

## ESTRATEGIAS DE MANEJO DEL pH DEL SUSTRATO EN LA PRODUCCIÓN DE PLANTINES DE YERBA MATE (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.)

### SUBSTRATE pH MANAGEMENT STRATEGIES IN THE PRODUCTION OF YERBA MATE SEEDLINGS (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.)

Lorena Alejandra Barbaro<sup>1a\*</sup>, Esteban Rubio<sup>2a</sup>, Mónica Alejandra Karlanián<sup>2b</sup> y Bárbara Eloísa Iwasita<sup>1b</sup>

<sup>1a</sup> Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Cerro Azul, Ruta Nacional 14. Km. 1085, CP: N3313. Cerro Azul, Misiones, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-7462-7872>

<sup>1b</sup> Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Cerro Azul, Ruta Nacional 14. Km. 1085, CP: N3313. Cerro Azul, Misiones, Argentina  
<https://orcid.org/0009-0009-9105-8980>

<sup>2a</sup> INTA - Instituto de Floricultura, Nicolás Repetto y de los Reseros s/n, CP: 1686, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0003-3120-4324>

<sup>2b</sup> INTA - Instituto de Floricultura, Nicolás Repetto y de los Reseros s/n, CP: 1686, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina  
<https://orcid.org/0009-0003-1874-8770>

\* Autor para correspondencia: barbaro.lorena@inta.gob.ar

#### RESUMEN

Una de las propiedades destacadas en un sustrato es el pH, el cual debe controlarse para mantener niveles entre 5,3 y 6,5 y así posibilitar la producción plantines de calidad. Los objetivos de este trabajo fueron evaluar estrategias para que el pH del sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) se mantenga en el rango adecuado y comprobar su efecto sobre la calidad de plantines de yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.). Se conformaron seis tratamientos: T1= SCCP con pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD) durante el cultivo; T2= SCCP con pH sin corrección y aplicación de SD durante el cultivo; T3= SCCP con pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC) durante el cultivo; T4= SCCP con pH sin corrección y aplicación de NC durante el cultivo; T5= SCCP con pH corregido y T6= SCCP con pH sin corrección. Al finalizar el ensayo se midió la masa seca aérea (MSA) y radical (MSR), longitud y diámetro del tallo, elementos minerales en hoja, conductividad eléctrica y pH del sustrato. T1, T3 y T5 se mantuvieron dentro del rango adecuado de pH hasta el final del ensayo. T2 y T4 tuvieron un pH inicial bajo (4,13), pero sólo T2 finalizó dentro del rango deseado (5,34). Las variables morfológicas de los plantines de T6 tuvieron los menores valores. La MSA fue mayor en T1 (2,52 g) y T5 (2,61 g), en coincidencia con el mayor contenido de Ca y Mg foliar. Corregir el pH del SCCP con dolomita antes de su uso y aplicar SD al SCCP no corregido durante el cultivo fueron estrategias efectivas para producir plantines de yerba mate de buena calidad.

**Palabras clave:** Compost de corteza de pino, dolomita, nitrato de calcio, calidad morfológica, elementos minerales en hoja.

## ABSTRACT

One of the most important properties of a substrate is pH, which must be controlled to maintain levels between 5.3 and 6.5, and thus allow the production of good-quality seedlings. The objectives of this work were to evaluate strategies to maintain pH of pine bark compost-based substrate (SCCP) in the appropriate range and to verify its effect on the quality of seedlings of yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.). Six treatments were evaluated: T1= SCCP with corrected pH and application of dolomitic solution (SD) during cultivation; T2= SCCP with uncorrected pH and application of SD during cultivation; T3= SCCP with corrected pH and application of calcium nitrate (NC) during cultivation; T4= SCCP with uncorrected pH and application of NC during cultivation; T5= SCCP with corrected pH; and T6= SCCP with uncorrected pH. At the end of the trial, the aerial (MSA) and root dry mass (MSR), stem length and diameter, mineral elements in the leaf, electrical conductivity and pH of the substrate were measured. T1, T3 and T5 recorded pH values within the appropriate range until the end of the trial. T2 and T4 had a low initial pH (4.13), and only T2 recorded a final pH within the desirable range (5.34). The morphological variables of the seedlings in T6 had the lowest values. MSA was higher in T1 and T5, coinciding with the higher leaf Ca and Mg content. Correcting the pH of the SCCP with dolomite before use and applying SD to the SCCP with uncorrected pH during cultivation were effective strategies for the production of good-quality yerba mate seedlings.

**Keywords:** Pine bark compost, dolomite, calcium nitrate, morphological quality, mineral element in the leaf.

## INTRODUCCIÓN

La yerba mate (YM) (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) es una especie nativa de Sudamérica subtropical perteneciente a la familia Aquifoliácea, con gran importancia económica y cultural. El área principal de distribución natural es en Brasil, Argentina y Paraguay (Talavera Stefani, 2021). A nivel global, Argentina (62%) es el país con la mayor extensión de YM en el mundo, seguida por Brasil (34%) y finalmente Paraguay (4%) (Batalla, 2019). En Argentina, se producen 209.276,90 ha de YM, de las cuales el 87% corresponde a la provincia de Misiones y el 13% a la provincia de Corrientes (INYM, 2022).

Las hojas maduras cosechadas, para su consumo, pasan por un proceso industrial donde son desecadas y luego molidas, transformándose en un producto llamado “yerba”. Este producto se consume principalmente como infusión mediante el mate, mate cocido, tereré o té.

El cultivo de YM en el campo empieza a partir del trasplante del plantín, el cual, para su establecimiento y óptimo desarrollo, debe tener una adecuada proporción o relación entre la parte aérea y radical (Llera y Medina, 2017; Wendling et al., 2020).

Los plantines de YM se producen en viveros y la etapa inicial es la obtención de plántulas a partir de esquejes, miniesquejes o semillas (Rocha et al., 2019; Wendling et al., 2020; Eibl et al., 2022). En el último caso, a partir de que la plántula presenta los cotiledones desplegados hasta un máximo de 4 hojas (Duboc, 2015; Eibl et al., 2022) se replica

en macetas, tubetes o bandejas alveoladas con sustrato. En el vivero los plantines son puestos bajo media sombra, regados y fertilizados hasta la obtención de un plantín en condiciones para llevarlo a campo (Capellari, 2017; Eibl et al., 2022).

Entre los insumos más importantes de estos viveros se encuentra el sustrato, el cual sirve de anclaje a las raíces del plantín y debe presentar propiedades que aseguren un adecuado suministro de aire, agua y nutrientes (Gruda, 2019). Las propiedades físicas de mayor relevancia son la capacidad de retención de agua y la capacidad de aireación, ambas relacionadas con la distribución del tamaño de las partículas (Gayosso Rodríguez et al., 2018). Entre las propiedades químicas se destacan la conductividad eléctrica (CE) y el pH (Othman et al., 2019).

El pH juega un rol importante para el manejo de la fertilización y la satisfacción de las exigencias de las plantas, siendo el rango recomendado para la mayoría de las plantas cultivadas en contenedor, entre 5,3 a 6,5 (Agarwal et al., 2023). En este rango, los nutrientes mantienen su máximo nivel de disponibilidad, de lo contrario, pueden convertirse en nutrientes no disponibles o tóxicos (Fascella, 2015; Barbaro et al., 2021). Además, se debe tener en cuenta que las plántulas o plantines son más vulnerables a los extremos del pH, en comparación con las plantas maduras (Agarwal et al., 2023).

