

**FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN EL  
CULTIVO DE YERBA MATE (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), AÑO III**

**BENJAMÍN VERA GONZÁLEZ**

Trabajo Final de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Agrarias,  
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del grado de  
Ingeniero Agrónomo.

Universidad Nacional de Asunción  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Carrera de Ingeniería Agronómica  
Área de Suelos y Ordenamiento Territorial  
San Lorenzo - Paraguay  
2023

**FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN EL  
CULTIVO DE YERBA MATE (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), AÑO III**

**BENJAMÍN VERA GONZÁLEZ**

Orientador: Prof. Dr. JIMMY WALTER RASCHE ÁLVAREZ  
Co-Orientador: Prof. Dr. DIEGO AUGUSTO FATECHA FOIS

Trabajo Final de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Agrarias,  
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención  
del Título de Ingeniero Agrónomo.

Universidad Nacional de Asunción  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Carrera de Ingeniería Agronómica  
Área de Suelos y Ordenamiento  
Territorial  
San Lorenzo, Paraguay  
2023

Universidad Nacional de Asunción  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Carrera de Ingeniería Agronómica

**FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO  
EN EL CULTIVO DE YERBA MATE (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)  
AÑO III**

Este Trabajo Final de Grado fue aprobado por la Mesa Examinadora  
como requisito parcial para optar por el grado de Ingeniero Agrónomo,  
otorgado por la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de  
Asunción

Autor: **Benjamín Vera González** .....

**Miembros del Comité Asesor:**

Orientador: Ing. Agr. Dr. Jimmy Walter Rasche Álvarez.

Co-orientador: Ing. Agr. Dr. Diego Augusto Fatecha Fois.

**Miembros de la Mesa Examinadora**

Ing. Agr. Dr. Jimmy Walter Rasche Álvarez .....

Ing. Agr. Dr. Diego Augusto Fatecha Fois .....

Ing. Agr. Mg. Cristian Andrés Britos Benítez .....

San Lorenzo, 19 de diciembre de 2023

**DEDICATORIA**

A mi madre: María Lorena González Ayala.

A mi hermana: Ana Paula Vera González

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre, quien me acompaño incondicionalmente desde el primer momento y siempre me incentivo a seguir adelante para alcanzar mis objetivos a pesar de las dificultades.

A mi hermana Ana Paula quien siempre estuvo a mi lado dándome recomendaciones para mejorar y acompañándome durante los años de carrera de distintas maneras, y a mi hermano Matías que siempre fue un ejemplo a seguir desde mis primeros años de vida.

A mi abuela Ana María, mis tíos y primos quienes siempre estuvieron a mi lado a lo largo de estos años, motivándome a lograr mis objetivos.

A mis compañeros y amigos de la Facultad de Ciencias Agrarias, el Colegio Santa Clara y el Colegio San José con quienes compartí largas jornadas de estudio y muchas risas, por estar siempre en los buenos y malos momentos.

A todos los profesores, quienes contribuyeron a mi formación académica, principalmente a mi orientador, el Prof. Ing. Agr. (Dr.) Jimmy Rasche, por confiar en mis capacidades e impulsarme a mejorar. Por la paciencia y las recomendaciones las cuales me ayudaron a culminar esta etapa de la mejor manera.

Al Programa Universitario de Becas para la Investigación «*Andrés Borgognon Montero*» (PUBIABM) y a la Ganadera 13 de Mayo S.A., por el apoyo técnico, científico y financiero para desarrollar y concluir mi tesis de grado en la carrera de ingeniería agronómica.

## FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN EL CULTIVO DE YERBA MATE (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) AÑO III

Autor: BENJAMÍN VERA GONZÁLEZ

Orientador: PROF. ING. AGR. (DR.) JIMMY WALTER RASCHE ÁLVAREZ

Co-Orientador: PROF. ING. AGR. (DR.) DIEGO AUGUSTO FATECHA FOIS

### RESUMEN

La yerba mate es una especie nativa de la región sur del continente americano, siendo de gran importancia socioeconómica y cultural en la región. Las partes comerciales son las hojas y ramas delgadas, que extraen grandes cantidades de NPK del suelo. La fertilización adecuada es crucial para mantener altos rendimientos en la producción de la yerba mate. El trabajo tuvo como objetivo general evaluar el efecto de la fertilización con dosis crecientes de N, P y K en el tercer año de cosecha comercial. El experimento fue realizado en la compañía San Antonio, distrito de San Alberto, departamento de Alto Paraná, en el periodo de julio de 2022 a julio de 2023, en una plantación de yerba mate de 6 años de edad. Se realizaron 3 experimentos independientes con un diseño experimental de bloques completos al azar, establecidos con seis tratamientos (0; 30; 60; 90; 120; y 150 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O) y cuatro repeticiones, totalizando 24 unidades experimentales por experimento. Las variables evaluadas fueron el rendimiento comercial, rendimiento no comercial, rendimiento total, concentración de N, P y K en hojas, y niveles de P y K en el suelo posterior a la cosecha. Para el análisis estadístico los resultados fueron sometidos al test de normalidad, análisis de varianza y las medias fueron comparadas por el Test de Tukey al 5% de probabilidad de error. No se observaron diferencias significativas en la producción de materia verde con dosis crecientes de N, P y K con rendimientos totales de 7.729, 5.703 y 3.968 kg ha<sup>-1</sup> en promedio respectivamente. Las concentraciones de P foliar presentaron diferencias significativas alcanzando un nivel máximo de 2,4 mg kg<sup>-1</sup> con 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, por otra parte las concentraciones de N y K en hoja no presentaron diferencias significativas. Los niveles de P y K en el suelo posterior a la cosecha presentaron diferencias estadísticas significativas, en ambos casos se observaron aumentos lineales con niveles máximos de 39 mg kg<sup>-1</sup> de P y 0,37 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de K. La aplicación de dosis crecientes de NPK no influyeron en la producción de materia verde comercial, no comercial y total y en los contenidos de N y K en las hojas, sin embargo aumentan los tenores de P y K en el suelo a 0-20 cm de profundidad y las concentraciones de P foliar.

**PALABRAS-CLAVE:** yerba mate, fertilización, dosis creciente, N-P-K, hoja, producción de materia verde.

# FERTILIZAÇÃO COM NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO NA CULTURA DE ERVA MATE (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) ANO III

Autor: BENJAMÍN VERA GONZÁLEZ

Orientador: PROF. ING. AGR. (DR.) JIMMY WALTER RASCHE ÁLVAREZ

Co-Orientador: PROF. ING. AGR. (DR.) DIEGO AUGUSTO FATECHA FOIS

## RESUMO

A erva-mate é uma espécie nativa da região sul do continente americano, sendo de grande importância socioeconômica e cultural na região. As partes comerciais são as folhas e galhos finos, que extraem grandes quantidades de NPK do solo. A adubação adequada é fundamental para a manutenção de altas produtividades na produção de erva-mate. O objetivo geral do trabalho foi avaliar o efeito da adubação com doses crescentes de N, P e K no terceiro ano de colheita comercial. O experimento foi conduzido na empresa San Antonio, distrito de San Alberto, departamento de Alto Paraná, no período de julho de 2022 a julho de 2023, em uma plantação de erva-mate com 6 anos de idade. Foram realizados 3 experimentos independentes, em delineamento experimental de blocos ao acaso, estabelecidos com seis tratamentos (0; 30; 60; 90; 120; e 150 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O) e quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais por experimento. As variáveis avaliadas foram produtividade comercial, produtividade não comercial, produtividade total, teores foliares de N, P e K e teores de P e K no solo após a colheita. Para a análise estatística, os resultados foram submetidos ao teste de normalidade, análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Não foram observadas diferenças significativas na produção de matéria verde com doses crescentes de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, com produtividades totais de 7.729, 5.703 e 3.968 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, respectivamente. As concentrações foliares de P apresentaram diferenças significativas, atingindo um teor máximo de 2,4 mg kg<sup>-1</sup> com 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, por outro lado, as concentrações foliares de K não apresentaram diferenças significativas. Teores de P e K no solo pós-colheita apresentaram diferenças estatisticamente significantes, aumentos lineares foram observados em ambos os casos com níveis máximos de 39 mg kg<sup>-1</sup> de P e 0,37 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de K. A aplicação de doses crescentes de NPK não influenciou a produção de matéria verde comercial, não comercial e total e os teores foliares de N e K, porém aumentou os teores de P e K no solo na profundidade de 0-20 cm e os teores foliares de P.

**PALAVRAS-CHAVE:** erva-mate, adubação, dose crescente, N-P-K, folha, produção de matéria verde.

**FERTILIZATION WITH NITROGEN, PHOSPHORUS AND POTASSIUM IN  
THE CULTIVATION OF YERBA MATE (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) YEAR  
III**

Author: BENJAMÍN VERA GONZÁLEZ

Adviser: PROF. ING. AGR. (DR.) JIMMY WALTER RASCHE ÁLVAREZ

Co-Adviser: PROF. ING. AGR. (DR.) DIEGO AUGUSTO FATECHA FOIS

**ABSTRACT**

Yerba mate is a species native to the southern region of the American continent, being of great socioeconomic and cultural importance in the region. The commercial parts are the thin leaves and branches, which extract large amounts of NPK from the soil. Proper fertilization is crucial to maintaining high yields in yerba mate production. The general objective of the study was to evaluate the effect of fertilization with increasing doses of N, P and K in the third year of commercial harvest. The experiment was carried out at the San Antonio company, district of San Alberto, department of Alto Paraná, in the period from July 2022 to July 2023, in a 6-year-old yerba mate plantation. 3 independent experiments were performed with a randomized complete block experimental design, established with six treatments (0; 30; 60; 90; 120; and 150 kg ha<sup>-1</sup> of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O) and four replications, totaling 24 experimental units per experiment. The variables evaluated were commercial yield, non-commercial yield, total yield, concentration of N, P and K in leaves, and levels of P and K in the soil after harvest. For the statistical analysis, the results were subjected to the normality test, analysis of variance and the means were compared by the Tukey Test at 5% probability of error. No significant differences were observed in green matter production with increasing doses of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O with total yields of 7,729, 5,703 and 3,968 kg ha<sup>-1</sup> on average respectively. Foliar P concentrations showed significant differences, reaching a maximum level of 2.4 mg kg<sup>-1</sup> with 120 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, on the other hand, leaf K concentrations did not show significant differences. The levels of P and K in the post-harvest soil showed statistically significant differences, in both cases linear increases were observed with maximum levels of 39 mg kg<sup>-1</sup> of P and 0.37 cmolc kg<sup>-1</sup> of K. The application of increasing doses of NPK did not influence the production of commercial, non-commercial and total green matter and the contents of N and K in the leaves, however they increased the P and K levels in the soil at 0-20 cm depth and the concentrations of foliar P.

