yerba mate, reseña histórica y estadística, producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires. pp.113-128.

- MOLINA, S.P.; MAYOL, R.M. 2003. Efecto de la longitud y diámetro en la mortalidad de estacas de *Ilex paraguariensis* St. Hil.: resultados preliminares. Anais 3º Congresso Sul-Americano da Erva-Mate y 1º Feira do Agronegócio da Erva-Mate. Chapecó, Santa Catarina – Brasil.
- MOLINA, S.P.; MAYOL, R.M. 2004. Importancia de la lámina foliar en estacas de yerba mate y retención foliar. 25º Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- MOLINA, S.P.; MAYOL, R.M.; OHASHI, D.V.; BÁLSAMO, M.G.; KUZDRA, H.J.; ARNDT, G.M.; SKROMEDA, M.M. 2017. Sustratos para el enraizamiento de clones de *Ilex paraguariensis* St. Hil. VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate, III Simpósio Internacional de Erva-Mate é Saúde, I Feira de Tecnologia na Indústria Ervateira. Erechim, Brasil.
- MOLINA, S.P.; SAPA, G.A.; GALLARDO, R.; RADOVANCICH, A.; MATHOT, M.; MAYOL, R.M. 2017. Efecto de la putrescina y el IBA en la formación de raíces adventicias en estacas de yerba mate. VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate, III Simpósio Internacional de Erva-Mate é Saúde, I Feira de Tecnologia na Indústria Ervateira. Erechim, Brasil.
- MÜLLER L.E. 1964. Manual de laboratorio de fisiología vegetal. Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la o.e.a. Turrialba. (10):101-103.
- MUNARETTO, N. 1992. Manejo de planta. 1º Curso de capacitación en producción de yerba mate, INTA. EEA Cerro Azul, Misiones, 3-7 de agosto de 1992. pp. 35-36.
- OSONE, Y.; ISHIDA, A.; TATENO, M. 2008. Correlation between relative growth rate and specific leaf area requires associations of specific leaf area with nitrogen absorption rate of roots. *New Phytol.* 179 (2): 417-427.
- PENTEADO JUNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. dos R. 2016. Erva 20: sistema de produção para erva-mate. Seminario Erva-Mate XXI 05-07 outubro 2016, Curitiba, PR ,pp.44-47.
- PEREIRA, J.S. 1995. Gas exchange and growth. In: Schulze E.D.; Caldwell M.M. (eds.). *Ecophysiology of photosynthesis*. Springer-Verlag: Berlin, pp. 147-175.
- PICCOLO, G.A. 1992. Abonos y cubiertas verdes en yerbales. 1º Curso de capacitación en producción de yerba mate, INTA. EEA Cerro Azul, Misiones, 3-7 de agosto de 1992, pp.55-60.
- PICCOLO, G.A. 1995. Efecto de tratamientos de recuperación de un rodudalf típico (serie africana) en la provincia de Misiones. Análisis de algunas variables físicas y químicas. En: *Erva-mate. Biología e cultura no cone sul..* Universida de Federal do Rio Grande do Sul: Farroupilha, Porto Alegre. pp. 89-106.
- POLETO, G.C.; DE PAULA, M.G.; CARON, B.O.; ELLI, E.F. 2017. Estimativa da temperatura-base para emissão de folhas e do filocrono da erva-mate na fase de muda. *ENFLO, Ecología e Nutrição Florestal, Santa María-RS.* 5(1):.23-32 [en línea]: <<http://w3.ufsm.br/enflo/>>, [consulta: 28 de julio 2017].
- POORTER, H. 1989. Plant growth analysis: towards a synthesis of the classical and the functional approach. *Physiol Plant* 75 (3): 237-244.

- POORTER, L. 1999. Growth responses of 15 rainforest tree species to a light gradient; the relative importance of morphological and physiological traits. *Funct Ecol.*, 13(3):396-410.
- PRAT KRICUN, S.D. 1991. Yerba Mate: técnicas actualizadas de cultivo. INTA. EEA Cerro Azul, Misiones. Publicación Miscelánea N° 27. 15 p.
- PRAT KRICUN, S.D. 1995. Almácigos y viveros. 2º Curso de Capacitación en Producción Yerba Mate. INTA. EEA Cerro Azul: Misiones. 6-9 de sept. 1994, pp. 7-9.
- PRAT KRICUN, S.D. 2011. Cultivo y cosecha de Dumosa (*Ilex dumosa* var. *dumosa*) en Misiones y NE de Corrientes. INTA. EEA.Cerro Azul, Misiones. Miscelánea n° 64, 23p.
- PRAT KRICUN, S.D. 2013. Mejoramiento genético de la Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) en la Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul – Período 1974-2011. INTA, EEA Cerro Azul, Misiones: Miscelánea N° 68, 56p.
- PRAT KRICUN, S.D.; BELINGHERI L.D. 1995. Recolección de especies silvestres y cultivadas del género *Ilex* en las provincias de Misiones y Tucumán (Argentina) y en los estados de Paraná, Santa Catarina y Rio Grande do Sul (Brasil). Período 1988-1992. En: WInge, H. et al. (eds.) Erva mate: biología e cultura no Cone Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Farroupilha, Porto Alegre. pp. 313-321.
- PRAT KRICUN, S.D.; BELINGHERI, L.D. 1992. Disposición, distanciamiento y densidad de plantación de yerba mate (*Ilex paraguariensis* S.H.). 1º Curso de capacitación en producción de yerba mate, INTA. EEA Cerro Azul, Misiones, 3 al 7 de agosto de 1992. pp. 27-30.
- PRAT KRICUN, S.D.; BELINGHERI, L.D. 2003a. Cosecha tradicional de la yerba mate. INTA. EEA Cerro Azul: Misiones. Boletín Técnico n°4. 12p.
- PRAT KRICUN, S.D.; BELINGHERI, L.D. 2003b. Épocas de poda de formación a campo en plantaciones de yerba mate. En: 3º Congresso Sul-Americano da Erva Mate. 1º Feira do Agronegocio da erva mate, Chapecó, Brasil.
- PRAT KRICUN, S.D.; BELINGHERI, L.D.1997. Distancia y densidad de plantación. En 3º Curso de Capacitación en Producción Yerba Mate. INTA. EEA Cerro Azul, Misiones. pp. 45-55.
- PUZINA, T.I. 2004. Effect of zinc sulfate and boric acid on the hormonal status of potato plants in relation to tuberization. *Russ. J. Plant Physiol.* 51(2): 209–215.
- QUERO, J.L.; VILLAR, R.; MARAÑÓN, T.; ZAMORA, R.; VEGA, D.; SACK, L. 2008. Relating leaf photosynthetic rate to whole plant growth: drought and shade effects on seedlings of four *Quercus* species. *Funct. Plant Biol* 35: 725- 737.
- R CORE TEAM. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [en línea]: <<https://www.r-project.org/>> [consulta: 12 de abril 2015].
- RAIJ, B.V. 1991. Fertilidade do solo e adubação. *Ceres: Piracicaba.* 343p.