Durante el desarrollo de las plantas se podrían presentar variaciones del pH en la solución del sustrato, por ejemplo, por consecuencia de las

formas de nitrógeno en el fertilizante utilizado y la calidad del agua de riego. En este sentido, los fertilizantes con mayor proporción de  $\text{NH}_4^+$  tienden a disminuir el valor del pH, resultado de la liberación de  $\text{H}^+$  debido a la nitrificación de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$  y la absorción de  $\text{NH}_4^+$ . En cambio, los fertilizantes con mayor proporción de  $\text{NO}_3^-$  tienden a aumentar este valor, debido a la liberación de  $\text{OH}^-$  por la absorción de  $\text{NO}_3^-$  (Dickson et al., 2016; Dickson y Fisher, 2019; Pancercz y Altland, 2020). Por otro lado, las aguas alcalinas generan un aumento del pH del sustrato, principalmente por la concentración de carbonatos y bicarbonatos que neutralizan los  $\text{H}^+$  presentes en la solución (Albano et al., 2017). Las fuentes de agua de nula a baja alcalinidad, combinado con el uso de fertilizantes amoniacales, podrían provocar una disminución del pH, debido a la ausencia de iones que neutralicen los  $\text{H}^+$  generados por la nitrificación o absorción del  $\text{NH}_4^+$  (Dickson y Fisher, 2019).

En la provincia de Misiones (Argentina), en los viveros de plantines de YM se emplean fuentes de agua para riego con baja alcalinidad (de precipitaciones y superficiales) y fertilizantes de reacción ácida, por ejemplo, los de liberación controlada a base de N-P-K: 14-25-6; 14-8-15 y 16-8-12 (Winhelmann, 2021; Eibl et al., 2022) o fertilizantes solubles a base de N-P-K: 13-40-13; 21-11-21 y 15-5-30, entre otros (Capellari, 2017). Además, uno de los sustratos más utilizados en estos viveros es el compost de corteza de pino, cuyo valor de pH generalmente es ácido (Capellari, 2017; Barbaro et al., 2019, Eibl et al., 2022). La combinación de estos factores ocasiona disminución del pH del sustrato por debajo del rango recomendado y, en consecuencia, provoca problemas nutricionales y disminución de crecimiento en los plantines de YM.

En base a lo mencionado, sería conveniente estudiar estrategias de manejo que logren incrementar y/o mantener el pH de la solución del sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) en el rango adecuado y lograr plantines de YM de calidad. En relación a esto, una estrategia sería realizar un ajuste inicial del pH del SCCP con la adición de calcáreos como el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y la dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (Altland y Jeong, 2016). Existen otras como el riego durante el desarrollo de la planta con suspensión dolomítica (Owen et al., 2018) o con fertilizantes de reacción alcalina (Fisher et al., 2013; Dickson et al., 2016), que, si bien, fueron evaluadas en otros cultivos (Jeong et al., 2016; Yafuso y Boldt, 2024), aún no existe suficiente información para la producción de plantines de YM.

Por otro lado, la calidad de un plantín está dada

por sus propiedades morfológicas y fisiológicas. Entre las primeras, algunas comúnmente medidas o calculadas son la longitud y el diámetro del tallo, índice de robustez (altura/diámetro del tallo), índice de calidad de Dickson (ICD) entre otros (Sáenz Reyes et al., 2014; Villalón Mendoza et al., 2016). Además, para conocer el estado nutricional de la planta como resultado de las interacciones con el manejo y el ambiente, el análisis de elementos minerales en hojas es un método de diagnóstico muy utilizado para determinar la concentración de cada nutriente (Puentes Páramo et al., 2016). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar las siguientes estrategias de manejo agronómico para que el pH del SCCP se encuentre en el rango adecuado: ajuste inicial del pH del SCCP con la adición de dolomita, aplicación de una suspensión dolomítica o de nitrato de calcio al SCCP durante el cultivo. Además, comprobar el efecto de estas estrategias sobre la calidad morfológica y contenido de elementos minerales de las hojas de los plantines de YM producidos en bandejas alveoladas.

## MATERIALES Y METODOS

El ensayo se realizó en las instalaciones de la Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul, Misiones (EEA CA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina (27° 39' 23,5" S; 55° 26' 13,8" O). Se instaló el 26/08/2022 y finalizó el 27/03/2023.

Estuvo conformado por seis tratamientos: 1) SCCP con el pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD) durante el cultivo; 2) SCCP sin el pH corregido y aplicación de SD durante el cultivo; 3) SCCP con el pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC) durante el cultivo; 4) SCCP sin el pH corregido y aplicación de NC durante el cultivo; 5) SCCP con el pH corregido y 6) SCCP sin el pH corregido. La unidad experimental fue una bandeja. Cada tratamiento estaba conformado por 4 bandejas alveoladas distribuidas mediante un diseño experimental completamente aleatorizado. Al finalizar el ensayo se extrajeron 15 plantines al azar de cada bandeja por tratamiento para la medición de las variables morfológicas y análisis de elementos minerales en hojas.

Las bandejas alveoladas utilizadas contenían 25 celdas (5 x 5) de 9 cm de alto y 100 cm<sup>3</sup> cada una. En cada celda se trasplantó una plántula de YM obtenidas en el invernadero de la EEA CA a partir de semilla (PG 538/90 CA538-90) en cajones de 15 cm de alto rellenos con SCCP bajo riego por aspersión. Las plántulas utilizadas tuvieron, en promedio, 0,025 g de masa seca total, con uno a dos pares de hojas verdaderas.

El ensayo se realizó bajo un invernáculo con media sombra al 50%. Las bandejas se colocaron directamente sobre una mesada con un sistema de riego por aspersión instalado a 1,35 m de altura desde la superficie de la mesada. El riego fue automático y se suministró a las 9, 11, 14 y 16 horas. Cada riego duró 5 minutos, y cada microaspersor tuvo un caudal de 35 L h<sup>-1</sup>. Se colocaron 3 microaspersores cada 1 m lineal. A partir de los 3 meses, también se regó manualmente, debido a que los plantines tenían mayor cantidad de hojas y dificultaban la llegada del agua asperjada al sustrato.

El agua de riego utilizada era superficial, con las siguientes propiedades: pH: 6,60; CE: 0,11 dS m<sup>-1</sup>; sólidos totales disueltos: 69,10 ppm; Ca: 2,63 ppm; Mg: 4,09 ppm; Na: 4,24 ppm; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 0,00 ppm; P: 0,18 ppm; K: 0,86 ppm; bicarbonatos: 61,00 ppm; alcalinidad: 50,05 ppm CaCO<sub>3</sub>; dureza: 23,38 ppm CaCO<sub>3</sub> y relación de adsorción de sodio: 0,40 ppm.