**KEY WORDS:** yerba mate, fertilization, increasing dose, N-P-K, leaf, green matter production.

## LISTA DE CONTENIDOS

CONTENIDO	Página
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
RESUMEN.....	v
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE TABLAS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE ANEXOS.....	xii
LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	xiii
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Origen, características botánicas y usos.....	3
2.2 Producción y comercialización de la yerba mate.....	4
2.3. Manejo del cultivo.....	5
2.4 Fertilización en el cultivo de yerba mate .....	7
2.5 Nitrógeno en el suelo y en la yerba mate .....	8
2.6 Fósforo en el suelo y en la yerba mate.....	11
2.7 Potasio en el suelo y en la yerba mate.....	14
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	17
3.1 Localización y caracterización del área experimental .....	17
3.1.1 Suelo y clima.....	17
3.2 Tratamientos y diseño experimental.....	18
3.3 Instalación y manejo del cultivo .....	18
3.3.1 Cuidados culturales .....	19
3.3.2 Fertilización.....	19
3.3.3 Cosecha .....	19
3.4 Variables de medición .....	20
3.5 Método de análisis de datos .....	20
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	22
4.1 Efecto de la aplicación de dosis de nitrógeno en la yerba mate.....	22
4.1.1 Rendimiento de materia verde .....	22
4.1.2 Concentración de nitrógeno en hojas .....	24
4.2 Efecto de la aplicación de dosis de fósforo en la yerba mate.....	25
4.2.1 Rendimiento de materia verde .....	25

4.2.2 Concentración de fósforo en las hojas .....	27
4.2.3 Tenores de fósforo en el suelo.....	28
4.3 Efecto de la aplicación de dosis de potasio en la yerba mate.....	30
4.3.1 Rendimiento de materia verde .....	30
4.3.2 Concentración de potasio en hojas.....	32
4.3.3 Tenores de potasio en el suelo.....	33
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
5.1. Conclusión .....	36
5.2. Recomendaciones.....	37
6. REF ERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
7. ANEXOS.....	43

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características químicas y textura del suelo del área experimental. San Alberto, 2021. ....	18
<b>Tabla 2.</b> Rendimiento de materia verde en la yerba mate en función a la aplicación de dosis crecientes de N. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	22
<b>Tabla 3.</b> Concentración de N en el tejido foliar de yerba mate por efecto de la aplicación de dosis de N. San Alberto. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	24
<b>Tabla 4.</b> Rendimiento de materia verde en la yerba mate en función a la aplicación de dosis crecientes de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	26
<b>Tabla 5.</b> Concentración de P en el tejido foliar de yerba mate por efecto de la aplicación de dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . San Alberto. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	28
<b>Tabla 6.</b> Tenores de P extraíble en el suelo. ....	29
<b>Tabla 7.</b> Rendimiento de materia verde en la yerba mate en función a la aplicación de dosis crecientes de K <sub>2</sub> O. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	31
<b>Tabla 8.</b> Concentración de K en el tejido foliar de yerba mate por efecto de la aplicación de dosis de K <sub>2</sub> O. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	32

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización del área experimental. Compañía San Antonio, distrito de San Alberto, departamento de Alto Paraná. ....	17
<b>Figura 2.</b> Tenores de K extraíble en el suelo.....	34

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Tabla general de datos de las variables evaluadas con aplicación de dosis crecientes de nitrógeno. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	43
<b>Anexo 2.</b> Tabla general de datos de las variables evaluadas con aplicación de dosis crecientes de fósforo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	44
<b>Anexo 3.</b> Tabla general de datos de las variables evaluadas con aplicación de dosis crecientes de potasio. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	45
<b>Anexo 4.</b> Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate comercial con aplicación de dosis crecientes de nitrógeno. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	46
<b>Anexo 5.</b> Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate no comercial con aplicación de dosis crecientes de nitrógeno. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	46
<b>Anexo 6.</b> Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate total con aplicación de dosis crecientes de nitrógeno. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	46
<b>Anexo 7.</b> Análisis de varianza de la variable concentración de nitrógeno en las hojas. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	46
<b>Anexo 8.</b> Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate comercial con aplicación de dosis crecientes de fósforo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	47
<b>Anexo 9.</b> Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate no comercial con aplicación de dosis crecientes de fósforo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	47
<b>Anexo 10.</b> Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate total con aplicación de dosis crecientes de fósforo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. .	47
<b>Anexo 11.</b> Análisis de varianza de la variable concentración de fósforo en las hojas. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	47
<b>Anexo 12.</b> Análisis de varianza de la variable nivel de fósforo en el suelo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	48
<b>Anexo 13.</b> Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate comercial con aplicación de dosis crecientes de potasio. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	48
<b>Anexo 14.</b> Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate no comercial con aplicación de dosis crecientes de potasio. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	48
<b>Anexo 15.</b> Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate total con aplicación de dosis crecientes de potasio. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. .	48
<b>Anexo 16.</b> Análisis de varianza de la variable concentración de potasio en las hojas. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023. ....	49
<b>Anexo 17.</b> Análisis de varianza de la variable nivel de potasio en el suelo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.....	49

## LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

**Al** Aluminio.

**K** Potasio.

**N** Nitrógeno.

**P** Fósforo.

**pH** Potencial de hidrógeno.

**K<sub>2</sub>O** Óxido de potasio.

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** Óxido de fósforo.

## 1. INTRODUCCIÓN

La yerba mate (*Ilex paraguariensis* St.-Hil.) es una especie arbórea subtropical nativa de América del Sur, su dispersión natural se encuentra principalmente en la región del Bosque Atlántico, el cual comprende estados de suroeste brasilero, parte del noreste argentino y parte del este de la región Oriental paraguaya, siendo estos tres los principales productores a nivel mundial de la yerba mate. El consumo se da principalmente en Latinoamérica, aunque en los últimos años la comercialización de este producto se está expandiendo hacia otros mercados.

En estado silvestre las plantas pueden llegar a los 15 m de altura, mientras que las plantas que se encuentran en parcelas comerciales y son cosechadas anualmente rondan los 3 metros, la parte comercial de este cultivo son las hojas y ramas delgadas, las cuales extraen del suelo cantidades significativas de nutrientes.

Los nutrientes más extraídos por el cultivo son el nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente, por lo cual es de gran importancia realizar una fertilización adecuada para reponer los mismos y de esta manera obtener un alto rendimiento en la producción de yerba mate. Se pueden estimar los requerimientos nutricionales tanto del suelo como del cultivo a través de una medición de los valores nutricionales de las hojas.

Actualmente en el país la información referente a la fertilización química en el cultivo de yerba mate es bastante limitada, por lo cual es necesario generar información de carácter científico en lo que respecta el uso y las dosis de fertilizantes químicos que puedan ser de provecho para este cultivo, el cual es de gran importancia tanto económica como social para el país.

El trabajo tiene por objetivo general evaluar el efecto de la fertilización con dosis crecientes de nitrógeno, fósforo y potasio en el cultivo de yerba mate de tercer año de producción, esto se logrará mediante la realización de los objetivos específicos, los cuales consisten en evaluar el rendimiento comercial, no comercial y total de materia verde en el cultivo de yerba mate, determinar los tenores de fósforo y potasio en el suelo a 0-20 cm de profundidad y medir la concentración de N, P y K en hojas.

La hipótesis sugiere que mediante las aplicaciones de dosis crecientes N, P y K se producirá un aumento tanto en la producción de la yerba mate, como en la concentración de N, P y K en las hojas de la misma y además se elevarán los tenores de P y K en el suelo.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Origen, características botánicas y usos.

La yerba mate (*Ilex paraguariensis* St.-Hil.), es una especie nativa de la región sur del Brasil, Argentina y Paraguay, siendo de gran importancia socioeconómica y cultural para la región. Se tienen registros del consumo de este cultivo desde la época pre-colonial por parte de los pueblos nativos de América del Sur que se encontraban en la cuenca del Río de la Plata, en ese entonces los nativos se limitaban a extraer las hojas de los matorrales silvestres que se desarrollaban en los sotobosques y las masticaban. Con la llegada de los españoles el consumo de esta se expandió por todo el territorio con influencia española, sin embargo no logró asentarse en el continente europeo como otros productos provenientes de tierras americanas, ya que en ese entonces el té ya contaba con una influencia comercial de gran importancia en esa zona (Gortari 2017).

La yerba mate es una planta perenne dioica que pertenece a la familia de las *Aquifoliáceas*, ya que se caracterizan por ser de tipo arbóreas o menos frecuentemente arbustivas, además poseen hojas simples y flores unisexuadas que dan lugar a frutos carnosos. Su altura promedio ronda entre los 10 a 30 metros en estado silvestre y con un diámetro de altura al pecho (DAP) de entre 50 a 80 cm. El principal componente comercial del cultivo son las hojas y ramas finas las cuales se destinan para la elaboración de infusiones de hojas y ramas finas secas y trituradas, además se la utiliza como suplemento alimenticio ya que posee buenas propiedades medicinales y en menor medida también se utiliza la madera, la cual es destinada para usos secundarios (Capellari et al. 2017).

Al ser una planta subtropical requiere altas temperaturas, entre 20-23°C como promedio anual, llega a soportar heladas ocasionales de hasta 8°C mientras no haya

sido despojada de sus hojas, requiere de altos niveles de humedad relativa tanto en el suelo como en el ambiente lo cual se puede lograr con precipitaciones anuales de alrededor de 1500-2000 mm, principalmente entre los meses de septiembre y febrero, ya que son los meses en los que hay mayor temperatura y que la necesidad de agua en este lapso se acentúa en plantas jóvenes recién trasplantadas al lugar definitivo, por lo tanto es tan importante proveer de una cobertura o protección a las nuevas plantaciones. Además se desarrolla mejor en suelos de textura arcillosa, con buena profundidad efectiva y buen drenaje, se desarrolla bien a suelos ligeramente ácidos con un pH entre 4 y 5,5 y con buena disponibilidad de micronutrientes (Cascales et al. 2014; Wendling y Santin 2015)

Considerando que la parte comercial del cultivo son las hojas y ramas finas es fundamental conocer las características botánicas de las mismas, para así poder determinar los parámetros de la calidad comercial del producto, entre estas características se puede mencionar que las hojas son simples y alternas, con bordes ligeramente aserrados y su tamaño varía entre los 5 y 15 cm, además de que poseen alta persistencia, ya que pueden perdurar hasta 3 años en plantas no cosechadas. El periodo de floración de este cultivo se da principalmente entre los meses de octubre y noviembre (Skromeda 2019).

## **2.2 Producción y comercialización de la yerba mate.**

El hombre ha logrado domesticar la especie logrando potenciar la producción comercial del cultivo. Para lograr una buena adaptación del cultivo es necesario realizar podas sucesivas para mantener a la planta entre los 3 a 6 metros de altura para facilitar el manejo, buscando asegurar altos rendimientos a través de los años. Las podas de producción y el posterior rebrote tienen una incidencia directa en el rendimiento y a la hora de realizarlas se debe considerar la época en la que se realizará, el tipo de corte, el estado fenológico de la planta y la fertilidad del suelo (Capellari et al. 2017).

Las principales áreas de cultivo de la yerba mate coinciden con las zonas de principal dispersión natural, ya que en estas áreas se cuenta con las condiciones edafoclimáticas óptimas para el desarrollo del cultivo. Actualmente Argentina es el mayor productor a nivel mundial, el cual produce aproximadamente el 62 % de la producción total, seguido de Brasil y Paraguay respectivamente. Se estima que anualmente se alcanza las 500.000 t de producción de yerba mate canchada (Skromeda 2019).

En cuanto a la producción a nivel nacional, según datos oficiales del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en el año 2021 el cultivo de yerba mate se encuentra entre los principales cultivos del sector agrícola en el Paraguay, este se encuentra presente tanto en la agricultura familiar campesina como en las grandes fincas. La producción nacional se concentra en la región Oriental, siendo los principales departamentos productores Itapúa, Guairá, Alto Paraná y Caaguazú. En el Paraguay, el área de siembra es de 20.600 hectáreas, de las cuales se obtiene una producción de 104.751 toneladas de hoja verde con rendimiento promedio por hectárea de 5.085 kilogramos.

### **2.3. Manejo del cultivo**

En la actualidad hay una amplia cantidad de yerbales que no logran alcanzar su productividad potencial, esto debe en gran medida a la falta de conocimiento del manejo del cultivo por parte de los productores, otro factor influyente en este aspecto es que no se realiza una reposición de los nutrientes extraídos por la planta, lo cual tiene por consecuencia una degradación gradual de los suelos productivos (Goulart et al. 2022).

Lo ideal es mantener el suelo siempre cubierto y con un manejo de la manera más natural posible, se recomienda utilizar las malezas como aliadas de la producción, eso se logra dejándolas crecer y manejándolas hasta que se incorporen las coberturas de invierno y verano que cumplen su ciclo y quedan sobre la superficie, mediante esta práctica se evita el uso de herbicidas, este recurso se va regenerando, además de evitar

los daños por la exposición directa a los rayos del sol, se logra mejorar las condiciones de infiltración lo cual ayuda a mantener la humedad en el suelo el mayor tiempo posible beneficiando de esta manera al cultivo. Cuando el suelo se encuentra compactado se debe realizar el subsolado, esta práctica debe realizarse cuando la yerba ya no se encuentre en etapa de brotación, la determinación de profundidad en la que se encuentra el suelo compactado se puede realizar fácilmente con una pala (INYM 2020).

El cultivo de yerba mate en conjunto con las actividades silvícolas y cosechas realizadas evitando las acciones mecanizadas en el área influyen positivamente en la estructuración del suelo, mediante la cobertura de hojarasca que se produce de los residuos de cosechas anteriores se fomenta al aumento de la actividad biológica en el área. Estas prácticas son de suma importancia para la conservación de una buena estructura en el suelo, además de que posibilitan el movimiento del P a profundidades de 10-20 cm gracias a los canales que se forman por la actividad de la fauna del suelo y por la descomposición de las raíces que se van renovando de la propia yerba mate (Chepkwony et al. 2001).