- RAKOCEVIC, M.; PICARELLI, E. 2011. Modificação de padrão de ramificação das plantas jovens de erva-mate. Actas 5º Congreso Sudamericano de la Yerba Mate, YNYM: Posadas, Misiones, Argentina, 5-6 de Mayo 2011. pp. 127-132.
- RAKOCEVIC, M.; DA SILVA, M.H.M.; ASSAD, E.D.; MEGETO, G.A.S. 2008. Reconstrução de maquetes 3D e manipulação da arquitetura de espécies perenes cultivadas no Brasil. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 43: 1241-1245.
- RAKOCEVIC, M.; MEDRADO, M.J.S.; LUCAMBIO, F.; VALDUGA, T.A. 2006a. Caracterização de crescimento do caule da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) cultivada em dois ambientes luminosos contrastantes. 4º Congreso Sudamericano de la yerba mate. INYM: Posadas, Misiones, pp.244-249.
- RAKOCEVIC, M.; MEDRADO, M.J.S.; LUCAMBIO, F.; VALDUGA, T.A. 2006b. Ritmicidade de emissão e de queda de folhas e as suas conseqüências no manejo da erva-mate. 4º Congreso Sudamericano de la yerba mate. INYM: Posadas, Misiones, pp.250-256.
- RAMDOSKI, M.I.; SUGAMOSTO, M.L.; GIAROLA, N.F.B.; CAMPIOLO, S. 1992. Avaliação dos teores de macro e micronutrientes em folhas jovens e velhas de erva-mate nativa. *Revista do instituto Florestal*, 4:453-456.
- RAMEAU, C.; BERTHELOOT, J.; LEDUC, N.; ANDRIEU, B.; SAKR, S.; FOUCHER, F. 2014. Multiple pathways regulate shoot branching. *Front Plant Sci* 5: 741 <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00741>
- RAO, P.; PATTABIRAMAN, T.N. 1989. Reevaluation of the phenol-sulfuric acid reaction for the estimation of hexoses and pentoses". *Anal Biochem*, 181 (1): 18–22.
- REGINATTO, F.H.; ATHAYDE, M.L.; GOSMANN G.;SCHENKEL E.P..1999. Methylxanthines accumulation in *Ilex* species. *J. Braz. Chem. Soc.* 10: 443-446.
- REICH, P.B.; WALTERS, M.B.; ELLSWORTH, D.S. 1992. Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems. *Ecol Monograph* 62: 365-392. .
- REISSMAN, C.B.; ROCHA, H.O.; KOEHLER, C.W.; CALDAS, R.L.S.; HILDEBRAND, E.E. 1983. Bio-elementos em folhas e hastes de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St.Hil.) sobre Cambissolo na região de Mandirituba. *Revista Floresta*, 14: 49-54.
- SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. 1994. Desarrollo vegetal En: *Fisiología vegetal*, pt2 Iberoamericana: México. pp.361-392.
- SAND, H.A. 1989. Propagación agámica de la yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.).INTA. EEA Cerro Azul, Misiones. Nota Técnica N° 40. 11 p.
- SANSBERRO, P.A.; MROGINSKI, L.A.; BOTTINI, R.A. 2000. Giberelinas y brotación de la yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil). Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas [en línea] <http://www.revistacyt.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2000/5_agrarias/a_pdf/a_044.pdf> [consulta: 04 setiembre 2015]

- SANSBERRO, P.A.; MROGINSKI, L.A.; MASCIARELLI, O.A.; BOTTINI, R. 2002. Shoot growth in *Ilex paraguariensis* plants grown under varying photosynthetically active radiation is affected through gibberellin levels. *Plant Growth Regul* 38: 231–236.
- SANTIN D.; BENEDETTI E.L.; FÉLIX DE BARROS, N.; FONTES L.L.; CARVALHO DE ALMEIDA I.; LIMA NEVES J.C. e WENDLING I. 2017. Manejo de colheita e adubação fosfatada na cultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em fase de produção. *Ciência Florestal*, 27(3):783-797
- SANTIN, D.; BENEDETTI, E.L.; BRONDANI, G.E.; REISSMANN, C.B.; ORRUTÉA, A.; ROVEDA, L.F. 2008. Crescimento de mudas de erva-mate fertilizadas com N, P e K. *Scientia Agraria*. DOI: [10.5380/rsa.v9i1.10135](https://doi.org/10.5380/rsa.v9i1.10135)
- SANTIN, D.; BENEDETTI, L.E.; CAMOTTI BASTOS, M.; FERNANDES KASEKER, J.; REISSMANN, C.B.; BRONDANI, G.E.; FÉLIX DE BARROS, N. 2013. Crescimento e nutrição de erva-mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica growth and nutritional composition of erva-mate as affected by nitrogen, phosphate and potassium fertilization. *Ciência Florestal*, 23(2): 363-375.
- SANZ PÉREZ, V.; CASTRO DÍEZ, P.; VALLADARES ROS, F. 2005. Efecto de la disponibilidad de agua y nutrientes en el patrón de acumulación de carbohidratos en plántulas de tres especies de *Quercus*. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 20: 129-134
- SCHERER, R.A. 2002. Mass and nursery selection of yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) for Quality Improvement in Argentina. Cuvillier Verlag Göttingen. 203p.
- SCHNEIDER, C.A.; RASBAND, W.S.; ELICEIRI, K.W. 2012. "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis". *Nature Methods* 9, 671-675.
- SEGURA, J. 2000. Introducción al desarrollo: concepto de hormona vegetal. En: Ascon-Bieto, J.; Talón, M. *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw–Hill Interamericana: Madrid. pp. 285-323.
- SENGIK, E.S. 2003. Os macronutrientes e os micronutrientes das plantas. [en línea]: <<http://www.nupel.uem.br/nutrientes-2003.pdf>> [consulta: 15 noviembre 2016].
- SHIBLES, R.M.; WEBER, C.R. 1965. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Sci* 6: 55-59.
- SILVA, M.H.M.DA e RAKOCEVIC, M. 2010. Software for interpolation of vegetative growth of yerba mate plants in 3D. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 45(3): 244-251.
- SKROMEDA, M.M.; MOLINA, S.P.; ARNDT, G.M.; OHASHI, D.V.; BALSAMO, M.G.; KUZDRA, H.J.; MAYOL, R.M. 2017. Medición y estimación del área foliar en plantas de yerba mate. VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate, III Simpósio Internacional de Erva-Mate e Saúde, I Feira de Tecnologia na Industria Ervateira. Rio Grande do Sul, Brasil, 16-18 de maio de 2017.
- SMITH, S.; SILVA, J. 1970. Growth and carbohydrates changes in the root wood and bark of different sized regrowth after cutting. *Crop Sci.* 10(4): 396-399.