### Sustrato utilizado

El SCCP utilizado fue elaborado por la empresa Decoppet ubicada en la localidad de Virasoro (Corrientes, Argentina). Los valores promedios (3 repeticiones) de sus propiedades fueron, densidad aparente: 220 kg m<sup>-3</sup>; espacio poroso total: 86,42%, capacidad de retención de agua: 45,48% y porosidad de aireación: 40,64% (Método con los lechos de arena; De Boodt et al., 1974), índice de grosor: 81,74% (Suma de partículas >1mm; Ansorena Miner, 1994); pH: 4,13 y CE: 0,40 dS m<sup>-1</sup> (relación 1 + 5 v/v; Barbaro et al., 2019); P: 2,85 mg L<sup>-1</sup>; K: 34,19 mg L<sup>-1</sup>; Ca: 1,60 mg L<sup>-1</sup>; Mg: 0,76 mg L<sup>-1</sup>; Zn: 0,21 mg L<sup>-1</sup>; Mn: 0,25 mg L<sup>-1</sup>; Cu: 0,19 mg L<sup>-1</sup> y Fe: 34,83 mg L<sup>-1</sup> (Solubles). Para los tratamientos con SCCP corregido, se incorporó 2 g de dolomita (MicArgentina®) por litro. Se mezcló semanalmente para su homogeneización y a los 30 días los valores de pH fueron constantes y se encontraron en el rango adecuado (5,3-6,5) (Abad Berjón et al., 2001). Una vez corregido, sus propiedades químicas en promedio (3 repeticiones) fueron, pH: 5,32; CE: 0,51 dS m<sup>-1</sup> (relación 1 + 5 v/v; Barbaro et al., 2019); P: 1,16 mg L<sup>-1</sup>; K: 78,73 mg L<sup>-1</sup>; Ca: 33,41 mg L<sup>-1</sup>; Mg: 51,56 mg L<sup>-1</sup>; Zn: 0,14 mg L<sup>-1</sup>; Mn: 0,19 mg L<sup>-1</sup>; Cu: 0,15 mg L<sup>-1</sup> y Fe: 2,64 mg L<sup>-1</sup> (Solubles).

Los valores de pH y CE del SCCP sin corregir y corregido mencionados fueron los que en adelante se llaman "iniciales".

Antes del relleno de las bandejas se incorporó al sustrato de cada tratamiento 3 kg m<sup>-3</sup> de fertilizante de liberación controlada (FLC) Basacote® Plus 6M (16% N (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 7,4% y N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: 8,6%), 8% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 12% K<sub>2</sub>O, 2% MgO, 5% S, 0,4% Fe, 0,05% Cu, 0,06% Mn, 0,02% Zn, 0,02% B, 0,015% Mo).

### Mezclas aplicadas durante el cultivo

La aplicación de SD y de NC comenzó a los 30 días del trasplante. Se realizó cada 15 días regando y distribuyendo en total 2,5 L sobre la superficie del sustrato de las bandejas del tratamiento correspondiente. Para obtener la SD se preparó una suspensión madre con 25 g de dolomita (CaO: 38,9% y MgO: 25,7%) por litro de agua, la cual antes de su uso se agitó y dejó decantar 10 min. Pasado este tiempo, se tomó 1 L de la solución blanquecina y se mezcló con 1,5 L de agua, para luego proceder a la aplicación. El pH registrado en la SD era: 7,86 y la CE: 0,14 dS m<sup>-1</sup>. Por otro lado, para preparar la solución de NC (Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>:15,5% N, 19% Ca) se utilizó una dosis de 1 g L<sup>-1</sup>. El pH registrado en la solución era: 7,00 y la CE: 0,80 dS m<sup>-1</sup>.

### Variables medidas

A partir de los 30 días y hasta los 197 días de transcurrido el ensayo, cada 15 días, antes del 1er riego (9 h), se midió el pH del sustrato de las bandejas de cada tratamiento mediante el método de pour-through (Altland, 2021). El método consistió en aplicar 250 mL de agua destilada a cada bandeja sobre el sustrato, juntar el lixiviado en un recipiente y medir el pH del lixiviado con un peachímetro (Oakton pH 1000 series, Australia). Por otro lado, al finalizar el ensayo (214 días) se recolectó el sustrato de cada tratamiento y se midió el pH y la CE mediante una relación 1 + 5 v/v; en un frasco de 250 mL se colocaron 150 mL de agua destilada y se llevó a 180 mL con el agregado de sustrato. Se agitó durante 10 min y se dejó reposar 15 min, luego se realizaron las mediciones en la solución con un medidor de pH (Oakton pH 1000 series, Australia) y de CE (Hanna HI98304 DiST4, Limena, Italia) (Barbaro et al., 2019).

Al finalizar el ensayo también se midió a 15 plantines al azar por bandeja de cada tratamiento la longitud del tallo desde el cuello hasta el ápice con una cinta milimetrada y el diámetro del tallo a los 2 cm del cuello con un calibre, la masa seca aérea (MSA) y radical (MSR) (secado en estufa a 60 °C hasta peso constante). Además, se calculó el índice de robustez (IR): longitud (cm)/ diámetro (mm) y el índice de calidad de Dickson (ICD): (MSA+MSR (g))/ ((longitud (cm)/ diámetro (mm)) + (MSA (g)/MSR (g))) (Sáenz Reyes et al., 2014).

Se molieron las hojas obtenidas de los 15 plantines extraídos por bandeja de cada tratamiento y se envió, la mitad al Laboratorio de Suelos y Material Vegetal de la Estación Experimental Cerro Azul para analizar la concentración de N por triplicado mediante el método de Kjeldahl. La otra mitad, se envió al Laboratorio de Sustratos del Instituto de Floricultura del INTA, para determinar la concentración de P, K, Ca, Mg,

Zn, Mn, Cu y Fe. En este caso por triplicado se tomó 0,20 g de material molido y se colocó en un crisol de porcelana e introdujo en un horno de mufla a 500° C durante 4 h. Luego a las cenizas se agregaron 20 mL de HCl 2N y se llevó a ebullición durante 2 min. Se trasvasó el contenido del crisol a una probeta y se llevó a un volumen final de 50 mL con agua destilada; finalmente se trasvasó todo a un tubo de ensayo y se analizó P con un espectrofotómetro UV visible (Shimadzu, modelo UV-1900i, Kyoto, Japón) y los restantes nutrientes con un espectrofotómetro de absorción atómica (Varian modelo 220 A, Mulgrave Victoria, Australia). Los resultados se expresaron en mg o g del elemento por kilogramo de masa seca (mg o g kg MS<sup>-1</sup>).