Para aumentar la productividad del cultivo en zonas en las cuales se observa que el rendimiento está por debajo del promedio es necesario emplear el uso de plántulas mejoradas, realizar un control adecuado de malezas e implementar el uso de fertilizantes. De acuerdo con la investigación realizada por Goulart et al. (2022), se observó que las tecnologías mencionadas anteriormente son las que presentan un mayor impacto en los niveles de producción de la yerba mate, también mencionan que se observó un efecto negativo en la aplicación de calcáreo, el cual redujo los niveles de productividad, esto puede deberse a que su aplicación se realiza en dosis muy bajas y por lo tanto no se observan efectos en los niveles de producción o podría deberse a que el cultivo tiene una baja respuesta a la aplicación del mismo.

Los mismos autores mencionan que hay una relación inversa entre la altura de las plantas y la productividad de las mismas, para obtener un mayor volumen de materia prima se recomienda realizar podas bajas, mediante esta práctica se busca

alterar la arquitectura de la planta para que sean de tamaño reducido, pero con mayor número de ramificaciones, lo cual se traduciría en un mayor número de hojas y ramas finas. Sin embargo, realizar estas prácticas con mucha frecuencia podría terminar siendo perjudicial, ya que se podría producir un descenso en los niveles productivos.

#### **2.4 Fertilización en el cultivo de yerba mate**

Independientemente a la forma del cultivo, es fundamental realizar la fertilización del suelo, teniendo en cuenta que la materia prima de la yerba mate está compuesta por hojas y ramas delgadas, las cuales extraen del suelo cantidades importantes de nutrientes, los cuales deben reponerse en el suelo (Wendling y Santin 2015). De acuerdo con Capellari et al. (2017) los estudios realizados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en Cerro Azul, Argentina, demostraron que por cada 3.000 kg de hoja verde cosechadas de yerba mate se extraen del suelo, 24,5 kg de N, 7,5 kg de  $P_2O_5$  y 23 kg de  $K_2O$ .

La extracción de los nutrientes del suelo está vinculada al intervalo entre cosechas y al manejo del cultivo. Clayton y Ferreira (2016) afirman que mientras mayor sea el periodo entre cosechas mayor será la exportación de nutrientes del suelo, además mencionan que nos es recomendable tener intervalos de cosecha que superen los 24 meses, ya que posterior a este tiempo, naturalmente las hojas de la yerba mate tienden a caer de manera abrupta.

La fertilización es esencial para un buen desarrollo de la yerba mate, la aplicación de cal se realiza principalmente con el fin de aportar macronutrientes calcio y magnesio y no para elevar el pH, salvo en casos extremos de acidificación y presencia de aluminio, ya que la planta de yerba mate es acidófila, pudiendo desarrollarse normalmente en suelos con pH de hasta 4,5 (Clayton y Ferreira 2016).

Los mismos autores afirman que es posible alcanzar un rendimiento de hasta 20 t ha<sup>-1</sup> de producción de yerba mate en áreas comerciales, para lograr esto es necesario un buen manejo del cultivo y adoptar las nuevas tecnologías, recomiendan

que la plantación se realice en un espaciamiento de 3 metros por hilera y 1,5 metros entre planta, realizando las fertilizaciones de acuerdo con las necesidades del terreno y con un intervalo de cosecha que no supere intervalos de 24 meses.

## **2.5 Nitrógeno en el suelo y en la yerba mate**

Se considera al nitrógeno como el elemento responsable de limitar el desarrollo de la biomasa de la planta, ya que este es el encargado de fomentar la formación de yemas floríferas y fructíferas, favorece al desarrollo del sistema radicular, así como también promueve la absorción de otros nutrientes, además ofrece resistencia a plagas. Actúa en sinergismo con el fósforo y en dosis adecuadas favorecen al desarrollo de la planta. Se lo considera como el macronutriente primario que demuestra más rápidamente su efecto en el crecimiento de las plantas. Plantas con deficiencia de este nutriente denotan síntomas en las hojas viejas, estas se tornan de un color amarillento, además de hojas pequeñas y los tallos tienen un escaso desarrollo quedándose delgados y con pocas ramificaciones (Santin et al. 2013).

El nitrógeno para poder ser aprovechado por las plantas debe encontrarse en forma de amonio o nitrato, en el suelo se encuentra en un porcentaje mayor al 90% en forma orgánica, principalmente en forma de anión  $\text{NO}_3^-$ , aproximadamente en un 95 %, en esta forma este nutriente es altamente lixiviado fuera del rango de absorción de raíces, en un menor porcentaje el nitrógeno se encuentra también en forma de catión  $\text{NH}_4^+$ . La disponibilidad de este nutriente se encuentra estrechamente relacionado al porcentaje de materia orgánica que posee el suelo, se estima que por cada 1 % de materia orgánica mineralizada que posee el suelo se liberan alrededor de 20 a 30 kg de nitrógeno. Al ser un nutriente muy dinámico es muy dependiente de las condiciones climáticas y del suelo, ya que se encuentra en un mayor porcentaje en forma de nitratos tiene tendencia a lixiviarse fácilmente en periodos de lluvias intensas, por lo cual se siempre es recomendable realizar la fertilización por etapas en periodos críticos del crecimiento del cultivo (Sengik 2003).

En la actualidad no existe la información técnico-científica necesaria para realizar una recomendación racional de la aplicación de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de yerba mate, lo cual supone un riesgo para mantener los niveles de producción que permitan la rentabilidad del cultivo. Sin embargo cabe resaltar que a pesar de que los experimentos realizados son escasos, en estos se observan una tendencia positiva en lo que refiere a la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Santin et al. 2019).

De acuerdo con la Souza et al. (2016), la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la plantación debe ser realizada en conjunto con P y K, realizando la aplicación en hoyo o en el surco de plantación. En caso de no haber realizado la fertilización en el hoyo, esta debe ser realizada alrededor de la plántula al menos a 15 cm de la misma. Considerando que la plantación se realice en el mes de julio se recomienda que las siguientes aplicaciones se realicen en los meses de enero y septiembre. La recomendación se realiza dependiendo de la etapa de desarrollo en la que se encuentre el cultivo y teniendo en cuenta el tenor de materia orgánica presente en el suelo.

De acuerdo con los mismos autores en la época de plantación se recomienda que cuando el porcentaje de materia orgánica en el suelo es superior a 5 % se realice la aplicación de 5 kg de N ha<sup>-1</sup>, si este se encuentra entre el 2,6 al 5 % el valor aumenta a 10 kg de N ha<sup>-1</sup>, y cuando el tenor de materia orgánica se encuentra por debajo de 2,5% la aplicación deberá ser de 15 kg de N ha<sup>-1</sup>, los autores afirman que en la época de plantación la fertilización nitrogenada se realiza en menor cantidad que en las etapas siguientes, en las etapas posteriores se recomienda aplicar 10, 20 y 30 kg de N ha<sup>-1</sup> respectivamente, teniendo en cuenta los mismos niveles de materia orgánica que en la etapa de plantación. Es importante considerar que estas recomendaciones fueron realizadas para los Estados de Rio Grande del Sur y Santa Catarina de Brasil, actualmente en el Paraguay no existen estudios que permitan realizar recomendaciones de fertilización para este cultivo que se adecuen a la realidad de las zonas productivas del país, por lo cual se debe recurrir a la información que poseen los países vecinos.

Mediante la aplicación de fertilizantes nitrogenados se observa que en intervalos largos de cosecha los niveles de N y carbono orgánico lábil tienden a disminuir, pero tienden a aumentar cuando el periodo de cosecha es inferior, mientras que en los niveles de N total ocurre lo contrario, es decir, tienden a aumentar con el aumento del intervalo entre cosechas. Siempre que la planta esté bien nutrida, esto se puede determinar a través de los niveles de N en las hojas siendo los niveles óptimos de estas entre 33 y 37 g kg<sup>-1</sup> de N, lo más recomendable es realizar la cosecha cada 18 meses y con dosis de fertilizantes inferiores a 280 kg ha<sup>-1</sup> para maximizar la producción, ya que en este intervalo hay un incremento del 54 % en comparación a la producción con intervalos de cosecha de 12 meses y se logra una efectividad de uso de 42,2 kg kg<sup>-1</sup> de N. Los autores observaron que con dosis de 240 kg ha<sup>-1</sup> se alcanzó el tenor máximo de N en las hojas llegando a 37,2 g kg<sup>-1</sup> y en las ramas gruesas se alcanzó un tenor máximo de 7,6 g kg<sup>-1</sup> (Santin et al. 2019).

Los mismos autores afirman que la yerba mate es un cultivo de alta demanda de N, puesto que observaron respuestas positivas a la fertilización por parte del cultivo aun en suelos con altos niveles de carbono orgánico (29,8 g kg<sup>-1</sup>). Por lo cual es fundamental realizar la aplicación de este nutriente posterior a la cosecha, esto ayuda además a acortar el periodo de recuperación de la planta, al retirar las ramas gruesas se debe incrementar la dosis de fertilizantes nitrogenados en un 10 a 15 %.

López (2021), realizó un experimento en departamento de Alto Paraná, Paraguay, en un suelo de textura franco arcillo arenosa y de baja fertilidad, en el cual, mediante la aplicación de dosis crecientes de N no observó diferencias significativas en el rendimiento de materia verde entre los distintos tratamientos, sin embargo cabe resaltar que el mayor rendimiento se logró al no aplicar fertilizantes nitrogenados, llegando a un rendimiento total de 3.230 kg ha<sup>-1</sup> y el menor rendimiento se observó con las dosis de 60 kg ha<sup>-1</sup> con un rendimiento total de 2.020 kg ha<sup>-1</sup>. La autora menciona que el cultivo se encontraba en el primer año de producción comercial, lo cual pudo ser una de las causas de la baja respuesta del cultivo a los fertilizantes, ya que al ser estos aun jóvenes no se encuentran totalmente desarrollados, otro factor de gran incidencia en el experimento fue la falta de uniformidad genética del cultivo, por

lo cual sería difícil afirmar que el rendimiento disminuyó a causa del uso de los fertilizantes nitrogenados y no debido a un factor genético del mismo.

Ferreira (2022), evaluó el mismo cultivo que López (2021) en el segundo año de producción comercial, realizando los mismos tratamientos, si bien no hubo varianzas significativas entre los tratamientos realizados en el segundo año, si se pudo observar un significativo incremento en el rendimiento total de materia verde promedio en comparación al primer año, alcanzando un promedio de 5.684 kg ha<sup>-1</sup> en el segundo año, mientras que en el primero se mantuvo un promedio de 2.709 kg ha<sup>-1</sup>.

Se observó una tendencia similar en la concentración de N en las hojas, es decir, el nivel de varianza fue mínimo, sin embargo en este caso la mayor concentración en promedio se dio en el primer año, mientras que en el segundo año se observó una leve disminución. El promedio rondó los 22.9 g kg<sup>-1</sup> en el primer año, encontrándose así unos 10 g kg<sup>-1</sup> por debajo de la concentración ideal en las hojas que recomiendan Santin et al. (2019), mientras que en el segundo año el promedio bajó a 19 g kg<sup>-1</sup>. La baja fertilidad y bajo contenido de materia orgánica inicial en el suelo fue un factor determinante en los resultados del experimento y también la edad del cultivo ya que generalmente no se observan respuestas significativas a la fertilización en los primeros años, estas más bien se dan de manera gradual a través de los años con los cuidados culturales correspondientes y una fertilización adecuada (López 2021; Ferreira 2022).

## **2.6 Fósforo en el suelo y en la yerba mate**

El fósforo es de baja movilidad en el suelo y debe ser incorporado cerca de las raíces, es el encargado de acelerar la producción de raíces. Se considera al fósforo como el macronutriente que es necesario en menor cantidad por la planta. Sin embargo, es el nutriente más utilizado en fertilización, esta particularidad se da por la carencia de este elemento en los suelos de las zonas productivas de yerba mate, tiene altos niveles de fijación en estos suelos debido a la tendencia ácida de los mismos. Altos

niveles de estos nutrientes pueden causar inhibición en la absorción de hierro y zinc (Skromeda 2019).

El fósforo se encuentra disponible para las plantas como ion fosfato, y se absorbe preferentemente como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en suelos con el pH ácido. Éste desempeña un papel estructural en muchas moléculas y estructuras celulares (Azcón Bieto y Talón 2008). El P desempeña un papel muy importante en los procesos de transferencia de material genético entre generaciones, ya que es un componente de suma importancia en las sustancias que constituyen los genes y los cromosomas, este nutriente se acumula en grandes cantidades en los frutos donde es esencial para la formación y el desarrollo de semillas, también desarrolla funciones en procesos tales como la fotosíntesis, respiración y el almacenamiento y transferencia de energía, ya que conforman parte de la estructura química del adenosín di-fosfato (ADP) y adenosín tri-fosfato (ATP), que son fuente de energía para una amplia variedad de reacciones químicas dentro de la planta (Munera y Meza 2014).