- SOSA D.A. 1992. Evaluación de la productividad del cultivo de yerba mate en relación al estado nutricional suelo/planta. 1° Curso de capacitación en producción de yerba mate. INTA. EEA Cerro Azul, Misiones, 3-7 de agosto de 1992. pp. 61-64
- SOSA D.A. 1994. Fertilización química. Abonos. Requerimientos nutricionales. En: 2° curso de capacitación en producción de Yerba Mate, INTA. EEA Cerro Azul: Misiones. del 6 al 9 de setiembre de 1994. pp. 68-85.
- SOUZA, V.C.; LORENZI, H. 2012. Botánica sistemática. Guía ilustrada para identificación de las familias de Fanerógamas nativas y exóticas de Brasil, basado en APG III. 3° ed. Instituto Plantarum de Estudos da Flora: Nova Odessa, SP, Brasil. 768p.
- SOZZI, G. 2007. Árboles frutales: ecofisiología, cultivo y aprovechamiento. UBA. Facultad de Agronomía: Buenos Aires, Argentina. pp.40-78.
- STEVENS, P.F. 2001. Angiosperm Phylogeny Website. version 14, July 2017 [en línea] <<http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>> [consulta: 17 noviembre 2017].
- STEVENS, P.F. 2008. Angiosperm Phylogeny. Website. version 9, June 2008. [en línea] <<http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>> [consulta: 15 marzo 2015].
- STEWART W.M. 2007. Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. IPNI. Informaciones Agronómicas, No.67 [en línea] <[http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/EC5D7D4A78BB6D6D852579A3006CB4D4/\\$FILE/Consideraciones%20en%20el%20Uso%20Eficiente%20de%20Nutrientes.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/EC5D7D4A78BB6D6D852579A3006CB4D4/$FILE/Consideraciones%20en%20el%20Uso%20Eficiente%20de%20Nutrientes.pdf)> [consulta: 16 mayo 2017].
- STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.;BAENZIGER, P.S. 2003. Incorporating a chronology response into the prediction of leaf appearance rate in winter wheat. *Ann Bot.*92(2):.181-190.
- SUN, J.; GIBSON, K.M.; KIIRATS, O.; OKITA, T.W.;EDWARDS, G.E. 2002. Interactions of nitrate and CO₂ enrichment on growth, carbohydrates, and rubisco in Arabidopsis starch mutants. Significance of starch and hexose. *Plant Physiol.* 130: 1573-1583.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. 2006a. Fotosíntesis, condiciones fisiológicas y ecológicas. En: *Fisiología vegetal*, v1. (trad. de la 3° ed.) Universitat Jaume I. Castelló de la Plana. pp.315-355.
- TAIZ L.; ZEIGER E. 2006b. El control de la floración En:*Fisiología Vegetal*,v.2 (trad. de la 3° ed.) Universitat Jaume I: Castelló de la Plana. pp.1069-1127.
- TAKEUCHI, C.M.; JUAZIRO DOS SANTOS, A.; VIEIRA, T.; BITTENCOURT, A.M.; GOMES DE ALMEIDA RUCKER, N.; NIETSCHKE, K. 2011. Níveis tecnológicos de produção de erva-mate nas propriedades rurais da região sudeste do Paraná. *Actas 5º Congreso Sudamericano de la Yerba Mate*. YNYM: Posadas, Misiones, Argentina, 5-6 de Mayo 2011. pp. 94.
- TARRAGÓ, J. R.; SANSBERRO, P.A.; GONZALEZ, A.M.; MROGINSKI, L.A. 2002. La presencia de la lámina foliar promueve el enraizamiento de estacas plurinodales de Yerba Mate. Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Facultad de ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina. [en línea]: <<http://www.guarani.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2002/05-Agrarias/A-080.pdf>> [consulta: 20 de setiembre 2018].

- TEKALIGN, T.; HAMMES, P.S. 2005. Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and reproductive growth II. Growth Analysis, Tuber Yield and Quality. *Sci Hort*, 105: 29-44.
- THOMPSON, W.A.; HUANG, L.K.; KRIEDEMANN, P.E. 1992. Photosynthetic response to light and nutrients in sun-tolerant and shade tolerant rainforest trees. II Leaf gas exchange and component processes of photosynthesis. *Aust J Plant Physiol*, 19: 19-42.
- TKACHUK, J.J. 1996. Algunos aspectos de la producción yerbatera en la zona de campo de Misiones y Corrientes. En: 3° Curso de capacitación en producción de yerba mate- INTA. Cerro Azul: Misiones, pp.147-152.
- TOGNETTI, J.A.; PONTIS, H.G.; MARTINEZ-NOEL, G.M.. 2013. Sucrose signaling in plants: A world yet to be explored. *Plant Signal Behav*, 8(3), e23316. doi: 10.4161/psb.23316
- TOMAS, A.M.O.; EXPOSITO, L.D; CONESA J.A.D.R. 2015. Evolución de la fisiología vegetal en los últimos 100 años. *Revista Eubacteria*, 34:74-82.
- TOURN, G.M.; BARTHELLEMY, D. y GROSFELD, J. 1999. Una aproximación a la arquitectura vegetal: conceptos, objetivos y metodología. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 34 (1-2): 85-99.
- TOWNSEND, A.R.; CLEVELAND, C.C.; ASNER, G.P.; BUSTAMANTE, M.M.C. 2007. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests. *Ecology*, 88, 107–118.
- VAN DEN ENDE, W. 2014. Sugars take a central position in plant growth, development and, stress responses. A focus on apical dominance. *Front Plant Sci* 5:313. doi:10.3389/fpls.2014.00313.
- VAN SCHAIK, C.P.; TERBORGH, J.W.; WRIGHT, S.J. 1993. The phenology of tropical forests: adaptive significance and consequences for primary consumers. *Annu Rev Ecol Syst* 24: 353-377.
- VAZQUEZ, S.; MORALES, L.A. 2002. Adsorción de fósforo en suelos ácidos de Misiones (Argentina). *Ciencia del Suelo* 18 (2). [en línea] <https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_18n2/vazquez_89-94.pdf>, [consulta: 02 de agosto 2015].
- VERA BARAHONA, J. 1974. Influencia de la sequía fisiológica en el desarrollo y nutrición de genotipos contrastados de cacao. Tesis Mg, Sc. IICA, Centro Tropical de Enseñanza e Investigación. Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales. Turrialba, Costa Rica, pp-14-15. [en línea]: <<http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/2411>> [consulta: 25 de agosto 2015].
- VICKEY, P.J. 1981. Pasture growth under grazing. In: Morley, F.W. (ed.) *Grazing Animal*. Elsevier: Amsterdam, pp. 55-72.
- VILLAR, R.; RUIZ-ROBLETO, J.; QUERO, J.L.; POORTER, H.; VALLADARES, F.; MARAÑÓN, T. 2008. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. En: Valladares, F. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante (2ª.ed.)*. Ministerio de Medio Ambiente. EGRAF: Madrid. pp. 193-230.

- VITOUSEK, P.M.; PORDER, S.; HOULTON, B.Z.; CHADWICK, O.A. 2010. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen–phosphorus interactions. *Ecol App*, 20(1):.5-15.
- WARD, C.V.; BLASER, R.G. 1961. Carbohydrate food reserves and leaf area in regrowth of orchardgrass [en línea] Access DL <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/1/5/CS0010050366?access=0&view=pdf>> [consulta: 25 febrero 2019].
- WHITE, J.W.1985. Conceptos básicos de fisiología del frijol. En: López Genes, M. et al.(eds.). Frijol: Investigación y producción. Programa de las Naciones Unidas (PNUD); Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT): Cali, CO. pp. 43-59.
- WILLIAMS-LINERA G.; MEAVE J. 2002. Patrones fenológicos, En: Guariguata M.R; Kattan G.H (eds.) Ecología y conservación de bosques neotropicales, 1° ed. Libro Universitario Regional: Costa Rica,. pp. 407-431.
- WRIGHT, I.J.; REICH, P.B.; WESTOBY, M.; ACKERLY, D.D.; BARUCH, Z.; BONGERS, F.;...; FLEXAS, J. 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428:821–827. [en línea] <<https://www.nature.com/articles/nature02403>> [consulta: 25 febrero 2019].
- XU, J; ZHA, M.; LI, Y.; DING, Y.; CHEN, L.; DING, C.; WANG, S. 2015. The interaction between nitrogen availability and auxin, cytokinin, and strigolactone in the control of shoot branching in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Cell Reports*, 34(9): 1647–1662.
- YACOVICH, M. 2017. La actividad yerbatera en la provincia de Corrientes, Números para saber dónde estamos. En: Capellari, P.L. *et al.* Yerba mate, reseña histórica y estadística, producción e industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones: Ciudad Autónoma de Buenos Aires, pp.21-36.
- ZAMPIER, A.C. 2001. Avaliação dos níveis de nutrientes, cafeína e taninos em erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) após adubação, e sua relação com a produtividade. Curitiba. Mestrado em Engenharia Florestal. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 103p.
- ZANON, A. 1988. Produção de Semente de erva-mate. EMBRAPA-CNPQ: Curitiba. Circular Técnica, N°16. 8p.
- ZAS R. 2003. Interpretación de las concentraciones foliares en nutrientes en plantaciones jóvenes de *Pinus radiata* D. Don en tierras agrarias en Galicia. *Invest Agrar: Sist. Recur. For.* 12 (2): 3-11.