### Análisis estadísticos

Los resultados de las variables analizadas en los sustratos, variables morfológicas, índices y elementos minerales en hojas obtenidos de los plantines se sometieron a análisis de varianza y Test de Tukey para comparación de medias ( $p < 0,05$ ). Por otro lado, los valores de pH iniciales y finales de cada tratamiento fueron comparados, utilizando T Student ( $P < 0,05$ ). Además, los valores de pH del sustrato durante el desarrollo de los plantines fueron analizados a partir del método de regresión lineal simple, evaluándose la tendencia a través del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el modelo se evaluó con un nivel de significación  $p$ -valor  $\leq 0,05$ . También se realizó un análisis de correlación de Pearson entre el pH del sustrato y los días desde el trasplante de los plantines. Se elaboró un gráfico de dispersión del pH en función a los días desde el trasplante con el ajuste lineal para cada tratamiento. Además, se realizó análisis

de correlación de Pearson entre los elementos minerales en hojas, variables morfológicas e índices con el pH inicial y final del sustrato. El software estadístico utilizado fue el programa InfoStat versión 2009 (Di Rienzo et al., 2009).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### pH del sustrato inicial, durante el ensayo y final

El pH inicial del SCCP corregido (Tabla 1, tratamientos 1, 3 y 5) se encontró dentro del rango adecuado (5,3-6,5). Es decir, que la dosis de dolomita empleada para corregir el sustrato fue eficiente. Por otro lado, el SCCP sin corregir tuvo un valor menor al límite inferior (Tabla 1, tratamientos 2, 4 y 6). Estudios realizados por Barbaro et al. (2019) a diferentes compost también muestran valores de  $pH < 6$  para los CCP sin corregir analizados, cuyo rango estuvo entre 4,75 a 5,75. Asimismo, Altland y Jeong (2016) mencionan que la corteza de pino posee un valor de pH entre 4,1 y 5,1, pero al ser compostada sus valores varían entre 5 a 6.

El pH final de los tratamientos con SCCP sin corrección y SCCP sin corrección con aplicación de NC fue menor al límite inferior del rango adecuado. En cambio, los valores de los restantes tratamientos fueron apropiados. Si bien, los tratamientos con SCCP sin corrección tuvieron los valores finales de pH más bajos (Tabla 1), el tratamiento con aplicación de SD finalizó con un incremento de pH del 23% y el tratamiento con aplicación de NC con un incremento del 18%.

Excepto por el tratamiento SCCP sin corregir, hubo diferencias significativas entre los valores de pH inicial y final del SCCP en todos los tratamientos (Tabla 1).

**Tabla 1. Valor del pH inicial (antes del trasplante) y final (al finalizar el ensayo) del sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) de cada tratamiento (Método 1 + 5 v/v) (Barbaro et al., 2019).**

**Table 1. Initial pH (before transplanting) and final pH values (at the end of the trial) of the pine bark compost-based substrate (SCCP) for each treatment (Method 1 + 5 v/v) (Barbaro et al., 2019).**

T	pH corregido	Mezcla aplicada	pH inicial	pH final	p-valor
1	Sí	SD	5,32	6,24	<0,0001*
2	No	SD	4,13	5,34	<0,0001*
3	Sí	NC	5,32	5,78	<0,0001*
4	No	NC	4,13	5,02	<0,0001*
5	Sí	-	5,32	5,41	0,0009*
6	No	-	4,13	4,09	0,1090

Tratamientos (T): 1) SCCP con pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD). 2) SCCP sin corrección con aplicación de SD. 3) SCCP con pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC). 4) SCCP sin corrección con aplicación de NC. 5) SCCP con el pH corregido. 6) SCCP sin corrección. \*Diferencias significativas entre valores medios de pH inicial y final de cada fila, para la prueba T Student ( $p \leq 0,05$ ).

Los tratamientos con el SCCP corregido con aplicación de NC, SCCP con y sin corrección sin aplicación de SD o NC no tuvieron una asociación lineal entre el pH y los días transcurridos a partir de los 30 días del trasplante (Tabla 2). Pero, en los restantes tratamientos, la correlación fue alta y la tendencia del pH del sustrato durante el desarrollo de los plantines fue positiva señalada por sus funciones lineales, cuyos coeficientes de determinación asociados fueron  $>0,62$  (Tabla 2). Los tratamientos con SCCP sin corrección con aplicación de SD y NC tuvieron los coeficientes de determinación más altos, presentando una mayor relación entre las variables mencionadas con ajuste lineal (Fig. 1).

Los resultados indican que con solo corregir previamente el pH del SCCP el valor se mantuvo dentro del rango adecuado. Además, cuando se realizaron durante el desarrollo del plántin aplicaciones de SD o NC al SCCP corregido el valor de pH se incrementó. Con la aplicación de NC el incremento fue leve, pero con la aplicación de SD fue cercano al límite superior del rango. Estas estrategias de manejo permitirían que factores que provocan acidez en la solución del sustrato, como los fertilizantes de reacción ácida (Pancerz y Altland, 2020) o el equilibrio iónico realizado por las raíces de las plantas (Pennisi y Thomas, 2009), no disminuyan rápidamente el pH de la solución del sustrato. En adición, hay que considerar que los sustratos a base de corteza tienen una menor capacidad de intercambio catiónico (CIC) y una menor capacidad de

amortiguación del pH en comparación con otros sustratos, por ejemplo, los que contienen altos porcentajes de turba (Pietsch et al., 2022).

Por otro lado, el tratamiento con SCCP sin corrección con aplicación de SD finalizó con el pH en el límite inferior del rango adecuado, por lo cual, esta estrategia sería eficiente en casos donde no se corrige previamente el SCCP. Midcap (2002), citado por Pietsch et al. (2022), también empleó SD en un ensayo con variedades de hortensia (*Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser) en maceta, aplicó  $Al_2(SO_4)_3$  y SD solos o en combinación. Con la aplicación sola de  $Al_2(SO_4)_3$  la solución del sustrato tuvo un pH entre 3,5 y 3,6, mientras que con la combinación de  $Al_2(SO_4)_3$  y SD el pH fue de 5,2 a 5,3, es decir, que la SD ayudó a incrementar el pH. Jeong et al. (2010) evaluaron la respuesta de seis variedades de begonia (*Begonia* sp.) frente a distintos rangos de pH, empleando SD cuando el pH era inferior al rango objetivo. Con este manejo lograron mantener el pH objetivo para cinco variedades, pero con la restante, debido a que el sustrato estaba seco la SD paso a través del espacio entre el cepellón y la pared del recipiente impidiendo mantener los valores deseados.

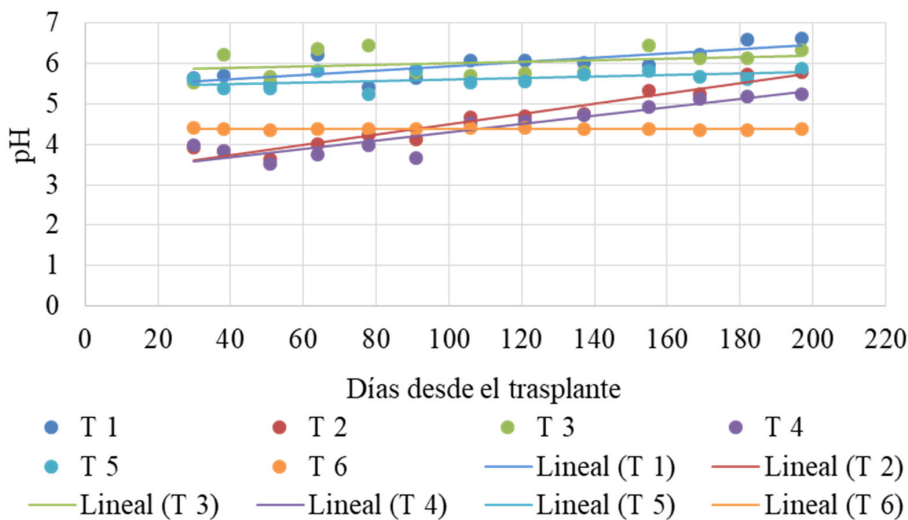
El pH del tratamiento SCCP sin corregir con aplicación de NC se mantuvo por debajo del rango adecuado, es decir, que esta estrategia no fue suficiente para incrementar el pH a los valores deseados. El tratamiento con SCCP sin corregir también mantuvo el pH por debajo del rango apropiado. Según Cabrera et al. (2017), la relación entre el pH y el nivel de alcalinidad del agua es la