En los cultivos de yerba mate la respuesta a la fertilización fosfatada y la demanda de la misma varía dependiendo de la edad de copa en la que se realice la cosecha. Pandolfo et al. (2003), realizaron un experimento en un suelo muy arcilloso con un cultivo en fase de producción, el suelo contaba con un nivel inicial de fósforo de  $4,2 \text{ mg L}^{-1}$  y afirman que con dosis anuales de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  se puede mantener una buena producción. No obstante, observaron que la adición anual de  $25 \text{ g}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  por planta incrementó en promedio un 19 % de producción de masa verde acumulada, y además aumentó los niveles de fósforo en el suelo que se encontraban bajos a niveles altos. Mencionan que este aumento se dio debido a que la aplicación de este nutriente se realizó en cantidades muy superiores a los que la planta exporta por medio de las hojas y ramas.

Para la fertilización fosfatada de producción se considera que los niveles de P están por encima del tenor crítico de requerimientos de la yerba mate, por lo tanto para las recomendaciones se tiene en cuenta la reposición de los nutrientes exportados

en la cosecha y las pérdidas del sistema. La aplicación de fertilizantes fosfatados se puede dividir o no dependiendo de la formulación de los mismos (Souza et al. 2016).

La fertilización fosfatada favorece a los tenores de fósforo en el suelo, a la productividad del cultivo, independientemente al intervalo de las cosechas, pero con una dependencia a los niveles de P en las capas más superficiales del suelo, el tenor de P para un desarrollo óptimo del cultivo se da en un rango entre 18,5 y 28,6 mg dm<sup>-3</sup>, además incrementan el contenido total de P en el tejido vegetal, siendo los niveles óptimos entre 1,2 y 1,6 g kg<sup>-1</sup> de P en las hojas. Con dosis de 320 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se puede observar un aumento en los niveles de P en las capas más superficiales del suelo, llegando hasta 12,6 mg dm<sup>-3</sup> en los primeros 10 cm con un intervalo de cosecha de 18 meses. Los autores afirman que un intervalo de 12 meses entre cosechas no es tiempo suficiente para la recuperación de la planta del impacto que estas generan (Santin et al. 2017).

De acuerdo con los mismos autores la eficiencia de la utilización del P es inversamente proporcional a las dosis de fertilizantes aplicadas, ya que se observó que mientras mayores sean las dosis aplicadas la eficiencia de utilización del mismo tiende a disminuir, se pudo observar que el nivel mínimo de aprovechamiento de P se dio a los 12 meses con dosis de 320 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (737 kg kg<sup>-1</sup> de P). Mientras que los niveles de este nutriente en las hojas aumentan linealmente con el aumento de las dosis, el mayor nivel observado se dio a los 18 meses de cosecha con una dosis de 305 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> llegando a tener un contenido de 1,6 g kg<sup>-1</sup> de P, observándose la misma tendencia en las ramas finas, en este caso el tenor máximo fue de 1,8 g kg<sup>-1</sup> y se dio a los 24 meses y en menor proporción las ramas gruesas alcanzaron un nivel máximo de 0,7 g kg<sup>-1</sup> a los 12 meses. A partir de los resultados experimentales, los autores recomiendan que en suelos arcillosos con baja disponibilidad de este nutriente se apliquen dosis menores a 220 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, para intervalos de cosecha de 12 meses, ya que a mayores dosis este quedara fijado en el suelo y no estará disponible para las plantas.

Los resultados de un experimento realizado en Alto Paraná, Paraguay y en un suelo de textura franco arcillo arenosa de baja fertilidad natural, demostró que no se observan diferencias significativas con la aplicación de dosis crecientes de  $P_2O_5$  en el primer año de cultivo comercial, el cual mantuvo un promedio de  $2.749 \text{ kg ha}^{-1}$  de rendimiento total de masa verde. En el segundo año del experimento se observó un aumento significativo en el promedio llegando a los  $7.044 \text{ kg ha}^{-1}$ , pero con un coeficiente de variación bastante bajo entre tratamientos. En ambos años los mayores rendimientos se alcanzaron con  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , pero con mínimas diferencias en comparación a los demás tratamientos (López 2021; Ferreira 2022).

Las mismas autoras pudieron observar que en los niveles de P en el suelo se observa una tendencia contraria a lo que ocurre con el rendimiento de masa total, ya que se observa una ligera disminución en el promedio de los niveles de P en el suelo en el segundo año en comparación al primero, siendo los promedios de  $13,4$  y  $14,4 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente. No obstante el mayor nivel de P en el suelo se observó en el segundo año con la dosis de  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  y el menor tenor se observó en el mismo año en el tratamiento en el que no se realizó la aplicación de fertilizantes.

## **2.7 Potasio en el suelo y en la yerba mate**

Este nutriente es el encargado de formar tallos y raíces fuertes, semillas y hojas gruesas, facilita el movimiento de los nutrientes al interior de la planta. Altos niveles de potasio en el suelo pueden llegar a inhibir la absorción de calcio y magnesio. Según Larriva (2003) como el potasio es un elemento móvil en la planta los síntomas de deficiencia de este aparecen inicialmente en los tejidos viejos en forma de hojas con clorosis en los márgenes, que posteriormente se necrosan en los ápices, diferenciándose con claridad del resto del limbo.

El objetivo de un buen manejo de la fertilización potásica es minimizar las pérdidas del fertilizante aplicado, así como también evitar el agotamiento de este nutriente en el suelo. En el suelo el potasio se comporta como catión monovalente y

es bastante móvil, debido a esto tiene tendencia a lixiviarse fácilmente en suelos con baja CIC, es decir, suelos arenosos (Sengik 2003).

El potasio es absorbido por la planta en forma de  $K^+$ , este no forma compuestos dentro de la planta, de igual manera desarrolla un papel fundamental en distintos procesos de suma importancia para la planta, procesos tales como la fotosíntesis, absorción de agua, síntesis de proteínas y participa en la apertura y cierre de estomas. Alrededor del 90-98 % del potasio en el suelo se encuentra de forma mineral y solo el 1-2 % se encuentra fácilmente disponible, cabe resaltar que de este 1-2 % aproximadamente el 90 % se encuentra fijado, por lo cual no está disponible para las plantas. Se considera que su tenor medio en el suelo es de 0,1 a 0,3  $cmol_c kg^{-1}$  (Werle et al. 2008).

Santin et al. (2014), realizaron un experimento para determinar la influencia de la fertilización potásica y de los intervalos de cosecha en la productividad de la yerba mate y en los niveles de potasio en el suelo y el producto comercial. Realizaron la aplicación de dosis crecientes de 0, 20, 40, 80, 160 y 360  $kg ha^{-1}$  de  $K_2O$  y con intervalos de cosecha de 12, 18 y 24 meses. Mediante el experimento pudieron determinar que el cultivo de yerba mate tiene una respuesta favorable a la aplicación de fertilizantes potásicos, ya que se observó un aumento en el producto comercial cosechado y en ramas gruesas en los tres intervalos de cosecha, en el primer intervalo el mayor rendimiento fue de 12,3  $t ha^{-1}$  de producto comercial, el cual contaba con un nivel de 58  $kg ha^{-1}$  de K, con dosis de 200  $kg ha^{-1}$ , en el siguiente intervalo se logró obtener 18,5  $t ha^{-1}$  con dosis próximas a los 280  $kg ha^{-1}$  y con niveles de K en el producto comercial de 115  $kg ha^{-1}$ , y el ultimo intervalo fue el de mayor productividad logrando alcanzar 28,5  $t ha^{-1}$  con dosis de 320  $kg ha^{-1}$  y con 141  $kg ha^{-1}$  de K en el producto comercial.

Los mismos autores determinaron que el mayor aumento de K en el suelo se dio en la camada 0-10 cm con la dosis más alta y realizando la cosecha a los 12 meses, aumentando los niveles de K en 84,4  $mg dm^{-3}$ , mientras que a los 18 y 24 meses los niveles aumentaron en 72,3 y 36,5  $mg dm^{-3}$  respectivamente. De acuerdo con los

resultados del experimento, afirman que para lograr la máxima productividad en el cultivo de yerba mate es necesario tener altos niveles de K en el suelo, ya que los mayores niveles de producción en los diferentes intervalos se dieron cuando los tenores de K a los 0-10 cm se encontraban entre 95 y 125 mg dm<sup>-3</sup>, por lo cual recomiendan la aplicación K<sub>2</sub>O en dosis de 190, 270 y 360 kg ha<sup>-1</sup>, para los intervalos de cosecha de 12, 18 y 24 meses respectivamente, además mencionan que es de suma importancia una reposición adicional del nutriente en un 20 a 30 % cuando se extraigan las ramas gruesas del cultivo.

Con la aplicación de fertilizantes fosfatados en dosis moderadas se puede lograr un incremento en la producción de materia verde comercial. López (2021), observo este incremento con dosis de 30 y 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, pero con una notable disminución de hasta 74 % en comparación al mayor rendimiento con dosis desde 90 a 150 kg ha<sup>-1</sup>, llegando a rendimientos por debajo del testigo en el cual no se realizó fertilización. Caso contrario se dio en los niveles de K en las hojas, ya que la dosis con la que se obtuvo el mayor rendimiento comercial (60 kg ha<sup>-1</sup>), presento el menor nivel de K en las hojas, con tan solo 8,24 g kg<sup>-1</sup> y el mayor nivel se observó con la mayor dosis (150 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) con la cual se alcanzó un nivel de 11,6 g kg<sup>-1</sup>.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Localización y caracterización del área experimental

El experimento fue realizado en la compañía San Antonio, distrito de San Alberto, departamento de Alto Paraná, a  $24^{\circ}59'25''\text{S}$  y  $55^{\circ}03'55''\text{W}$ . El terreno era utilizado anteriormente con cultivo de soja (Figura 1).



**Figura 1.** Localización del área experimental. Compañía San Antonio, distrito de San Alberto, departamento de Alto Paraná.

##### 3.1.1 Suelo y clima

El suelo predominante del área experimental pertenece al sub grupo Rhodic Paleudult, el cual se caracteriza por poseer una baja fertilidad química, pero, a su vez, posee buen nivel de humedad para los cultivos durante gran parte del año, es un suelo profundo, de color rojo, con buena capacidad de retención de agua y nutrientes, debido a que presenta horizonte argílico (López et al. 1995).

En la tabla 1 se observan algunas propiedades químicas y la textura del suelo antes de la implantación del experimento.

**Tabla 1.** Características químicas y textura del suelo del área experimental. San Alberto, 2021.

Prof. Cm	M.O. %	pH	P mg kg <sup>-1</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		Clase textural
							Na <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup> H <sup>+</sup>	
0-20	1,2	5,3	10,40	0,59	0,43	0,06	0,00	0,12	Franco arcillo arenosa

El terreno del área experimental se encuentra a 290 m.s.n.m. El distrito de San Alberto posee un clima templado húmedo, con precipitaciones significativas, siendo el promedio anual 1700 mm, así también, posee una temperatura de 22°C en promedio (Grassi et al. 2020).

### 3.2 Tratamientos y diseño experimental

Se realizaron tres experimentos independientes, en donde para cada experimento se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, establecidos con seis tratamientos (0; 30; 60; 90; 120; y 150 kg de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O, respectivamente), con cuatro repeticiones, totalizando 72 unidades experimentales (24 unidades experimentales por experimento). Cada unidad experimental constó de 21 m<sup>2</sup>, con 7 m de largo y 3 m de ancho, compuesta por 12 plantas distanciadas por 1,15 m entre plantas y 1,5 m entre hileras.

### 3.3 Instalación y manejo del cultivo

El experimento inició el 20 de junio de 2022 en un cultivo de yerba mate de seis años de edad, plantado en setiembre del 2016, inicialmente en asociación con plantas de paraíso (*Melia azedarach* L.) durante los primeros dos años del experimento, en la actualidad las plantas de paraíso fueron retiradas de la parcela experimental. En el año 2021 el experimento fue evaluado por López (2021), mientras que en el segundo año la evaluación fue realizada por Ferreira (2022).