VII. APÉNDICE

I. Distribución mundial de las Aquifoliáceas.



Figura I. Mapa de la distribución de la familia Aquifoliáceas a nivel mundial. (Stevens, 2001)

II. Clave para identificar ejemplares estaminados (Giberti, 1990)

1. Hojas adultas con margen entero o pauciaserrado. Tipo predominante de inflorescencias axilares de nomófilos: fascículo corimboide de dicasios, pero nunca dicasios solitarios o en parejas. Pistilodio levemente apiculado o rostrado

2. Árboles. Láminas foliares papiráceas, tenues, no mayores de 80 a 35 mm, con el ápice agudo, acuminado, raro obtuso. Pétalos de borde liso, pequeños, de 2-3 5 2 mm. Pistilodio conspicuamente rostrado

I. brevicuspis

2'. Árboles o arbustos. Láminas foliares coriáceas, algo crasas, hasta 115 5 55 mm, con el ápice obtuso-mucronado o emarginado-mucronado, raro agudo. Pétalos de borde ciliolado o papiloso en ocasiones, grandes, de (3) 4 (5) 5 2-3 mm. Pistilodio globoso, brevemente apiculado

I. theezans

1'. Hojas adultas con margen casi totalmente aserrado. Inflorescencias axilares de nomófilos en dicasios solitarios o en parejas, también en fascículos corimboides de dicasios. Pistilodio no rostrado ni apiculado

2. Inflorescencias axilares de nomófilos nunca en fascículos corimboides, pero sí en dicasios (3) 7 (15)-floros, solitarios o en parejas. Borde de los sépalos siempre ciliado. Láminas foliares estrechas, oblanceoladas, obovadas o más raro elípticas, no mayores de 30 mm de ancho

I. dumosa* var. *guaranina

2'. Inflorescencias axilares de nomófilos en fascículos corimboides o en dicasios solitarios. Borde de los sépalos nunca ciliado. Láminas foliares más anchas, casi siempre mayores de 30 mm de ancho (hasta 100 mm)

3. Todos los individuos siempre perennifolios. Tipo predominante de inflorescencia: fascículos corimboides, raramente en ejes unifloros, en axilas de nomófilos

4. Láminas foliares grandes, obovadas, oblanceoladas, elípticas u oblongas, de hasta 250 x 100 mm, con el ápice obtuso-retuso, plano cerca de la nervadura media; margen regularmente aserrado. Fascículos corimboides de 3-11 dicasios 3-7 (11)-floras. Corola grande, hasta 7 mm de diámetro.

I. paraguariensis

4'. Láminas foliares pequeñas, elípticas, ovadas u obovadas, de 30-65 x 15-35 mm, con el ápice muy agudo, acuminado, deprimido cerca de la nervadura media; margen esparcidamente pauciaserrado. Fascículos corimboides de ejes 1-floros o de dicasios 3-floros. Corola pequeña, 5-6 mm de diám.

I. microdonta

3'. Algunos individuos total o parcialmente caducifolios en invierno. Tipo predominante de inflorescencia: ejes unifloros o dicasios 3-7-floros solitarios en las axilas de los nomófilos, raramente en fascículos corimboides de 3-7 ejes o dicasios axilares de nomófilos. Láminas foliares de hasta 140 x 70 mm

I. argentina

III. Clave para identificar ejemplares pistilados (Giberti, 1990)

1. Hojas adultas con láminas foliares de margen entero o pauciaserrado. Tipo predominante de inflorescencia axilar de nomófilos: fascículo corimboide de dicasios; nunca en dicasios solitarios o en parejas. Pirenos con la cara dorsal lisa o inconspicuamente estriada

2. Láminas foliares pequeñas, no mayores de 80 x 35 mm, con el ápice agudo, acuminado, raro obtuso. Pétalos de borde liso, pequeños, ca. 3 x 2 mm. Fruto globoso, pequeño, hasta ca. 5 mm de diám. Pirenos 3-3,5 x 2 mm

3. Láminas foliares papiráceas, tenues, casi siempre con el margen entero en hojas adultas, ápice generalmente agudo, zona apical plana cerca del nervio medio. Árboles, a veces con el follaje caedizo en invierno

I. brevicuspis

3'. Láminas foliares ligeramente coriáceas, con el margen espaciadamente pauciaserrado, ápice siempre muy agudo, zona apical deprimida cerca del nervio medio. Árboles o arbustos siempre perennifolios

I. microdonta

2'. Láminas foliares grandes, coriáceas, algo crasas, hasta 115 x 55 mm, con el ápice obtuso-mucronado o emarginado-mucronado, raro agudo. Pétalos de borde ciliolado o papiloso en ocasiones, grandes, de (3) 4 (5) 5 2-3 mm. Fruto globoso o elipsoide, grande, de 7-9 mm de diám. Pirenos de 4-6 x 2-3 mm

I. theezans

1'. Hojas adultas con láminas de margen casi en su totalidad regularmente aserrado. Inflorescencias axilares de nomófilos en dicasios solitarios o en parejas; también en fascículos corimboides de dicasios. Pirenos con la cara dorsal notoriamente surcada

2. Arbustos, más raro arbolitos bajos. Láminas foliares pequeñas, estrechas, oblanceoladas, obovadas o más raro elípticas, no mayores de 85 x 30 mm. Inflorescencias axilares de nomófilos nunca en fascículos corimboides, pero sí en ejes unifloros o en dicasios (3) 7-floros solitarios o en parejas. Borde de los sépalos siempre ciliado

I. dumosa* var. *guaranina

2'. Árboles. Láminas foliares mayores, anchas, obovadas, elípticas, oblongas, oblanceoladas u ovadas, con frecuencia de 100 (250) x 50 (100) mm. Inflorescencias axilares de nomófilos en fascículos corimboides o en dicasios solitarios. Borde de los sépalos nunca ciliado

3. Todos los individuos siempre perennifolios. Láminas foliares de hasta 250 x 100 mm. Tipo predominante de inflorescencia: fascículos corimboides de 3-11 ejes, unifloros o dicasios 3 (7)-floros, (raramente dicasios 3-floros solitarios) en las axilas de los nomófilos

I. paraguariensis

3'. Algunos individuos total o parcialmente caducifolios en invierno. Láminas foliares no mayores de 140 x 70 mm. Tipo predominante de inflorescencia: dicasios 3-floros o ejes unifloros solitarios en las axilas de los nomófilos, muy raro en fascículos corimboides de ejes unifloros o de dicasios en las axilas de nomófilos

I. argentina

IV. Información climática

i. Temperaturas.

Las temperaturas mínimas, máximas y medias diarias se situaron dentro de los valores normales para la descripción climática de la zona (**Figura II**) durante el periodo del experimento (**Figuras II a IV**).