**Tabla 2. Correlación y líneas de tendencia de los valores medios del pH (Método de pour-through) (Altland, 2021) del sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) a partir de los 30 días del trasplante de los plantines de yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) para cada tratamiento.**

**Table 2. Correlation and trend lines of the mean pH values (Pour-through method) (Altland, 2021) of the pine bark compost-based substrate (SCCP) starting 30 days after transplanting of the yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) seedlings for each treatment.**

T	pH corregido	Mezcla aplicada	r	Línea de tendencia	R <sup>2</sup>	p-valor*
1	Si	SD	0,79	$y = 0,005x + 5,40$	0,62	0,0015
2	No	SD	0,97	$y = 0,013x + 3,24$	0,94	<0,0001
3	Si	NC	0,35	$y = 0,002x + 5,81$	0,12	0,2456
4	No	NC	0,91	$y = 0,015x + 3,35$	0,83	<0,0001
5	Si	-	0,50	$y = 0,002x + 5,43$	0,25	0,0837
6	No	-	0,36	$y = -0,0001x + 4,59$	0,13	0,1946

Tratamientos (T): 1) SCCP con pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD). 2) SCCP sin corrección con aplicación de SD. 3) SCCP con pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC). 4) SCCP sin corrección con aplicación de NC. 5) SCCP con el pH corregido. 6) SCCP sin corrección. Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y \*nivel de significación  $p$ -valor  $\leq 0,05$ .



**Fig. 1. Gráfico de dispersión de los valores medios de pH (Método de pour-through) del sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) en función a los días desde el trasplante de los plantines de yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) con ajuste lineal para cada tratamiento.** Tratamientos (T): 1) SCCP con pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD). 2) SCCP sin corrección con aplicación de SD. 3) SCCP con pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC). 4) SCCP sin corrección con aplicación de NC. 5) SCCP con el pH corregido. 6) SCCP sin corrección. Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y \*nivel de significación  $p$ -valor  $\leq 0,05$ .

**Fig. 1. Scatter plot of the mean pH values (Pour-through method) of the pine bark compost-based substrate (SCCP) as a function of the days since transplanting of yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) seedlings with linear adjustment for each treatment.** Treatments (T): 1) SCCP with corrected pH and application of dolomitic solution (SD). 2) SCCP with uncorrected pH and application of SD. 3) SCCP with corrected pH and application of calcium nitrate (NC). 4) SCCP with uncorrected pH and application of NC. 5) SCCP with corrected pH. 6) SCCP with uncorrected pH.

que tiene un efecto más significativo sobre el pH en la solución del sustrato. En el presente trabajo se utilizó agua de riego superficial, cuyo valor de alcalinidad era de 50 ppm  $\text{CaCO}_3$ , inferior al límite para producciones intensivas bajo cubierta: 150 ppm  $\text{CaCO}_3$  (Whipker et al., 2003). Esta baja alcalinidad, en combinación con el empleo de un fertilizante de reacción ácida, podría ser uno de los motivos por el cual el pH disminuyó levemente en el tratamiento con SCCP sin corregir.

En función de los resultados, el pH de los tratamientos con SCCP corregido sin aplicación y con aplicación de SD y NC se mantuvo y finalizó dentro del rango adecuado de pH (5,3-6,5). En cambio, el pH del tratamiento con SCCP sin corrección con aplicación de SD inició con un valor de pH bajo, pero finalizó con un valor cercano al límite inferior. El pH de los tratamientos con SCCP sin corregir y con aplicación de NC se mantuvo y finalizó por debajo del límite. Por lo tanto, la disponibilidad de nutrientes podría variar en los diferentes tratamientos y afectar la calidad morfológica de los plantines de YM.

#### CE inicial y final del sustrato

El valor de la CE al finalizar el ensayo en todos los tratamientos fue menor a 0,04  $\text{dS m}^{-1}$ , sin diferencias significativas entre los tratamientos ( $p = 0,057$ ) (Tabla 3). Estos valores bajos se podrían atribuir a que la finalización del ensayo fue un mes después al periodo de suministro de nutrientes del FLC empleado (6 meses). Además, según Krug et al. (2013), los niveles de CE en la solución del sustrato con FLC son significativamente más bajos que cuando se utilizan fertilizantes solubles. Por otro lado, se observó que la aplicación de SD y NC durante el desarrollo de los plantines no afectó a la CE final, presentando valores inferiores a 1  $\text{dS m}^{-1}$  (1+5 v/v), límite establecido para la metodología empleada (Barbaro et al., 2014).

#### Calidad morfológica de los plantines de YM

Los plantines desarrollados en el tratamiento con SCCP corregido y con SCCP corregido con aplicación de SD tuvieron los valores más altos de MSA sin diferencias entre ambos ( $p < 0,0001$ ). Entre

**Tabla 3. Valor de conductividad eléctrica (CE) inicial (antes del trasplante) y final (al finalizar el ensayo) del sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) de cada tratamiento (Método 1 + 5 v/v) (Barbaro et al., 2019).**

**Table 3. Initial electrical conductivity value (CE) (before transplanting) and final pH (at the end of the trial) of the pine bark compost-based substrate (SCCP) for each treatment (Method 1 + 5 v/v) (Barbaro et al., 2019).**

T	pH	Mezcla aplicada	CE inicial	CE final*
	corregido			
1	Sí	SD	0,51	0,03 a
2	No	SD	0,30	0,03 a
3	Sí	NC	0,51	0,04 a
4	No	NC	0,30	0,04 a
5	Sí	-	0,51	0,02 a
6	No	-	0,30	0,03 a

Tratamientos (T): 1) SCCP con pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD). 2) SCCP sin corrección con aplicación de SD. 3) SCCP con pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC). 4) SCCP sin corrección con aplicación de NC. 5) SCCP con el pH corregido. 6) SCCP sin corrección. \*Letras distintas entre filas de una misma columna (pH final) indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el test de Tukey.

los restantes tratamientos no hubo diferencias significativas, sin embargo, los plantines desarrollados en los tratamientos con SCCP sin corrección y en el SCCP sin corrección con aplicación de NC tuvieron los valores absolutos más bajos (Tabla 4).

Por otro lado, los plantines desarrollados en el tratamiento con SCCP sin corrección tuvieron el menor valor de MSR y se diferenciaron de los desarrollados en el SCCP corregido ( $p = 0,0199$ ) (Tabla 4).

Barbaro (2023), en el mismo tipo de bandeja alveolada, evaluó el efecto de las propiedades físicas del sustrato sobre el desarrollo de los plantines de YM y resultó que los plantines desarrollados en un SCCP corregido tuvieron en promedio 2,78 g de MSA y 0,55 g de MSR, valores similares a los obtenidos en el presente trabajo. Según Morales Pérez (2018) a mayor cantidad de masa seca, la probabilidad de sobrevivencia del plantín al trasplante es mayor, no obstante, cabe destacar que la parte aérea como la radical deben estar equilibradas e influyen sobre el ICD.