### **3.3.1 Cuidados culturales**

El control de malezas fue realizado mediante rosado con tractor entre melgas, y con azada entre plantas. Mientras que el control de plagas se realizó mediante aplicación de imidacloprid a una dosis de 5 g por cada 20 L de agua, para el control del rulo de la yerba mate (*Gyropsylla spegazziniana*), en dos ocasiones, a los 30 y 120 días desde la instalación del experimento.

### **3.3.2 Fertilización**

Las fuentes de N, P y K utilizadas fueron la urea; el superfosfato triple, y el cloruro de potasio, respectivamente. La fertilización se realizó de forma manual al voleo, aplicando cada dosis de N, P y K en cada unidad experimental correspondiente. Para el experimento con N, en sus dosis utilizadas (0, 30, 60, 90, 120 y 150 kg ha<sup>-1</sup>), la aplicación fue realizada en dos etapas. En la primera, se aplicó hasta una dosis de 30 kg ha<sup>-1</sup> en el momento de la instalación del experimento, la aplicación del restante fue realizada en cobertura 90 días después para completar las dosis, esto considerando las recomendaciones técnicas para la aplicación de este fertilizante, ya que el mismo es susceptible a pérdidas por volatilización y lixiviación. En tanto el P, como el K fueron aplicados en su totalidad al momento de la instalación del experimento. Asimismo, fueron aplicados P y K en el experimento con N, N y K en el experimento con P, y P y N en el experimento con K como fertilización complementaria, en dosis de 120, 80 y 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O, respectivamente.

### **3.3.3 Cosecha**

La cosecha fue realizada de manera manual retirando aproximadamente el 90% de la copa, utilizando tijeras de podar, a un año un mes después de la poda de formación, en fecha 17 de julio de 2023, considerando el inicio de la etapa de reposo invernal de las plantas.

### 3.4 Variables de medición

**Rendimiento de materia verde comercial, no comercial y total:** se realizó la cosecha de las hojas y ramas menores a 1 cm presentes en las plantas de cada unidad experimental y fueron pesadas con una balanza con precisión de 1 g, los resultados obtenidos fueron expresados  $\text{kg ha}^{-1}$  (Anexos 1, 2 y 3).

**Concentración de N, P y K en hojas:** una muestra compuesta conformada por 15 hojas por unidad experimental fue colectada de las plantas, luego éstas fueron trituradas y posteriormente se determinó el contenido de N, P y K presentes en el tejido vegetal de cada experimento, cuyos resultados fueron expresados en  $\text{g kg}^{-1}$  utilizando la metodología descrita por Tedesco et al. (1995) (Anexos 1, 2 y 3). Los análisis fueron realizados en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional del Este, ubicada en el distrito de Minga Guazú, Departamento de Alto Paraná.

**Tenores de P y K en el suelo:** se colectaron 5 sub-muestras aleatorias de suelo posterior a la cosecha del experimento a una profundidad de 0-20 cm, luego se determinaron los niveles de P y K en el suelo, cuyos resultados fueron expresados en  $\text{mg kg}^{-1}$  y  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  respectivamente, utilizando la metodología descrita por Tedesco et al. (1995) (Anexos 2 y 3). Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Suelos del Área de Suelos y Ordenamiento Territorial, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, situada en el distrito de San Lorenzo, Departamento Central.

### 3.5 Método de análisis de datos

Una vez obtenidos los resultados del experimento, fueron sometidos a un test de normalidad mediante el test de Shapiro-Wilk, luego, se realizó el análisis de varianza (ANOVA), con la utilización del programa estadístico Infostat, para determinar si hubo o no diferencias significativas entre los tratamientos aplicados. Las

medias de los tratamientos que presentaron diferencias estadísticas significativas se ajustaron a curvas de regresión para determinar la dosis óptima del nutriente, además de comparación de medias mediante el test de Tukey al 5% de probabilidad de error. Los resultados obtenidos fueron presentados e interpretados a través de tablas y figuras.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Efecto de la aplicación de dosis de nitrógeno en la yerba mate

#### 4.1.1 Rendimiento de materia verde

No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en producción comercial y total (Anexos 4 y 5). Los rendimientos promedios comercial y total fueron de 6.553 kg ha<sup>-1</sup> y 7.729 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 2), respectivamente, superando el promedio nacional (5.085 kg ha<sup>-1</sup>) (MAG, 2021). El rendimiento no comercial no presentó diferencias significativas entre tratamientos (Anexo 6) y se observó un rendimiento promedio de 1.176 kg ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 2.** Rendimiento de materia verde comercial, no comercial y total en la yerba mate en función a la aplicación de dosis crecientes de N. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de N	Rendimiento co- mercial	Rendimiento no co- mercial	Rendimiento total
-----kg ha <sup>-1</sup> -----			
0	5.647 a	677 a	6.323 a
30	5.595 a	674 a	6.269 a
60	5.514 a	1.044 a	6.558 a
90	5.162 a	1.239 a	6.401 a
120	8.207 a	1.358 a	9.566 a
150	9.193 a	2.066 a	11.259 a
Promedio	6.553	1.176	7.729
CV	39,52 %	61,8 %	39,1 %

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test Tukey P≤5%)

Posiblemente no se observaron diferencias significativas debido a la alta variabilidad del material genético utilizado en el experimento, considerando que la propagación fue realizada por semillas y no por estacas, observándose así una desigualdad en las plantas del área experimental. Santin et al. (2015) afirman que los

yerbales establecidos mediante propagación por semillas presentan una menor productividad y calidad del producto en comparación a los cultivos que fueron instalados mediante la propagación por estacas.

En el primer López (2021) y segundo año Ferreira (2022) de cosecha comercial no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, y donde los autores mencionan que la posible no respuesta a la fertilización nitrogenada se debió a la edad de las plantas las cuales se encontraban en el primer y segundo año de cosecha comercial respectivamente. Sin embargo se observó un aumento en el rendimiento promedio entre años siendo 2.412 kg ha<sup>-1</sup> el rendimiento comercial promedio en el primer año, 4.590 kg ha<sup>-1</sup> en el segundo y 6.553kg ha<sup>-1</sup> en el tercer año de cosecha comercial.

Por su parte, Santin et al. (2019) observaron un aumento de la producción comercial en respuesta a las dosis crecientes de N, sin embargo no ocurrió lo mismo con la producción no comercial, contrario a lo observado en San Alberto en donde no se observó un incremento de la producción tanto comercial como no comercial. Observaron el mayor rendimiento comercial con una dosis máxima de 203 kg ha<sup>-1</sup> de N con una producción máxima de 2,8 t ha<sup>-1</sup> en un intervalo de 12 meses entre cosechas, al aumentar el intervalo a 18 meses observaron un aumento del 54 % de producción en relación a la primera cosecha, por lo cual sugieren que la fertilización con N es de gran importancia para la recuperación de la planta posterior a la cosecha y se deben evitar periodos cortos entre cosechas, ya que esto disminuye la eficiencia del uso de N.

Ribeiro et al. (2008) realizaron un experimento con dosis crecientes de N con sulfato de amonio como fuente, en el cual también observaron un aumento de la productividad en relación a las dosis de N, difiriendo a los resultados observados en San Alberto en donde no hubo diferencias significativas, mediante los resultados del experimento concluyeron que la aplicación de N tiene un efecto positivo en el cultivo de yerba mate hasta una dosis de 52,5 kg ha<sup>-1</sup> de N considerando la curva de regresión, con una producción estimada bastante inferior al promedio obtenido en San Alberto, de tan solo 2.547 kg ha<sup>-1</sup> de producción comercial.

De igual manera Santin et al. (2013) observaron una respuesta positiva a la aplicación de fertilizantes nitrogenados en un cultivo de siete años de edad, ya que observaron un aumento en la producción del cultivo a medida que aumentaron las dosis aplicadas, con una producción máxima estimada de 14,3 t ha<sup>-1</sup> con una dosis de 278 kg ha<sup>-1</sup> de N, dosis ampliamente superior a la dosis máxima aplicada en San Alberto, por lo cual sugieren que existe una alta demanda de este nutriente por parte del cultivo. Además observaron una reducción en la relación de Producción comercial/No comercial, llegando a un nivel mínimo de 3 en la dosis máxima.

#### 4.1.2 Concentración de nitrógeno en hojas

No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cuanto a la concentración de N en el tejido Foliar (Anexo 7). De acuerdo con Santin et al. (2019) los niveles óptimos de este elemento varían entre 33 y 37 g kg<sup>-1</sup> de N en el tejido foliar, mientras que en San Alberto se observó una concentración promedio de 16,78 g kg<sup>-1</sup> de N en el tejido foliar (Tabla 3). Muy por debajo de los niveles recomendados.

**Tabla 3.** Concentración de N en el tejido foliar de yerba mate por efecto de la aplicación de dosis de N. San Alberto. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de N kg ha <sup>-1</sup>	N en el tejido foliar g kg <sup>-1</sup>
0	17,23a*
30	18,28 <sup>a</sup>
60	15,59 <sup>a</sup>
90	17,45 <sup>a</sup>
120	15,28 <sup>a</sup>
150	16,86 <sup>a</sup>
Promedio	16,78
CV	18,43 %

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test Tukey P≤5%)

Posiblemente no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos debido a los periodos de sequía en el área experimental. Ferreira

(2022) menciona que la falta de agua en el suelo limita el correcto desarrollo de la planta y esto a su vez limita el transporte de nutrientes al interior de la planta, al observar mejores cualidades fisiológicas en plantas con un porcentaje de humedad del 80 % en comparación a las que se encuentran por debajo de estos valores.

De acuerdo con Brondani et al. (2008), la concentración de N en las hojas varía según el periodo del año, alcanzando una concentración máxima en el mes de octubre y un valor mínimo en el mes de abril, según estos datos se puede suponer que la ausencia de un aumento significativo en cuanto a esta variable se debe a que las mediciones de la misma se realizaron en una etapa en la cual esta no se encontraba en su punto máximo para realizar las mismas.

En el primer año de cosecha, López (2021) no observó diferencias significativas entre tratamientos, mantuvo una concentración promedio de 22,9 g kg<sup>-1</sup> de N en hojas, superando el promedio del tercer año de cosecha pero de igual manera por debajo de los niveles óptimos. De igual manera, Ferreira (2022) no observó una influencia por parte de las dosis crecientes de N en relación a la concentración de este elemento en las hojas, el nivel promedio disminuyó ligeramente en comparación al primer año de cosecha con una concentración de 19 g kg<sup>-1</sup> en promedio, el cual también fue superior a la concentración promedio observada en el tercer año de cosecha comercial de 16,78 g kg<sup>-1</sup>, observándose así una disminución de este elemento a lo largo de los años de cosecha comercial.

## **4.2 Efecto de la aplicación de dosis de fósforo en la yerba mate**

### **4.2.1 Rendimiento de materia verde**

En cuanto a los resultados obtenidos experimento indican que la fertilización fosfatada no tuvo un impacto significativo en el rendimiento de materia verde, al no observarse diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Anexos 8, 9 y 10), similar a lo observado en el experimento de nitrógeno. En promedio, se registró un rendimiento comercial de 5.071 kg ha<sup>-1</sup>, un rendimiento no comercial de

633 kg ha<sup>-1</sup>, y un rendimiento total de 5.703 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 4). Se observó un rendimiento comercial promedio levemente por debajo del promedio nacional de 5.085 kg ha<sup>-1</sup> (MAG 2021).

**Tabla 4.** Rendimiento de materia verde comercial, no comercial y total en la yerba mate en función a la aplicación de dosis crecientes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rendimiento Comercial	Rendimiento no Comercial	Rendimiento total
-----kg ha <sup>-1</sup> -----			
0	5.972 a	568 a	6.540 a
30	5.651 a	830 a	6.481 a
60	4.491 a	623 a	5.114 a
90	4.007 a	428 a	4.435 a
120	5.758 a	663 a	6.421 a
150	4.545 a	683 a	5.228 a
Promedio	5.071	633	5.703
CV	23,9 %	34,1 %	23,6 %

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test Tukey P≤5%)

Posiblemente no se observaron respuestas a las dosis crecientes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, por las mismas causas mencionadas anteriormente en el rendimiento de materia verde con dosis crecientes de N, teniendo en cuenta la alta variabilidad del material genético, además se presentaron otras dificultades durante el desarrollo del experimento entre las cuales se encuentran periodos de sequias en la zona del área experimental y el ataque de ácaros al cultivo.