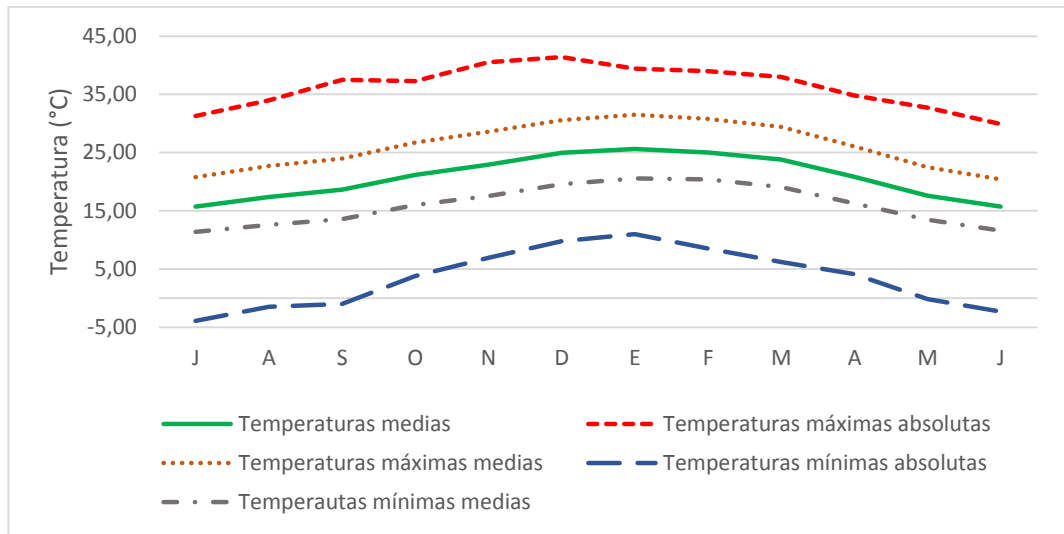


Figura II. Variación histórica (1986-2015) de las temperaturas en la estación meteorológica, Cerro Azul, Misiones.

Las temperaturas mínimas fueron en aumento desde setiembre hasta enero luego comenzaron a descender. Las menores temperaturas se registraron durante el amanecer, entre las 6 y 9 horas. Las primeras temperaturas bajo 0 °C se produjeron en la primera quincena de junio, para el exterior. Dentro del invernáculo nunca fueron inferiores a 0 °C.

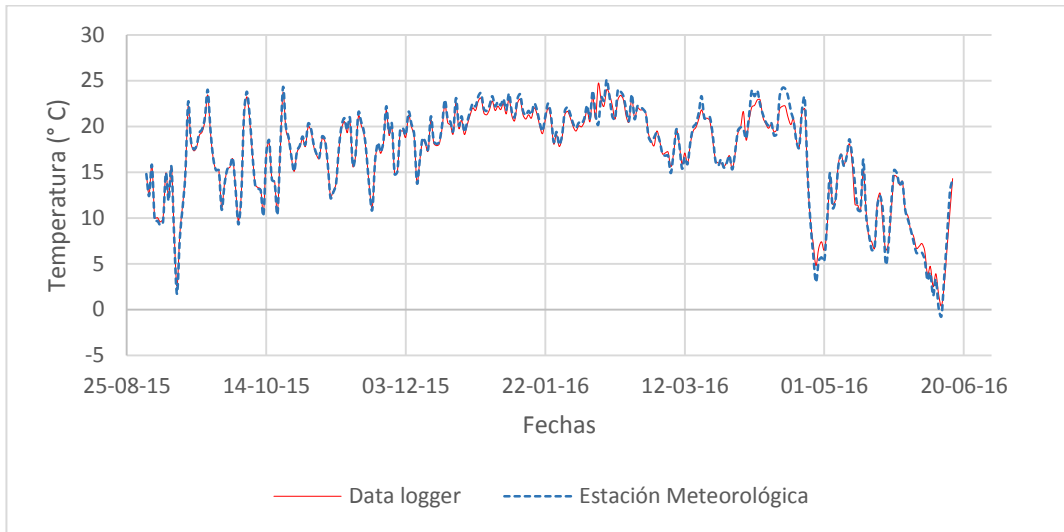


Figura III. Variación de la temperatura mínima, estación meteorológica e invernáculo (D. logger), Cerro Azul, Misiones.

Las temperaturas máximas también aumentaron desde setiembre a enero y descendieron hasta junio. Las máximas temperaturas se registraron entre las 13 y 16 horas. Dentro del invernáculo las temperaturas fueron más altas que el exterior y sólo fueron iguales o menores cuando se aplicaba el riego o ventilación.

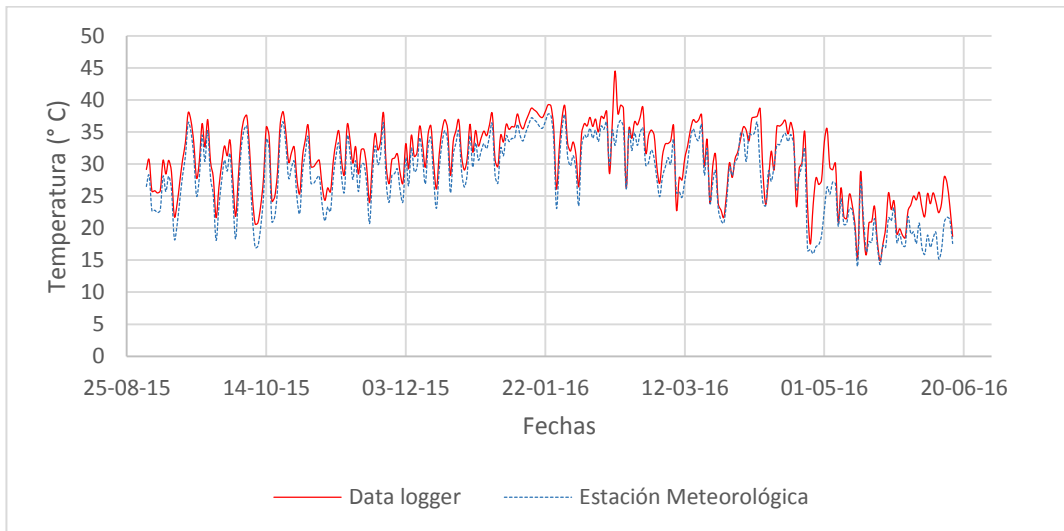


Figura IV. Variación de la temperatura máxima, estación meteorológica e invernáculo (D. logger), Cerro Azul, Misiones.

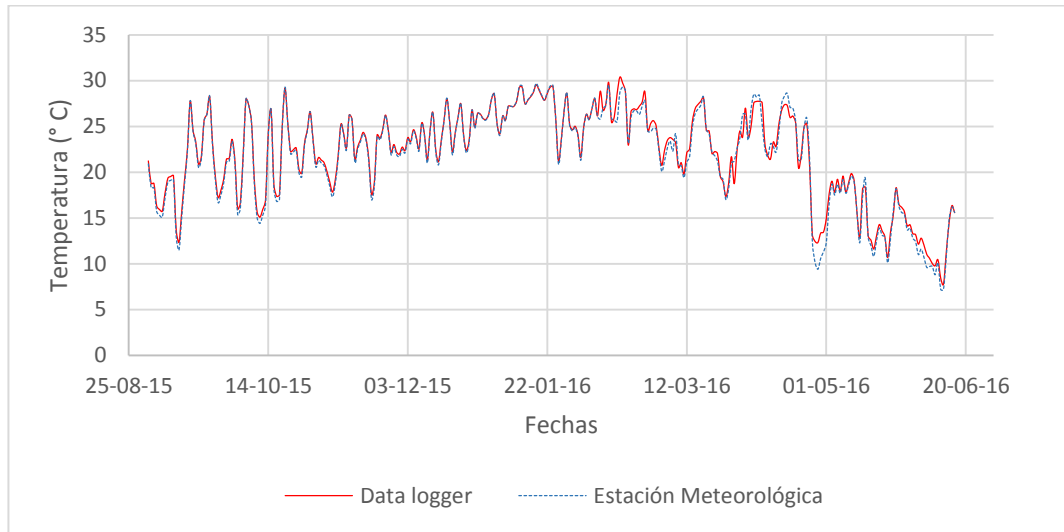


Figura V. Variación de la temperatura media diaria, estación meteorológica e invernáculo (D. logger), Cerro Azul, Misiones.