Los plantines desarrollados en el tratamiento con SCCP sin corrección tuvieron el menor valor de longitud del tallo y se diferenciaron de los restantes tratamientos ( $p < 0,0001$ ), entre los cuales no hubo diferencia (Tabla 4). Considerando un rango de referencia de longitud del tallo: 15 - 30 cm, basado en resultados obtenidos por diferentes autores (Marques et al., 2013; Capellari, 2017; Eibl et al., 2022), se observó que los valores obtenidos en todos los tratamientos fueron adecuados.

En caso de obtener valores superiores al rango, se recomienda realizar una poda de formación cortando el ápice del plantín un mes antes de llevarlo al campo (Marques et al., 2013).

Los plantines desarrollados en los tratamientos con SCCP sin corrección y SCCP sin corrección con aplicación de NC tuvieron los menores valores de diámetro del tallo, los del primer tratamiento mencionado con diferencias significativas con los restantes tratamientos ( $p < 0,0001$ ). Los plantines de los tratamientos con SCCP corregido y SCCP corregido con aplicación de SD tuvieron los valores más altos (Tabla 5). Según Eibl et al. (2022) un plantín de YM debería tener un diámetro entre 3 a 5 mm, por lo tanto, los valores obtenidos en todos los tratamientos fueron adecuados. Sin embargo, el diámetro de los plantines del tratamiento con SCCP sin corrección estuvo más cercano al límite inferior (3 mm). Cuando el plantín posee un bajo diámetro queda expuesto a la acción del viento y el movimiento del tallo podría provocar una lesión a la altura del cuello, cuya consecuencia podría ser la muerte (Llera y Medina, 2017).

Las variables mencionadas poseen más relevancia si se las relaciona mediante el IR, cuyo valor debería ser menor o igual a 8 para que el plantín esté equilibrado (Eibl et al., 2022) y el ICD que reúne varios atributos morfológicos en un valor que debería ser mayor a 0,2 (Castro et al., 2016; Ricardi et al., 2020). Si bien, los valores obtenidos en todos los tratamientos para ambos índices estuvieron dentro de lo



**Tabla 4. Masa seca aérea (MSA) y radical (MSR) de los plantines de yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) desarrollados en cada tratamiento.**

**Table 4. Aerial dry mass (MSA), root dry mass (MSR) of the yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) seedlings for each treatment.**

T	MSA (g)	MSR (g)
T 1	2,52 ± 0,09* ab	0,50 ± 0,01 ab
T 2	2,07 ± 0,39 bc	0,47 ± 0,03 ab
T 3	2,18 ± 0,05 bc	0,50 ± 0,02 ab
T 4	1,75 ± 0,02 c	0,50 ± 0,01 ab
T 5	2,61 ± 0,22 ab	0,54 ± 0,06 a
T 6	1,79 ± 0,08 c	0,40 ± 0,05 b

Tratamientos (T): 1) Sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) con pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD). 2) SCCP sin corrección con aplicación de SD. 3) SCCP con pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC). 4) SCCP sin corrección con aplicación de NC. 5) SCCP con el pH corregido. 6) SCCP sin corrección. \*Se indican valores de las variables ± desvío estándar. Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el test de Tukey.

**Tabla 5. Longitud, diámetro, índice de robustez (IR) e índice de calidad de Dickson (ICD) de los plantines de yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) desarrollados en cada tratamiento.**

**Table 5. Length, diameter, robustness index (IR) and Dickson quality index (ICD) of the yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) seedlings developed in each treatment.**

T	Longitud (cm)	Diámetro (mm)	IR	ICD
T 1	25,70 ± 1,28 a	4,03 ± 0,11 a	6,44 ± 0,18 a	0,26 ± 0,00 ab
T 2	25,77 ± 1,04 a	3,95 ± 0,26 ab	6,55 ± 0,41 a	0,23 ± 0,02 abc
T 3	27,23 ± 1,17 a	3,95 ± 0,09 ab	6,99 ± 0,35 a	0,24 ± 0,00 abc
T 4	25,37 ± 1,19 a	3,64 ± 0,23 bc	6,99 ± 0,34 a	0,21 ± 0,00 bc
T 5	26,93 ± 0,21 a	4,14 ± 0,18 a	6,57 ± 0,29 a	0,28 ± 0,03 a
T 6	22,80 ± 0,87 b	3,51 ± 0,16 c	6,55 ± 0,16 a	0,20 ± 0,02 c
Ref. **	15 a 30	3 a 5	< 8	> 0,2

Tratamientos (T): 1) Sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) con pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD). 2) SCCP sin corrección con aplicación de SD. 3) SCCP con pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC). 4) SCCP sin corrección con aplicación de NC. 5) SCCP con el pH corregido. 6) SCCP sin corrección. \*Se indican valores de las variables ± desvío estándar. Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el test de Tukey. \*\* Rangos y límites de referencia (Ref.) Fuente: Llera y Medina (2017); Capellari (2017); Gabira et al. (2020); Eibl et al. (2022).

requerido, para el IR no hubo diferencias significativas entre los plantines de los diferentes tratamientos ( $p = 0,0816$ ) (Tabla 5). Pero para el ICD sí hubo diferencias ( $p = 0,0002$ ) (Tabla 5). Los plantines desarrollados en el tratamiento con SCCP corregido tuvieron el mayor valor y se diferenciaron de los desarrollados en los tratamientos con SCCP sin corrección y en el SCCP sin corrección con aplicación de NC.

El ICD es un buen indicador de la calidad de los plantines, ya que es una medida morfológica integrada donde considera en su cálculo la

robustez y el equilibrio de la distribución de la biomasa (Fonseca et al., 2002). Por lo tanto, hubo una mejora en la calidad general de los plantines desarrollados en los tratamientos con SCCP corregido sin aplicación y con aplicación de SD y NC, como también, en el sustrato a SCCP sin corrección con aplicación de SD.

#### **Análisis de elementos minerales en hojas de los plantines de YM**

Según los rangos de referencia (Tabla 6), obtenidos para cada macroelemento mineral a

partir de los resultados alcanzados por diferentes autores (Santin et al., 2013; Trautenmüller et al., 2016; Skromeda, 2019; Girardi et al., 2024) (Tabla 6), el contenido de N y K foliar en todos los tratamientos fue inferior al rango y el de P se encontró dentro del rango, pero cercano al límite inferior. Para la finalización del ensayo el FLC aplicado en el sustrato ya había liberado todos los nutrientes y no se volvió a fertilizar, debido a que los plantines pasaban a la etapa de rustificación, etapa en que se pretende conseguir la adaptación del mismo a las condiciones de cultivo (Capellari, 2017; Eibl et al., 2022). Por lo tanto, el contenido de N, P y K en la solución del sustrato fueron bajos.