López (2021) en el experimento de primer año no observó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, alcanzando un rendimiento comercial promedio de 2.461 kg ha<sup>-1</sup>, menciona que la no respuesta a las dosis crecientes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pudo deberse al corto intervalo de tiempo entre la poda de formación y la cosecha comercial. Por otra parte, Ferreira (2022) en el segundo año de experimentación tampoco observó diferencias significativas entre tratamientos en el segundo año de cosecha comercial en el cual hubo un aumento en el rendimiento promedio en comparación al primer año, con una producción comercial de 5.801 kg ha<sup>-1</sup> en promedio.

Santin et al. (2017) mencionan que para obtener altos rendimientos de materia verde en el cultivo de yerba mate se requieren de altos niveles de P en las capas más superficiales. También observaron un mayor rendimiento con dosis superiores a los 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en un intervalo entre cosechas de 12 meses, además mencionan que mientras más prolongados sean los intervalos entre cosechas mayor será el rendimiento comercial, considerando que un periodo de 12 meses no otorga a la planta el tiempo suficiente para recuperarse del impacto de la cosecha anterior, se puede afirmar que otro factor que limitó al rendimiento de materia verde en San Alberto fue el corto intervalo entre cosechas.

Pandolfo et al. (2003) mencionan baja probabilidad de respuesta por parte del cultivo de yerba mate a la fertilización fosfatada y afirman que con dosis anuales de 50 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se pueden mantener buenos niveles de producción considerando una exportación máxima de 4,6 kg ha<sup>-1</sup> de P por la producción comercial. Por otra parte Santin et al. (2017) observaron respuestas por parte del cultivo a altas dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en un área con bajos niveles de P inicial, determinaron una dosis máxima de 212 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, por lo cual se puede afirmar que la baja respuesta observa en San Alberto pudo deberse a un mayor requerimiento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por parte de la planta para un mejor desarrollo.

#### **4.2.2 Concentración de fósforo en las hojas**

En cuanto a la concentración de P en el tejido foliar se observaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Anexo 11). Se determinó una concentración estimada de P en el tejido foliar de 2,45 g kg<sup>-1</sup> con una dosis máxima de 111 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, considerando la ecuación  $y = -0,0001x^2 + 0,0222x + 1,2194$ ;  $R^2 = 0,8076$  (Tabla 5).

De acuerdo con Santin et al. (2017), los niveles óptimos oscilan entre 1,2 y 1,6 g kg<sup>-1</sup> de P en las hojas, dichos valores fueron superados a partir de la dosis de 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y por los tratamientos posteriores, el promedio se mantuvo dentro de los niveles deseados.

**Tabla 5.** Concentración de P en el tejido foliar de yerba mate por efecto de la aplicación de dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. San Alberto. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg ha <sup>-1</sup>	P en el tejido foliar g kg <sup>-1</sup>
0	0,9 b
30	1,1 ab
60	1,9 ab
90	2,3 a
120	2,4 a
150	2,2 ab
Promedio	1,8
CV	32,5 %
Ecuación	$y = -0,0001x^2 + 0,0222x + 1,2194;$ $R^2 = 0,8076$

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test Tukey P≤5%)

López (2021) no observó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y con un valor promedio de 1,8 g kg<sup>-1</sup> de P en el tejido foliar, menciona que la no respuesta pudo deberse al nivel de acidez del suelo en el área experimental, lo cual dificulta la absorción del P debido a la presencia de óxidos hidratados de Fe y Al, los cuales forman compuestos insolubles con el P. Por su parte Ferreira (2022), tampoco observó diferencias significativas además obtuvo un promedio inferior que el observado por López en el primer año de tan solo 1,15 g kg<sup>-1</sup> de P en el tejido foliar, menciona que esto se debió a las mismas causas expuestas por López.

Santin et al. (2017) observaron un aumento lineal en el contenido de P en el tejido foliar en respuesta a las dosis crecientes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, similar a lo observado en San Alberto, también mencionan que a mayor tiempo entre cosechas aumentan los niveles de P tanto en hojas como en ramas gruesas, sin embargo mencionan que al aumentar los intervalos de cosecha se disminuye el porcentaje total de P en hojas en relación a las ramas gruesas.

#### 4.2.3 Tenores de fósforo en el suelo

En cuanto a los niveles de P en el suelo a profundidades de 0-20 cm posterior a la cosecha, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre

tratamientos (Anexo 12), se observó que los niveles de P en el suelo tienden a aumentar a medida que aumenta la dosis de  $P_2O_5$ , dándose un aumento lineal según la ecuación  $y=0,1855x+7,881$ ;  $R^2 = 0,94$  (Tabla 6).

**Tabla 6.** Tenores de P extraíble en el suelo (0-20 cm) posterior a la cosecha de yerba mate bajo la aplicación de dosis de  $P_2O_5$ . San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de $P_2O_5$ kg ha <sup>-1</sup>	P en el suelo mg kg <sup>-1</sup>
0	11 d*
30	14 cd
60	16 cd
90	23 bc
120	29 ab
150	39 a
Promedio	22
CV	20,3 %
Ecuación	$y=0,1855x+7,881$ ; $R^2 = 0,94$

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test Tukey  $P \leq 5\%$ )

Inicialmente, el suelo del área experimental presentó un nivel bajo de P de 10,4 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla 1). En los primeros dos años del experimento no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y los niveles de P en el suelo se mantuvieron dentro de un promedio similar, siendo de 14,3 mg kg<sup>-1</sup> en el primer año (López 2021) y 13,4 en el segundo (Ferreira 2022), ambas autoras, citando a Souza et al (2006), mencionan que el pH con tendencia ácida del suelo en el área experimental podría haber favorecido la precipitación del P a estados químicos inaccesibles para las plantas, dicha característica posiblemente haya influido en la fijación del fósforo, limitando así su movilidad dentro del suelo. Por otra parte en el tercer año de cosecha comercial se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y un aumento en los tenores de P en el suelo de manera lineal en relación a la dosis aplicada, alcanzando un promedio de 22 mg kg<sup>-1</sup> y un nivel máximo de P en el suelo de 39 mg kg<sup>-1</sup> con la mayor dosis.

Santin et al. (2013) observaron un mayor rendimiento en el cultivo cuando los tenores de P se encontraban entre 18,5 a 28,6 mg dm<sup>-3</sup>, dichos valores fueron obtenidos en San Alberto con las dosis de 90, 120 kg ha<sup>-1</sup>, por lo cual se puede afirmar

que se puede alcanzar niveles óptimos para el desarrollo del cultivo con dosis de 90 a 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en suelos con bajos niveles iniciales de P. Además observaron un aumento lineal en los niveles de P en el suelo, elevando el contenido de este nutriente de 1,9 a 43,0 mg dm<sup>-3</sup> con la mayor dosis aplicada.

De igual manera Santin et al. (2017), comprobaron un aumento lineal en relación a las dosis crecientes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y los niveles P a profundidades de 0-10 cm llegando a 11,1 mg dm<sup>-3</sup> con la dosis máxima aplicada, sin embargo no observaron aumentos muy significativos en la camada de 10-20 cm, mencionan que esto se debió a la dificultad que posee el P para moverse en suelos muy desarrollados ya que tienen gran afinidad con la arcilla que predomina en estos tipos de suelos.

### **4.3 Efecto de la aplicación de dosis de potasio en la yerba mate**

#### **4.3.1 Rendimiento de materia verde**

Los resultados demostraron que la fertilización potásica no influyó en el rendimiento de materia verde, sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Anexos 13, 14 y 15). En el rendimiento de materia verde (comercial, no comercial y total) en función a la aplicación de dosis crecientes de K<sub>2</sub>O (Tabla 7), se observaron los menores rendimientos promedio en comparación a los experimentos de N y P.

El rendimiento no comercial promedio fue de 329 kg ha<sup>-1</sup>, el rendimiento total mantuvo un promedio de 3.968 kg ha<sup>-1</sup>, y se observó un promedio de 3.639 kg ha<sup>-1</sup> de producción comercial, muy por debajo del promedio nacional de 5.085 kg ha<sup>-1</sup> (MAG 2021).

**Tabla 7.** Rendimiento de materia verde en la yerba mate en función a la aplicación de dosis crecientes de K<sub>2</sub>O. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de K <sub>2</sub> O	Rendimiento comercial	Rendimiento no comercial	Rendimiento total
-----kg ha <sup>-1</sup> -----			
0	3.492 a	299 a	3.791 a*
30	3.865 a	295 a	4.160 a
60	3.552 a	492 a	4.044 a
90	3.654 a	348 a	4.002 a
120	3.022 a	266 a	3.288 a
150	4.250 a	274 a	4.524 a
Promedio	3.639	329	3.968
CV	23,6 %	34,12 %	23,91 %

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test Tukey P≤5%)

Al igual que lo observado en los experimentos de N y P, la ausencia de resultados estadísticamente significativos pudo ser ocasionada por la alta variabilidad del material genético debido al material de propagación utilizado, en cuanto a la baja respuesta a las dosis crecientes de K<sub>2</sub>O posiblemente se vieron influenciadas por las condiciones climáticas del área experimental durante el desarrollo del experimento, ya que hubo periodos de sequía, además se observó un ataque de plagas, específicamente ácaros, lo cual pudo influenciar negativamente a los resultados del experimento.

López (2021) observó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cuanto a la producción de materia verde, menciona que el mayor rendimiento se logró con 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O aumentando un 39 % el rendimiento obtenido con el testigo, luego se observó un drástico descenso, por lo cual señala que, al aumentar la dosis de K<sub>2</sub>O aumenta la producción hasta un cierto punto, para posteriormente comenzar a descender, difiriendo con los resultados obtenidos en el tercer año de cosecha en donde el mayor rendimiento se obtuvo con la mayor dosis. López además menciona que la disminución del rendimiento con dosis de a partir de 90 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O pudo deberse a la gran variabilidad entre plantas, ya que estas aún no se encontraban completamente formadas por tratarse de plantas jóvenes, por lo tanto, la aplicación de K<sub>2</sub>O en forma cloruro de potasio a altas dosis pudo haber ocasionado un efecto salino sobre las mismas.

Santin et al. (2016), afirman que lapsos de 12 meses entre cosechas no proporcionan el tiempo suficiente para la recuperación de la planta, generando un desequilibrio en las raíces y las hojas, por lo cual la planta produce reacciones compensatorias buscando un equilibrio entre la parte aérea y las raíces, por lo tanto afirman que entre menor sea el intervalo de tiempo entre cosechas se obtendrán una menor producción foliar y por consiguiente una menor área fotosintética y crecimiento de las plantas. De acuerdo a estos datos se puede suponer que otra variable que produjo la no respuesta por parte del cultivo de yerba mate a las dosis crecientes de  $K_2O$  fue el corto intervalo entre cosechas que imposibilitó una buena recuperación por parte de las plantas. Los mismos autores mencionan una alta demanda por parte del cultivo en K, ya que observaron el mayor rendimiento con una dosis de  $281 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$  y con tenores de  $125$  y  $96 \text{ mg dm}^{-3}$  en las camadas de 0-10 y 0-20 cm respectivamente.

#### 4.3.2 Concentración de potasio en hojas

No se observaron diferencias significativas a nivel estadístico entre tratamientos en los niveles de concentración de K en las hojas (Anexo 16). Se mantuvo una concentración promedio de K en el tejido foliar de  $9,4 \text{ g kg}^{-1}$ . De acuerdo con Santin et al. (2014), para la concentración de K en hojas de yerba mate se considera un nivel adecuado a partir de  $16 \text{ g kg}^{-1}$ , dicho valor no fue alcanzado en los distintos tratamientos aplicados (Tabla 8).