Las temperaturas tuvieron igual variación diaria registrada por el data logger y la estación meteorológica, altamente correlacionadas, para las mínimas ($r=0,991$), medias ($r=0,989$) y máximas ($r=0,918$). La menor correlación se encontró entre las temperaturas máximas, debido a temperaturas levemente mayores en el invernáculo respecto al exterior. Este cambio de temperaturas dentro del invernáculo se ve reflejado, en general, en una mayor amplitud térmica (**Figura V**).

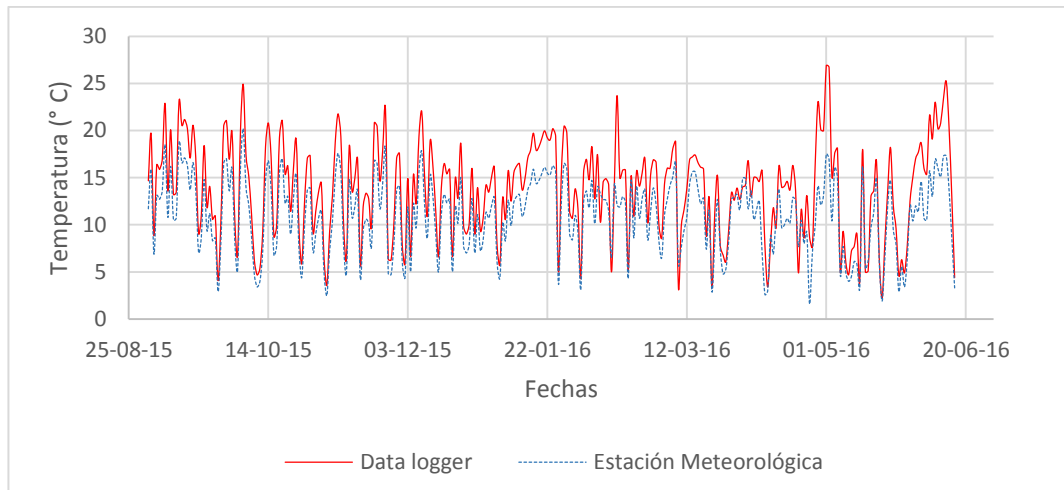


Figura VI. Variación de la amplitud térmica, estación meteorológica e invernáculo (D. logger), Cerro Azul, Misiones.

En las plantas el proceso de crecimiento se ve influenciado por la temperatura debido a la sensibilidad de las reacciones bioquímicas a este factor. En términos generales, bajas temperaturas retardan el crecimiento, mientras que altas temperaturas causan una aceleración (White, 1985). Temperaturas extremas tanto

mínimas como máximas, según la especie, pueden producir problemas adicionales ligado a disociación de proteínas enzimáticas y membranas celulares, en el caso de la yerba mate es una planta capaz de soportar temperaturas extremas ($\leq 0^{\circ}\text{C}$ o $\geq 40^{\circ}\text{C}$) por cortos períodos, pero si éstas se mantienen por un tiempo prolongado, ocurren daños irreversibles (Taiz y Zeiger, 2006 b; Ascon Bieto y Talón, 2000).

ii. Humedad relativa

La variación de humedad relativa en el exterior siguió el patrón normal para la zona geográfica (**Figura VII**).

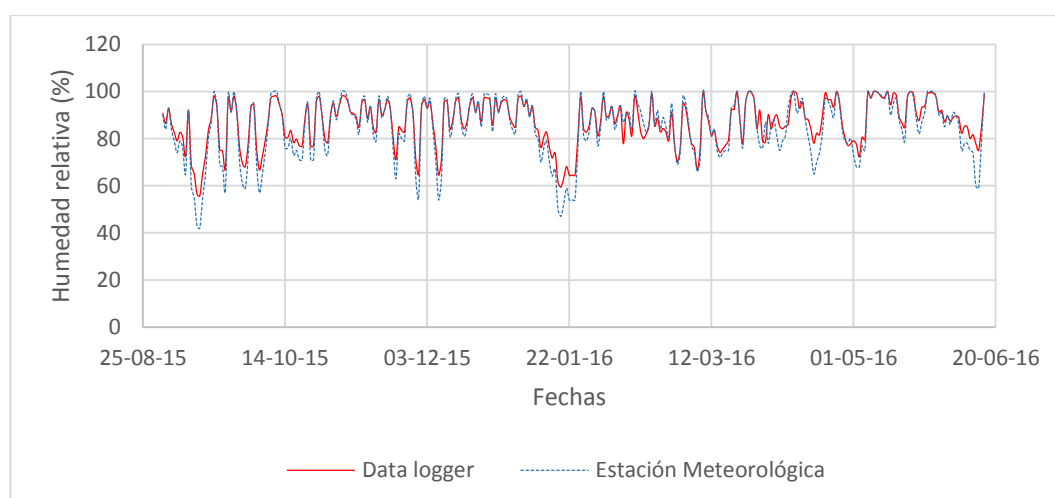


Figura VII. Variación de la Humedad relativa media, estación meteorológica e invernáculo (D. logger), Cerro Azul, Misiones.

Dentro del invernáculo, las temperaturas máximas, mínimas y el efecto del riego, condicionaron la humedad relativa ambiente incrementando su valor medio diario respecto al exterior (**Figura VII**).

La variación de humedad relativa registró los valores máximos en horarios nocturnos (100%) y los valores mínimos durante el mediodía (30%), siendo el promedio diario superior al 70%.

iii. Contenido hídrico de suelo

Considerando el riego por goteo, la demanda evaporativa y la demanda del componente vegetal, determinantes en el balance de agua en el suelo, se mantuvo el contenido de agua en el rango de agua útil, con aplicaciones de riego cada 2 días, durante 10 minutos, con un volumen de 400 ml por maceta. En épocas de mucha demanda, la frecuencia de riego fue mayor. La aplicación del riego explica los picos que se dan en el contenido hídrico del suelo, observados en la **Figura VIII**.

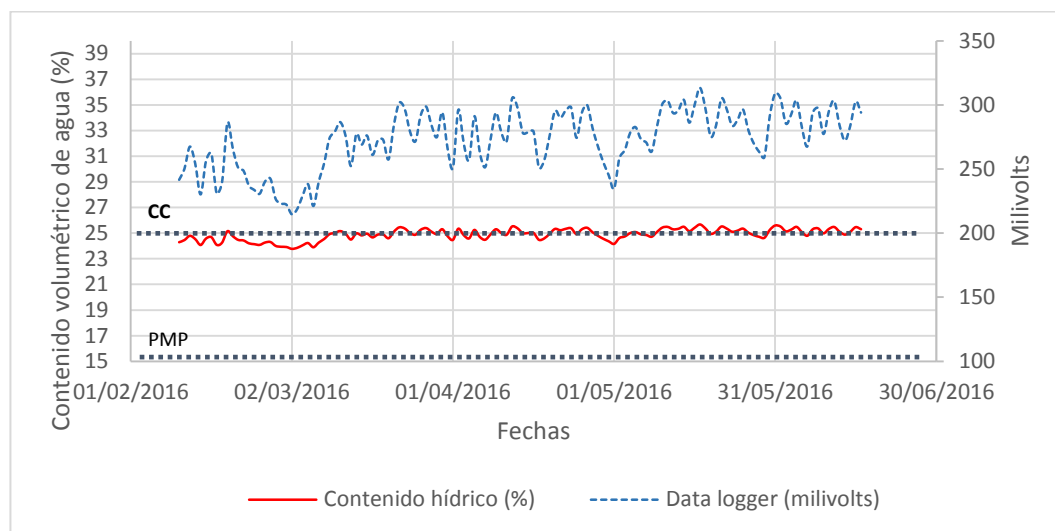


Figura VIII. Variación del contenido hídrico de suelo, invernáculo (D. logger), periodo febrero a junio 2016, Cerro Azul, Misiones.