Hubo diferencias significativas entre los tratamientos para N y P (N:  $p < 0,0001$ ; P:  $p < 0,0001$ ) (Tabla 6). Los plantines desarrollados en los tratamientos con SCCP sin corrección tuvieron mayor valor de N y P, en particular, los del tratamiento con aplicación de NC. Además, el contenido de N y P foliar tuvo una correlación alta negativa con el pH inicial y media negativa con el pH final del sustrato (Tabla 7). Lucas y Davis (1961), Peterson (1982), Altland y Buamscha (2008) evaluaron el efecto del pH del sustrato sobre la disponibilidad de los nutrientes, y coincidieron que el N en el sustrato en forma de  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NO}_3^-$  no son afectados ante las variaciones de pH. No obstante, Altland et al. (2008) analizaron sustratos, formulados a base de corteza de abeto (*Picea abies* L. Karst), con diferentes valores de pH, fertilizados con FLC y encontraron que, aunque

los valores fueron bajos, el contenido de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  disminuyó al aumentar el pH del sustrato. Altland et al. (2008) también concluyeron que el P de la solución del sustrato disminuye con el aumento del pH. Mismos resultados obtuvieron Barbaro et al. (2023) en SCCP corregidos con dolomita o polvo de roca basáltica para obtener diferentes valores de pH. Por lo tanto, estas variaciones en la disponibilidad de nutrientes en la solución del sustrato provocaron un menor contenido de N y P en las hojas de los tratamientos con SCCP corregidos.

El contenido de K foliar se diferenció entre los tratamientos ( $p < 0,0001$ ) (Tabla 6). En este caso, los tratamientos con SCCP corregido y sin corrección tuvieron los valores más bajos y se diferenciaron de los restantes tratamientos. La correlación del K con el pH inicial fue baja positiva y con el pH final fue media positiva (Tabla 7). Estos resultados fueron similares a los obtenidos por Peterson (1982), quien informó como resultado de sus ensayos que la disponibilidad de K no fue afectada por el pH, contrario a los resultados obtenidos por Altland et al. (2008) y Barbaro et al. (2023), quienes observaron un aumento a partir de pH: 6.

Los valores de Ca foliar se encontraron dentro del rango de referencia (Tabla 6), excepto por el tratamiento con SCCP corregido con aplicación de SD, cuyo valor superó levemente. En cambio, los valores de Mg foliar en todos los tratamientos fueron superiores al rango de referencia (Tabla 6).

Por otro lado, hubo diferencias significativas

**Tabla 6. Contenido de macroelementos minerales en hojas de los plantines de yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) de cada tratamiento.**

**Table 6. Content of mineral macroelements in leaves of yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) seedlings for each treatment.**

T	g kg MS <sup>-1</sup>				
	N	P	K	Ca	Mg
T 1	10,74 ± 0,01* f	1,05 ± 0,07 bc	9,23 ± 0,22 a	5,19 ± 0,05 a	7,91 ± 0,01 a
T 2	11,93 ± 0,03 b	1,13 ± 0,05 bc	8,99 ± 0,32 a	4,43 ± 0,06 c	7,33 ± 0,02 b
T 3	10,84 ± 0,03 e	1,02 ± 0,06 c	9,13 ± 0,13 a	4,50 ± 0,06 c	6,68 ± 0,05 c
T 4	12,16 ± 0,16 a	1,36 ± 0,02 a	9,63 ± 0,39 a	4,38 ± 0,04 c	6,43 ± 0,12 d
T 5	10,94 ± 0,03 d	1,11 ± 0,03 bc	7,49 ± 0,20 b	4,67 ± 0,04 b	7,35 ± 0,06 b
T 6	11,17 ± 0,05 c	1,15 ± 0,04 b	7,01 ± 0,28 b	4,39 ± 0,04 c	6,61 ± 0,05 c
Ref. **	16,10 - 24,00	0,90 - 1,40	15,50 - 27,90	4,40 - 4,90	3,70 - 4,70

Tratamientos (T): 1) Sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) con pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD). 2) SCCP sin corrección con aplicación de SD. 3) SCCP con pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC). 4) SCCP sin corrección con aplicación de NC. 5) SCCP con el pH corregido. 6) SCCP sin corrección. \*Se indican valores de las variables ± desvío estándar. Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el test de Tukey. \*\*Rangos de referencia (Ref.) obtenidos a partir del análisis de elementos minerales en hojas de plantas jóvenes de yerba mate (<1 año). Fuente: Santin et al., 2013; Trautenmüller et al., 2016; Skromeda, 2019; Girardi et al., 2024.

**Tabla 7. Coeficientes de correlación de Pearson entre los elementos minerales de las hojas y las variables de calidad morfológica de los plantines de yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) con el pH inicial y final del sustrato.**

**Table 7. Pearson correlation coefficients between mineral elements in leaves and morphological quality variables of yerba mate seedlings (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) with initial and final pH values of the substrate.**

	pH inicial	pH final
N (g kg MS <sup>-1</sup> )	-0,83	-0,45
P (g kg MS <sup>-1</sup> )	-0,70	-0,56
K (g kg MS <sup>-1</sup> )	0,04	0,57
Ca (g kg MS <sup>-1</sup> )	0,68	0,77
Mg (g kg MS <sup>-1</sup> )	0,50	0,69
Zn (g kg MS <sup>-1</sup> )	-0,91	-0,85
Mn (g kg MS <sup>-1</sup> )	-0,95	-0,88
Cu (g kg MS <sup>-1</sup> )	-0,42	-0,43
Fe (g kg MS <sup>-1</sup> )	-0,62	-0,12
MSA (g)	0,86	0,74
MSR (g)	0,66	0,68
Longitud (cm)	0,69	0,74
Diámetro (mm)	0,77	0,80
IR	-0,07	-0,07
ICD	0,85	0,72

MSA: masa seca aérea, MSR: masa seca radical, ID: índice de robustez e ICD: índice de calidad de Dickson.

entre los tratamientos para Ca y Mg foliar (Ca:  $P < 0,0001$ ; Mg:  $P < 0,0001$ ) (Tabla 6). Los plantines del tratamiento con SCCP corregido con aplicación de SD tuvieron el mayor contenido de Ca y de Mg diferenciándose con los restantes tratamientos, seguido por el tratamiento con SCCP corregido. La correlación entre el Ca y el Mg con el pH final fue alta positiva. Peterson (1982), Altland et al. (2008) y Barbaro et al. (2023) concluyeron que la concentración de Ca y Mg en la solución de los sustratos orgánicos evaluados aumenta con el incremento del pH. Además, se destaca que tanto el Ca como el Mg proveniente de los correctores se liberan y están potencialmente disponibles para la absorción de la planta (Altland y Jeong, 2016), como fue en este caso la dolomita proveniente de la SD y la incorporada al SCCP inicialmente.

En adición, se observó que los plantines de los mismos tratamientos que tuvieron mayor contenido de Ca y Mg foliar, también resultaron con mayor MSA, MSR, diámetro e ICD. Las variables morfológicas mencionadas y la longitud del tallo, tuvieron una correlación alta positiva con el pH inicial y final del sustrato (Tabla 7). Según Santin et al. (2013) la YM no responde al encalado o corrección del pH, sino que se debería apuntar al suministro de Ca y Mg. En sus ensayos,

los resultados muestran que en la mayoría de las variables medidas en las plantas jóvenes, los valores fueron mayores en los tratamientos con bajas dosis de dolomita en comparación al tratamiento sin aplicación.

En base a lo mencionado, para los macroelementos minerales en hoja se observó una disminución de N y P, y un aumento de Ca y Mg en los plantines desarrollados en los sustratos que finalizaron con un pH entre 5,4 a 6,2, en comparación con los que finalizaron con un pH entre 4,3 a 5,3. El contenido foliar de K no fue afectado por el pH.