**Tabla 8.** Concentración de K en el tejido foliar de yerba mate por efecto de la aplicación de dosis de  $K_2O$ . San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de $K_2O$ $\text{kg ha}^{-1}$	K en el tejido foliar $\text{g kg}^{-1}$
0	7,9 a*
30	7,8 a
60	8,4 a
90	11,2 a
120	10,2 a
150	10,9 a
Promedio	9,4
CV	22,61 %

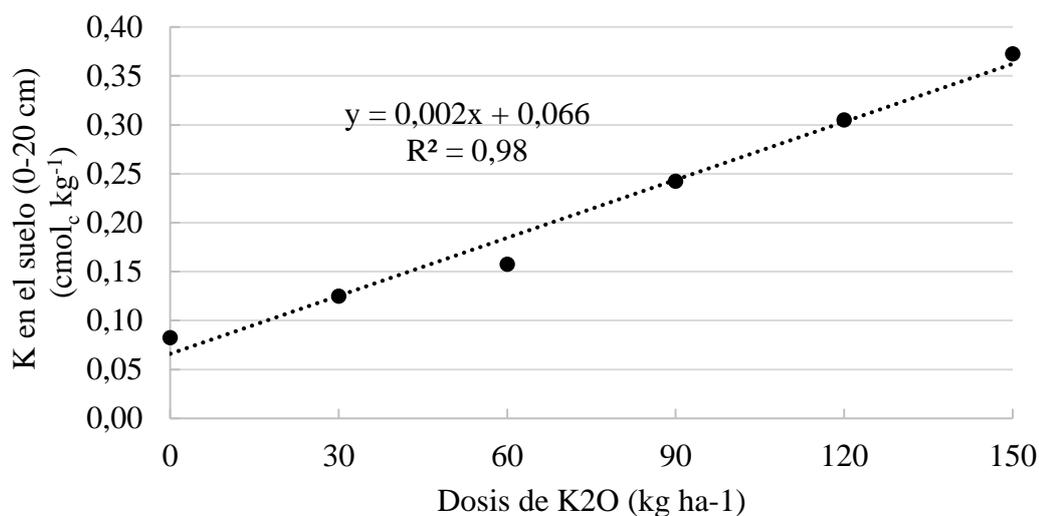
\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test Tukey  $P \leq 5\%$ )

López (2021) observó diferencias significativas entre tratamientos alcanzando un nivel máximo de  $11,6 \text{ g kg}^{-1}$  de K en el tejido foliar con la dosis máxima, sin embargo menciona, citando a Reissmann et al. (1983), que dichos valores se encuentran por debajo de los niveles óptimos, al igual que lo observado en el tercer año de cosecha, los cuales oscilan entre  $14,1$  a  $18,1 \text{ g kg}^{-1}$ . Por otra parte, Ferreira (2022) no observó una influencia por parte la fertilización potásica en las concentraciones de K foliar con una variación entre  $9,5$  y  $11,9 \text{ g kg}^{-1}$  independientemente de las dosis de  $\text{K}_2\text{O}$  aplicadas, similar a lo observado el tercer año de cosecha en San Alberto.

Mientras que Santin et al. (2016), observaron un aumento lineal en los niveles de K foliar en respuesta a la aplicación de dosis crecientes de  $\text{K}_2\text{O}$ , llegando a una concentración estimada de  $17,7 \text{ g kg}^{-1}$  con una dosis máxima de  $281 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ .

#### **4.3.3 Tenores de potasio en el suelo**

Se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cuanto a los tenores de K en el suelo posterior a la cosecha a una profundidad de 0-20 cm (Anexo 17), además se observó un aumento lineal, el cual se ajustó a la ecuación  $y=0,002x + 0,066$ ;  $R^2 = 0,98$  (Figura 2), siendo  $0,37 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  el mayor nivel de K en el suelo, lo cual se observó con la mayor dosis y se mantuvo un nivel promedio de  $0,21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de K.



**Figura 2.** Tenores de K extraíble en el suelo (0-20 cm) posterior a la cosecha de yerba mate bajo la aplicación de dosis de K<sub>2</sub>O. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

López (2021) no observó diferencias significativas entre tratamientos, sin embargo tuvo el mismo promedio de K en el suelo que en el tercer año de 0,21 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, en el segundo año de cosecha comercial, Ferreira (2022), observó una drástica disminución en los niveles de K en el suelo en comparación al primer año con un promedio de 0,04 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, no observó diferencias estadísticas entre tratamientos, menciona que esto pudo deberse al alto contenido de arcilla en el suelo del área experimental, ya que altos niveles de arcilla se asocian con una limitada movilidad por parte del K.

Santin et al. (2014) observaron un aumento de la disponibilidad de K en profundidades de hasta 40 cm en respuesta a la aplicación de dosis crecientes de K<sub>2</sub>O, por lo cual afirman que existe una buena movilidad por parte de este elemento incluso en las capas más profundas. Observaron un mayor rendimiento del cultivo cuando los tenores de K a 0-20 cm de profundidad fueron de 72 mg dm<sup>-3</sup>. Como respuesta a las dosis crecientes de K<sub>2</sub>O observaron un aumento lineal en todas las profundidades observadas, mencionan que la acidez del suelo y las abundantes lluvias en el área experimental pudieron favorecer al aumento de K en el suelo, el cual demostró una movilidad vertical, similar a lo observado en San Alberto en donde también se observó un aumento lineal llegando al mayor nivel de K a una profundidad de 0-20 cm con la mayor dosis aplicada.

En relación a los resultados obtenidos en San Alberto, Santin et al. (2016) también observaron una alta respuesta de la disponibilidad de K en el suelo en consecuencia a la aplicación de dosis crecientes de  $K_2O$ , los resultados experimentales mencionan un incremento de 72 y 52  $mg\ dm^{-3}$  con la mayor dosis en las capas de 0-10 y 0-20 cm, respectivamente y a mayor profundidad, el incremento de K disponible fue de 31 y 18  $mg\ dm^{-3}$ , en las camadas de 10-20 y 20-40 cm respectivamente. Además mencionan un incremento de la disponibilidad de K aun con las dosis más bajas, al igual que lo observado en San Alberto, por lo tanto se puede afirmar que la fertilización con dosis crecientes de  $K_2O$  tienen un impacto positivo en la disponibilidad de este elemento en las camadas más superficiales del suelo incluso con la menor dosis.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Conclusión**

Considerando las condiciones dadas durante el desarrollo del experimento se concluye lo siguiente:

Las aplicaciones de dosis crecientes de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O no influyeron con respecto a la materia verde en el rendimiento comercial, no comercial y total en el cultivo de yerba mate de tercer año de producción comercial al no observarse diferencias significativas entre tratamientos.

Se observaron aumentos lineales en los tenores de P y K en el suelo a profundidades de 0-20 cm, lo cual sugiere una buena respuesta a la aplicación de dosis crecientes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O en el contenido de estos elementos en el suelo.

Se pudo observar una respuesta positiva por parte del cultivo a la fertilización fosfatada en cuanto a las concentraciones de P en las hojas, sin embargo no es recomendable realizar aplicaciones superiores a los 111 kg ha<sup>-1</sup> ya que posterior a esto se observa que la concentración tiende a disminuir.

Por otra parte, las concentraciones de N y K en las hojas no presentaron diferencias estadísticamente significativas y los valores promediaron un nivel de concentración de 16,78 g kg<sup>-1</sup> y 9,4 g kg<sup>-1</sup> respectivamente.

La aplicación de dosis crecientes de NPK no influyeron en la producción de materia verde comercial, no comercial y total y en los contenidos de N y K en las hojas, sin embargo aumentan los tenores de P y K en el suelo a 0-20 cm de profundidad y las concentraciones de P foliar.

## **5.2. Recomendaciones**

Se debe seguir evaluando la respuesta de la yerba mate a la fertilización nitrogenada, fosfatada y potásica, ya que, al tratarse de un cultivo perenne, los resultados obtenidos podrían ir variando a lo largo de los años.

También considerar evaluar la fertilización nitrogenada, fosfatada y potásica en distintos intervalos de cosecha y con dosis superiores, ya que con los resultados obtenidos pudimos observar que esos factores podrían tener una gran incidencia en el correcto desarrollo del cultivo.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Azcón Bieto, J; Talón, M. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. España, Universidad de Barcelona. 2 ed. 651p.
- Brondani, G; Ukan D; Bortolini, M; Cambroner, Y; Rosetto, A; Reissmann, C. 2008. Distribuição de NPK em um povoamento de *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil (em línea). Revista floresta 38:267-275. Consultado 25 nov 2023. Disponible en <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/11621/8156>
- Burtnik, O. 2006. Yerba Mate: Manual de producción (en línea). 3 ed. Santo Tomé, Corrientes. INTA. 52 p. Consultado 22 nov 2022. Disponible en [http://www.inym.org.ar/inym/imagenes/Trabajos\\_Realizados/manualprodu.pdf](http://www.inym.org.ar/inym/imagenes/Trabajos_Realizados/manualprodu.pdf)
- Capellari, PL; Burgos, AM; Cabrera, MG; Dalurzo, HC; Dávalos, M; Dirchwolf, P; Dolce, NR; Fediuk, A; Holowaty, SA; Llera, V; Maiocchi, M; Medina, RD; Molina, SP; Ruiz, G; Mayol, M; Tarrago, J; Yacovich, M. 2017. Yerba mate reseña histórica y estadística: producción e industrialización en el siglo XXI (en línea). Corrientes, Argentina, Consejo Federal de Inversiones. 310 p. Consultado 8 feb. 2023. Disponible en [https://repositorio.unne.edu.ar/bitstream/handle/123456789/27893/RIUNNE\\_FCA\\_L\\_Burgos-Medina-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unne.edu.ar/bitstream/handle/123456789/27893/RIUNNE_FCA_L_Burgos-Medina-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cascales, J., Bracco, M., Poggio, L. y Gottlieb, A. M. (2014) “Genetic diversity of wild germplasm of yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) from Uruguay”, *Genética*, 142(6), pp. 563-573.
- Chepkwony, C. K. et al. Mineralization of soil organic P induced by drying and rewetting as a source of plant-available P in limed and unlimed samples of an acid soil. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 234, n. 1, p. 83-90, 2001.

- Clayton, I., Ferreira, J. Erva 20: sistema de produção de erva-mate. 2016, Seminario Erva-mate XXI, Curitiba Pr. 1-4 p.
- Ferreira, A. 2022. Fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio en el cultivo de yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) Año II. Tesis Ing. Agr. San Lorenzo, Paraguay, UNA. 62 p.
- Gortari, J. 2017. “Maldita” yerba mate: explotación de la mano de obra en las minas yerbateras del Paraguay colonial, Misiones, Arg, Universidad Nacional de Misiones (Argentina) 15p.
- Goulart, I; Santin, D; Portela, B. 2022. Fatores que afetam a produtividade na cultura da erva-mate (en línea). *Ciência Floresta* v. 32, p. 1345-1367. Consultado 22 abr 2023. Disponible en <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/>
- Grassi, B; Vázquez, F; Rodriguez, R. 2020. Evidencias científicas e impactos económicos del cambio climático en el departamento de Alto Paraná. Asunción, Paraguay, Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. 62 p.
- INYM (Instituto Nacional de la Yerba Mate). 2020. Producción sustentable (en línea). Consultado el 28 oct. 2022. Disponible en <https://inym.org.ar/noticias/produccion-sustentable/78932-el-suelo-siempre-cubierto-y-si-hay-malezas-que-sean-aliadas.html>
- Larriva, N. 2003. Síntesis de la importancia del potasio en el suelo y las plantas Vol. 2. Facultad de ciencias pecuarias y agroindustrias, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
- 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.
- López, O; González, E; Llamas, P; Molinas, A; Franco, E; García, S; Ríos, E. 1995. Estudio de reconocimiento de los suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la Región Oriental del Paraguay. Asunción, Paraguay, Ministerio de Agricultura y Ganadería. v. 1, 246 p.