En diciembre se registró una marchitez temporaria en algunas plantas debido a una falla en el sistema de riego, a excepción de este inconveniente, durante el experimento se mantuvo el contenido hídrico del suelo en condiciones normales de agua útil para las plantas, alrededor del 25% del contenido volumétrico.

En la práctica, se sabe que una planta necesita agua para su crecimiento. Si durante un tiempo seco el contenido de agua del suelo se acerca al punto de marchitez, el crecimiento se reduce o se detiene por completo, tanto por la supresión de las divisiones celulares, como por el menor alargamiento. Muller (1964) menciona que para haya un buen crecimiento, el contenido de humedad del suelo debe permanecer a un nivel no muy inferior a la capacidad de campo, tal como se observó en este trabajo.

iv. Radiación solar

Es de destacar la importancia de la luz para los organismos autótrofos, principalmente para la transformación de la energía lumínica a energía química a través del proceso de fotosíntesis. Pero también la luz afecta la fenología y morfología de una planta, por medio de reacciones de fotoperiodo y elongación, y también las altas intensidades pueden afectar la temperatura foliar. La incidencia de la luz ha sido ampliamente estudiada por muchos autores (Andrade, 1992; Ascon Bieto y Talón, 2000; Bidwel, 2000; Taiz y Zeiger, 2004; Andrade *et al.*, 2005; Bazzo y Rakocevic, 2005; Andrade, 2012), siendo uno de los factores determinantes del rendimiento.

En la **figura IX** se puede observar la heliofanía histórica para la localidad, máxima en los meses de verano y mínima en meses de invierno.

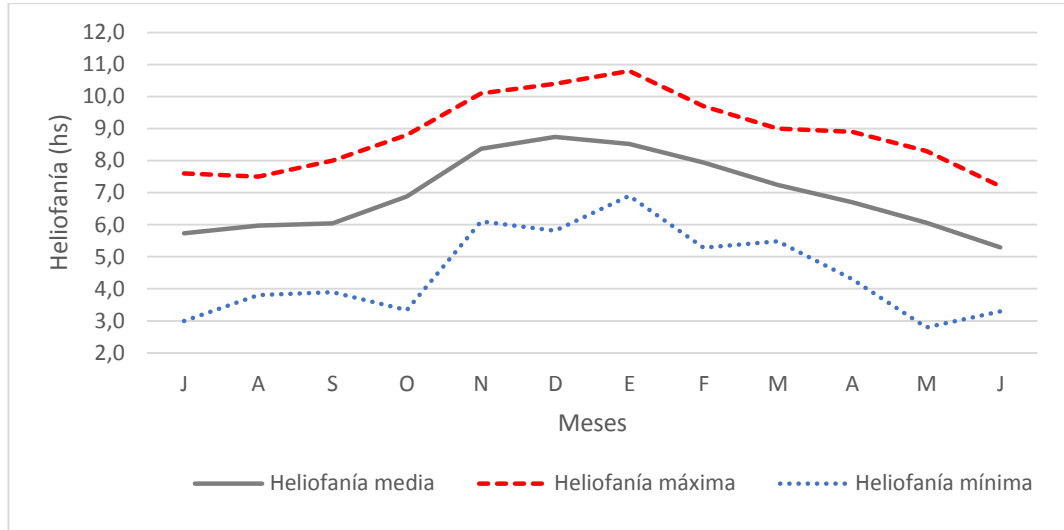


Figura IX. Variación histórica (1987-2015) de la heliofanía en la estación Meteorológica, Cerro Azul, Misiones.

En las condiciones de este estudio, la energía solar incidente fue menor dentro del invernáculo y por lo tanto también la radiación interceptada por las plantas, debido a la sombra del 80% que se utilizó para regular la temperatura dentro del invernáculo. Las horas de luz fueron menores que en el exterior, e influenciadas por los días nublados, con predominancia de luz difusa al amanecer y atardecer.

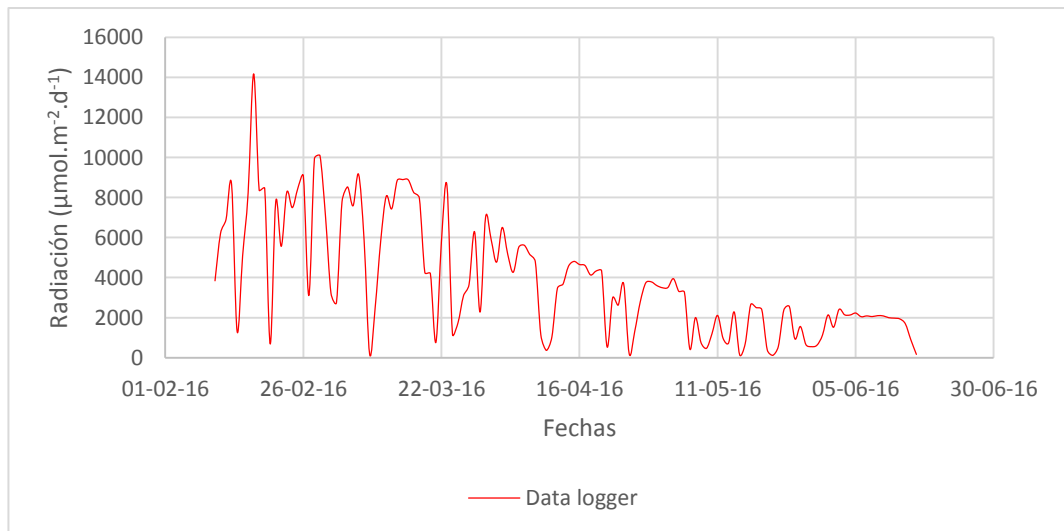


Figura X. Variación de la radiación fotosintéticamente activa diaria en invernáculo (D. logger), periodo febrero a junio 2016, Cerro Azul, Misiones.

En la **Figura X y XI** se puede observar la variación diaria promedio de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) dentro del invernáculo. Los picos representan días soleados y los baches días con mayor nubosidad.