- López, V. 2021. Fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio en el cultivo de yerba mate. Tesis Ing. Agr. San Lorenzo, Paraguay, UNA. 48 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Paraguay). 2020. Síntesis estadísticas. San Lorenzo, Paraguay, Dirección de Censos y Estadísticas Agropecuarias. 53 p.
- Munera, G.A., Meza, D. 2014. El fósforo elemental indispensable para la vida vegetal. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, Facultad de Tecnología. 52 p.
- Neves, L; Ernani, P; Simonete, M. 2009. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio (en línea). Revista Brasileira de Ciência do Solo 33(1):25-32. Consultado 10 nov 2020. Disponible en [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832009000100003&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832009000100003&script=sci_abstract&tlng=pt)
- Pandolfo, C; Floss, P; Da Croce, D; Dittrich, R. 2003. Resposta da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) à adubação mineral e orgânica em um latossolo vermelho aluminoférrico (en línea). Ciência Floresta 13(2):37-45. Consultado 22 feb 2023. Disponible en <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/1740/1009>
- Reissmann, C; Koehler, C; Rocha, H; Hildebrand, E. 1983. Bio-elementos em folhas e hastes de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill.) sobre cambiosolos na região de Mandirituba-Paraná. Resvista Floresta 14(2):49-54.
- Ribeiro, M; Reissmann, C; Corrêa, D. 2008. Nutrição da erva-mate com sulfato de amônio (en línea). Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal 14(3):204-211. Consultado 5 jun 2021. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74411656003>
- Santin, D; Benedetti, E; Félix de Barros, N; Carvalho de Almeida, I; Wendling, I. 2016. Intervalos de colheita e adubação potássica influenciam a produtividade da erva mate (en línea). Embrapa Floresta 46(4):509-518. Consultado 19 sep. 2023. Disponible en <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/159295/1/2016-Ivar-FIntervalos.pdf>

- Santin, D; Benedetti, E; Félix de Barros, N; Carvalho de Almeida, I; Ferreira, G; Lima, J; Wendling, I; Reissmann, C. 2019. Adubação nitrogenada e intervalos de colheita na produtividade e nutrição da erva-mate e em frações de carbono e nitrogênio do solo. *Ciência Florestal* v. 29, n. 3, p. 1199-1214
- Santin, D; Benedetti, E; Bastos, M; Kaseker, J; Reissmann, C; Brondani, G; Barros, N. 2013. Crescimento e nutrição de erva mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica (en línea). *Ciência Florestal* 23(2):363-375. Consultado 29 nov. 2022. Disponible en <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/9282/pdf>
- Santin, D; Benedetti, E; Carvalho de Almeida, I; Félix de Barros, N; Wendling, I; Fontes, L; Lima, J; Reissmann, C. 2014. Effect of potassium fertilization on yield and nutrition of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) (en línea). *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* V. 38 (5): p 1469-1477. Consultado 12 nov. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500012>
- Santin, D; Benedetti, E; Carvalho de Almeida, I; Félix de Barros, N; Wendling, I. 2014. Adubação potássica e intervalos de colheita influenciam o potássio do solo e a produtividade de cultivos de erva mate (en línea). Paraná, Brasil, Embrapa. 6 p. Consultado 8 mar. 2023. Disponible en <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/104549/1/2014-AAC-IvarAdubacaoPotassica.pdf>
- Santin, D; Benedetti, E; Félix de Barros, N; Fontes, L; Carvalho, I; Lima, J; Wendling, I. 2017. Manejo de colheita e adubação fosfatada na cultura de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em fase de produção. *Ciência Florestal* 27(3):783-797.
- Santin, D; Benedetti, E; Félix de Barros, N; Carvalho, I; Wendling, I. 2015a. Intervalos de colheita e adubação potássica influenciam a produtividade da erva-mate (en línea). Consultado 10 nov 2020. Disponible en <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/159295/1/2016-Ivar-F-Intervalos.pdf>

- Santin, D; Wendling, I; Benedetti, E; Morandi, D; Domingos, D. 2015b. Sobrevivência, crescimento e produtividade de plantas de erva-mate produzidas por miniestacas juvenis e por sementes. *Ciência Florestal* 25(3):571-579.
- Souza, L; Colpo, L; Anghinoni, I; Oliveira, R; Ermani, R. 2016. Manual de Calagem e Adubacao para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). 11 ed. p. 239-245
- Sengik, E. 2003. Os macronutrientes e os micronutrientes das plantas (en línea). Consultado 19 oct 2022. Disponible en <http://www.nupel.uem.br/nutrientes-2003.pdf>
- Skromeda, M. 2019. Evaluación de la brotación en yerba mate bajo distintos niveles nutricionales (en línea). Tesis Ing. Agr. Balcarce, Argentina, UNMdP. Consultado 12 feb. 2023. Disponible en <http://intrabalc.inta.gob.ar/dbtwwpd/images/Skromeda-M-M.pdf>
- Suñer L., J.M. Martínez, M.E. Duval, F.M. López, M.R. Landriscini y J.A. Galantini. 2018. Dinámica de las formas de fósforo en el suelo y su relación con la productividad del cultivo. En: Siembra directa en el SO Bonaerense (Ed. J.A. Galantini) págs. 69-78.
- Tedesco, MJ; Gianello, C; Bissani, CA; Bohnen, H; Volkweiss, SJ. 1995. Analises de solo, plantas e outros materiais. 2 ed. Porto Alegre, Brasil, s.e. 170 p.
- Wendling, I.; Santin, D. 2015. Propagação e nutrição de erva-mate. Brasília, Brasil, EMBRAPA. 195p.
- Werle, R.; Garcia, R.; Rosolem, C. 2008. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo (en línea). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32(6):2297-2305. Consultado 23 abril 2023. Disponible en <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/bWXMZQPWW8FQTp7m48C7Bs/abstract/?lang=pt>

## 7. ANEXOS

**Anexo 1.** Tabla general de datos de las variables evaluadas con aplicación de dosis crecientes de nitrógeno. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento comercial (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento no comercial (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento total (kg ha <sup>-1</sup> )	Concentración de N en las hojas (g kg <sup>-1</sup> )
0	4571	845	5416	14,69
0	8204	520	8724	19,65
0	3755	418	4173	13,51
0	6056	924	6980	21,06
30	7053	194	7247	19,59
30	5388	1237	6624	15,93
30	4061	931	4992	18,23
30	5878	337	6214	19,35
60	5510	1727	7237	14,63
60	4007	478	4485	12,8
60	7347	1679	9026	19,23
60	5192	294	5486	15,69
90	6571	1378	7949	16,17
90	6622	1653	8276	20,24
90	4612	653	5265	14,63
90	2841	1273	4114	18,76
120	8180	1061	9241	19,41
120	10204	582	10786	17,41
120	9719	3031	12750	14,99
120	4727	759	5486	9,32
150	4888	1092	5980	18,23
150	9394	1694	11087	19,55
150	7429	2612	10041	16,76
150	15061	2865	17927	12,92

**Anexo 2.** Tabla general de datos de las variables evaluadas con aplicación de dosis crecientes de fósforo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento comercial (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento no comercial (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento total (kg ha <sup>-1</sup> )	Concentración de P en las hojas (g kg <sup>-1</sup> )	Niveles de P en el suelo (mg kg <sup>-1</sup> )
0	5106	622	5729	0,6	9
0	5788	743	6531	1,0	12
0	6882	245	7127	0,6	14
0	6110	663	6773	1,4	7
30	3939	745	4684	0,7	15
30	6918	818	7736	1,1	18
30	4019	398	4417	2,4	12
30	7728	1359	9087	0,3	11
60	3755	806	4561	1,1	14
60	5443	655	6098	2,5	12
60	4592	388	4980	1,8	17
60	4176	643	4818	2,2	19
90	3276	224	3500	3,0	18
90	3235	469	3704	1,5	25
90	4809	357	5166	2,7	26
90	4709	661	5370	2,2	22
120	4508	602	5110	2,3	21
120	4143	388	4531	2,0	28
120	7878	949	8827	2,8	31
120	6503	714	7218	2,2	36
150	4639	578	5217	1,7	42
150	4857	622	5480	2,2	44
150	2990	622	3612	2,9	32
150	5694	908	6602	1,9	38

**Anexo 3.** Tabla general de datos de las variables evaluadas con aplicación de dosis crecientes de potasio. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

Dosis de K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento comercial (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento no comercial (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento total (kg ha <sup>-1</sup> )	Concentración de K en las hojas (g kg <sup>-1</sup> )	Niveles de K en el suelo (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )
0	2912	289	3201	4,0	0,09
0	6544	388	6932	9,0	0,11
0	1910	235	2145	9,3	0,07
0	2602	283	2885	9,3	0,06
30	3233	208	3441	8,6	0,12
30	4068	245	4313	10,4	0,08
30	2306	335	2641	7,9	0,14
30	5853	392	6245	4,3	0,16
60	4014	327	4340	4,7	0,14
60	3888	1272	5159	7,5	0,13
60	2694	173	2867	10,8	0,17
60	3612	196	3808	10,8	0,19
90	4884	343	5227	11,4	0,21
90	4641	568	5209	13,3	0,18
90	3286	135	3420	9,0	0,26
90	1806	345	2151	11,1	0,32
120	3245	657	3902	10,4	0,21
120	3107	98	3205	10,4	0,41
120	2991	86	3077	9,2	0,33
120	2743	224	2967	10,8	0,27
150	4119	255	4374	11,5	0,44
150	5020	757	5777	10,6	0,36
150	4000	22	4022	10,4	0,26
150	3860	61	3921	11,1	0,43

**Anexo 4.** Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate comercial con aplicación de dosis crecientes de nitrógeno. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	57849078,833	11569815,767	1,72NS	0,1897
Bloque	3	5443836,5	1814612,1667	1,04NS	0,8457
Error	15	100645876,5	6709725,1000		
Total	23	163938791,83			

CV= 39,53 %

**Anexo 5.** Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate no comercial con aplicación de dosis crecientes de nitrógeno. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	5386653,2083	1077330,6417	2,04NS	0,1308
Bloque	3	1146723,7917	382241,26389	0,72NS	0,5533
Error	15	7920752,9583	528050,19722		
Total	23	14454129,958			

CV= 61,76 %

**Anexo 6.** Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate total con aplicación de dosis crecientes de nitrógeno. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	92293767,833	18458753,567	2,02NS	0,1337
Bloque	3	3996345,5000	1332115,1667	0,15NS	0,9308
Error	15	137014340,50	9134289,3667		
Total	23	233304453,83			

CV= 39,10 %

**Anexo 7.** Análisis de varianza de la variable concentración de nitrógeno en las hojas. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	26,22	5,24	0,55NS	0,7374
Bloque	3	26,22	5,24	0,55NS	0,7374
Error	15	172,10	9,56		
Total	23	198,23			

**Anexo 8.** Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate comercial con aplicación de dosis crecientes de fósforo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	13453316,208	2690663,2417	1,83NS	0,1675
Bloque	3	7970422,1250	2656807,3750	1,81NS	0,1892
Error	15	22062452,625	1470830,1750		
Total	23	43486190,958			

**CV= 23,91 %**

**Anexo 9.** Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate no comercial con aplicación de dosis crecientes de fósforo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	354370,70833	70874,141667	1,52NS	0,2418
Bloque	3	347638,12500	115879,37500	2,49NS	0,1002
Error	15	698689,12500	46579,275000		
Total	23	1400697,9583			

**CV= 34,12 %**

**Anexo 10.** Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate total con aplicación de dosis crecientes de fósforo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	16009632,000	3201926,4000	1,77NS	0,1802
Bloque	3	10215557,500	3405185,8333	1,88NS	0,1764
Error	15	27171299,000	1811419,9333		
Total	23	53396488,500			

**CV= 23,60 %**

**Anexo 11.** Análisis de varianza de la variable concentración de fósforo en las hojas. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	7,9770833333	1,5954166667	4,69**	0,0089
Bloque	3	1,3879166667	0,4626388889	1,36NS	0,2931
Error	15	5,1045833333	0,3403055556		
Total	23	14,469583333			

**CV= 32,48 %**

**Anexo 12.** Análisis de varianza de la variable nivel de fósforo en el suelo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	0,2504833333	0,0500966667	13,39**	< 0,0001
Bloque	3	0,0049833333	0,0016611111	0,44NS	0,7250
Error	15	0,0561166667	0,0037411111		
Total	23				

**CV= 28,56%**

**Anexo 13.** Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate comercial con aplicación de dosis crecientes de potasio. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	3339233,3333	667846,66667	0,53NS	0,7513
Bloque	3	8882576,1667	2960858,7222	2,34NS	0,1142
Error	15	18950726,333	1263381,7556		
Total	23	31172535,833			

**CV= 30,89 %**

**Anexo 14.** Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate no comercial con aplicación de dosis crecientes de potasio. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	143926,83333	28785,366667	0,43NS	0,8203
Bloque	3	507368,83333	169122,94444	2,53NS	0,0964
Error	15	1002678,1667	66845,211111		
Total	23	1653973,8333			

**CV= 78,6 %**

**Anexo 15.** Análisis de varianza de la variable rendimiento de yerba mate total con aplicación de dosis crecientes de potasio. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	3385764,3750	677152,87500	0,52NS	0,7581
Bloque	3	13606458,792	4535486,2639	3,48*	0,0427
Error	15	19566461,458	1304430,7639		
Total	23	36558684,625			

**CV= 28,78 %**

**Anexo 16.** Análisis de varianza de la variable concentración de potasio en las hojas. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	47,368333333	9,4736666667	2,09NS	0,1229
Bloque	3	9,6183333333	3,2061111111	0,71NS	0,5617
Error	15	67,871666667	4,5247777778		
Total	23	124,85833333			

**CV=** 22,61 %

**Anexo 17.** Análisis de varianza de la variable nivel de potasio en el suelo. San Alberto, Alto Paraná, 2022/2023.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Tratamiento	5	0,2504833333	0,0500966667	13,39**	0,0001
Bloque	3	0,0049833333	0,0016611111	0,44NS	0,7250
Error	15	0,0561166667	0,0037411111		
Total	23	0,3115833333			

**CV=** 28,55 %