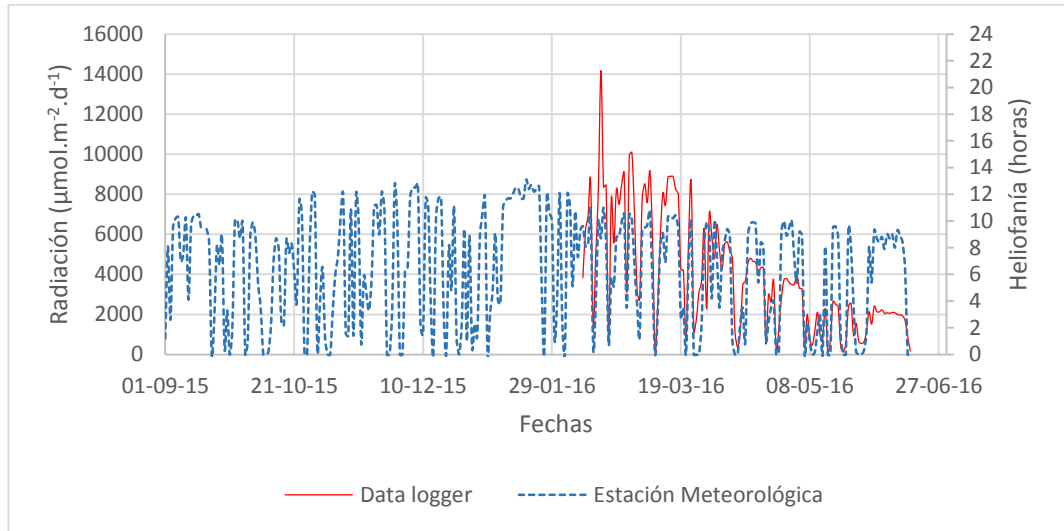


Figura XI. Variación de la radiación fotosintéticamente activa diaria en invernáculo (D. logger) y heliofanía en la estación meteorológica, durante el ensayo, Cerro Azul, Misiones.

Además se aprecia una caída progresiva de PAR a fines de febrero, atribuida a cambios de estación y disminuciones en la duración del día. En consecuencia, cambios en el fotoperiodo, que inciden en el crecimiento de las plantas, lo cual se podría contemplar como una hipótesis ante la caída de hojas que normalmente se produce todos los años en mayor o menor medida en esta época, dentro de los patrones fisiológicamente normales para el cultivo y en relación al balance de fotoasimilados con que la planta llega a esta etapa fenológica, como lo detallan Williams-Linera y Meave (2002) analizando patrones fenológicos de especies tropicales.

V. Síntomas generales en plantas ante desbalances de N y P.

Tabla II. Alteraciones provocadas en las plantas por deficiencias o excesos minerales, Nitrógeno y Fósforo. (Adaptado de Malavolta et. al., 1989).

NITRÓGENO

Síntomas de deficiencia	<p>Visibles: Hojas amarillas, inicialmente las más viejas, como resultado de proteólisis. Ángulo agudo entre tallo y hojas Dormancia de yemas laterales Reducción de macollamiento Senescencia precoz</p>
-------------------------	---

	Hojas menores, debido al menor número de células
	Químicos: Bajo tenor de clorofila Producción de otros pigmentos en algunos casos
	Crecimiento: En general disminuido, con posible aumento del largo de raíces.
	Citológicos: Pequeños núcleos Cloroplastos pequeños
	Metabólicos: Reducción en la síntesis de proteínas Alto contenido de azúcares y alta presión osmótica
Síntomas de exceso	En general no identificado, puede haber reducción en la fructificación.
FOSFORO	
Síntomas de deficiencia	Visibles: Color amarillado de las hojas, en un principio las más viejas, poco brillo, color verde azulado o manchas pardas. Ángulos foliares más estrechos Menos macollamiento Yemas laterales dormidas Número reducido de frutos y semillas Atraso en la floración
	Químicos: Aumento de pigmentos rojos o púrpuras en algunas especies Aumento en el contenido de carbohidratos Aumento en la relación P orgánico/P inorgánico
	Anatómicos: Restricción en la diferenciación de tallos
Síntomas de exceso	Deficiencia de magnesio inducida.

VI. Curva de calibración del sensor para la determinación del contenido hídrico de suelo

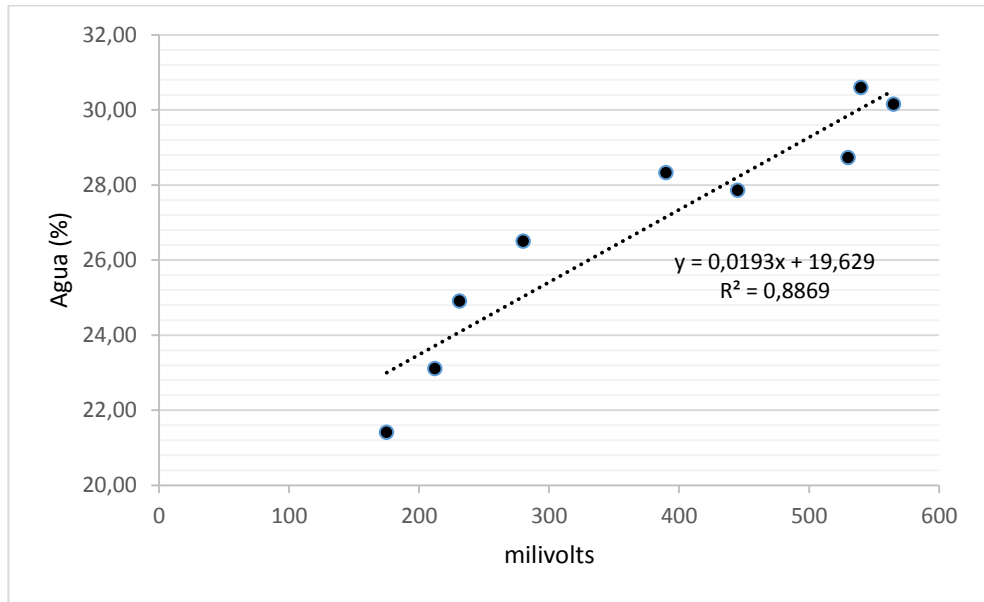


Figura XII. Curva de calibración del contenido de agua de suelo (%) en función de los milivolts observados en sensor para contenido de agua de suelo del datta logger.

VII. Curva de calibración para la determinación de hidratos de carbono solubles totales

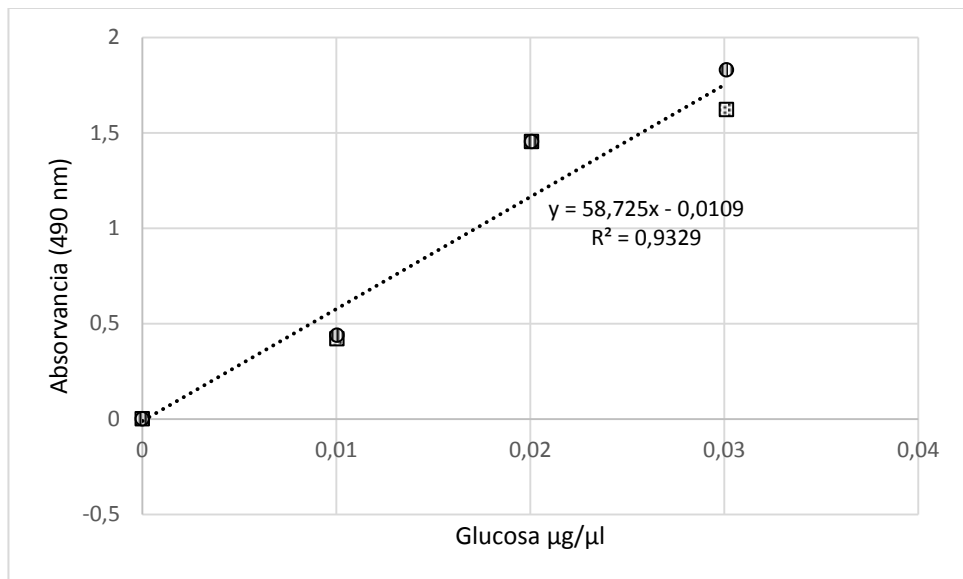


Figura XIII. Calibración de espectrofotómetro, valores de absorbancia (nm) y contenido de glucosa (µg/µl) observados en muestras de concentración creciente de D-glucosa.