Con respecto a los microelementos minerales analizados, el contenido foliar de Zn en todos los tratamientos superó el rango de referencia (Tabla 8) obtenido a partir de resultados alcanzados por diferentes autores (Santin et al., 2013; Trautenmüller et al., 2016; Girardi et al., 2024). El contenido foliar de Mn también fue superior al rango de referencia para los tratamientos con SCCP no corregido, pero los tratamientos con SCCP corregidos se encontraron dentro del rango, excepto por el valor del tratamiento sin aplicación de SD o NC que fue levemente superior al rango. El contenido foliar de Cu en todos los tratamientos fue inferior al rango de referencia

**Tabla 8. Contenido de microelementos minerales en hojas de los plantines de yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) de cada tratamiento.****Table 8. Content of mineral microelements in leaves of yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) seedlings for each treatment.**

T	mg kg MS <sup>-1</sup>			
	Zn	Mn	Cu	Fe
T 1	274,90 ± 0,51* d	422,39 ± 5,68 e	2,26 ± 0,29 b	115,14 ± 2,92 b
T 2	307,69 ± 2,00 b	1129,98 ± 1,75 b	2,06 ± 0,58 b	116,04 ± 2,66 b
T 3	289,96 ± 0,57 c	638,13 ± 4,09 d	3,62 ± 0,07 a	101,05 ± 1,50 c
T 4	333,91 ± 1,23 a	1228,49 ± 5,78 a	4,24 ± 0,49 a	141,06 ± 2,01 a
T 5	278,06 ± 0,87 d	716,78 ± 5,29 c	1,61 ± 0,30 b	76,13 ± 0,71 d
T 6	332,02 ± 1,31 a	1231,70 ± 5,50 a	3,61 ± 0,51 a	106,95 ± 1,92 c
Ref. **	12,00 a 55,70	125,00 a 674,60	6,20 a 8,00	47,10 a 232,00

Tratamientos (T): 1) Sustrato a base de compost de corteza de pino (SCCP) con pH corregido y aplicación de suspensión dolomítica (SD). 2) SCCP sin corrección con aplicación de SD. 3) SCCP con pH corregido y aplicación de nitrato de calcio (NC). 4) SCCP sin corrección con aplicación de NC. 5) SCCP con el pH corregido. 6) SCCP sin corrección. \*Se indican valores de las variables ± desvío estándar. Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el test de Tukey. \*\*Rangos de referencia (Ref.) obtenidos a partir del análisis de elementos minerales en hojas de plantas de yerba mate (<1 año). Fuente: Santin et al. 2013; Trautenmüller et al., 2016; Girardi et al., 2024.

y el de Fe en todos los tratamientos se encontró dentro del rango.

Hubo diferencias significativas entre los tratamientos para todos los microelementos (Zn:  $p < 0,0001$ ; Mn:  $p = 0,0007$ ; Cu:  $p < 0,0001$ ; Fe:  $p < 0,0001$ ) (Tabla 8). Los plantines desarrollados en los tratamientos con SCCP sin corrección con y sin aplicación de NC tuvieron los mayores valores de Zn y Mn, diferenciándose con los restantes tratamientos. Los plantines desarrollados en los tratamientos con SCCP con y sin corrección, ambos con aplicación de NC y SCCP sin corrección tuvieron los mayores valores de Cu. Y los plantines desarrollados en el tratamiento con SCCP sin corrección con aplicación de NC tuvieron el mayor contenido de Fe. La correlación de los microelementos analizados con el pH inicial y final fue negativa; en el caso del Zn y Mn fue alta (Tabla 7). Los resultados coinciden con los alcanzados por Peterson (1982), Altland et al. (2008) y Barbaro et al. (2023) quienes cuantificaron en sustratos orgánicos la solubilidad de nutrientes en diferentes niveles de pH y observaron que la disponibilidad del Zn, Mn, Cu y Fe, decrecía con el aumento del pH.

En general, los tratamientos con SCCP corregido tuvieron una concentración de microelementos minerales en hoja menor que los tratamientos con SCCP no corregidos.

## CONCLUSIONES

Entre las estrategias de manejo agronómico evaluadas para que el pH del sustrato a base de compost de corteza de pino se encuentre en el rango adecuado (5,3-6,5) desde el repique hasta la obtención de los plantines de yerba mate; se destaca la corrección del pH del sustrato a base de compost de corteza de pino con dolomita antes de rellenar las bandejas y la aplicación de suspensión dolomítica en el sustrato a base de compost de corteza de pino no corregido durante el desarrollo de los plantines.

Estas estrategias produjeron un aumento de la masa seca aérea, masa seca radical, longitud y diámetro del tallo e índice de calidad de Dickson de los plantines de yerba mate en comparación con los desarrollados en el tratamiento con sustrato a base de compost de corteza de pino sin corregir. Además, se observó que en general las hojas de los plantines de yerba mate provenientes de los tratamientos con sustrato a base de compost de corteza de pino corregido (pH: 5,4-6,2) tuvieron menor contenido de N, P, Zn, Mn, Cu y Fe y mayor contenido de Ca y Mg que los plantines de los tratamientos con sustrato a base de compost de corteza de pino no corregidos (pH: 4,3-5,3).

Se realizarán nuevos ensayos para aplicar las estrategias mencionadas en otros tipos de sustratos orgánicos y confirmar resultados.

### Contribución de cada autor

Lorena Alejandra Barbaro: Participación activa en la revisión bibliográfica, elaboración de la metodología, discusión de los resultados, revisión y aprobación de la versión final del artículo.

Esteban Rubio: Participación activa en la discusión de los resultados, revisión y aprobación de la versión final del artículo.

Mónica Alejandra Karlanian: Participación en la revisión y aprobación de la versión final del artículo.

Bárbara Eloísa Iwasita: Participación en la revisión y aprobación de la versión final del artículo.

### LITERATURA CITADA

- Abad Berjón, M., P. Noguera Murray, and S. Burés. 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresource Technology* 77(2):197-200. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00152-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00152-8)
- Altland, J.E., and M.G. Buamscha. 2008. Nutrient availability from douglas fir bark in response to substrate pH. *HortScience* 43(2):478-483. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.2.478>
- Altland, J.E., M.G. Buamscha, and D.A. Horneck. 2008. Substrate pH affects nutrient availability in fertilized Douglas fir bark substrates. *HortScience* 43(7): 2171-2178. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.2171>
- Altland, J.E., and K.Y. Jeong. 2016. Dolomitic lime amendment affects pine bark substrate pH, nutrient availability, and plant growth: A Review. *HortTechnology* 26(5):565-573. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH03465-16>
- Altland, J.E. 2021. The pour-through procedure for monitoring container substrate chemical properties: A review. *Horticulturae* 7(12): 536. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120536>
- Albano, J.P., J. Altland, D.J. Merhaut, S.B. Wilson, and P.C. Wilson. 2017. Irrigation water acidification to neutralize alkalinity for nursery crop production: Substrate pH, electrical conductivity, nutrient concentrations, and plant nutrition and growth. *HortScience* 52(10):1401-1405. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11439-17>
- Agarwal, P., S. Saha, and P. Hariprasad. 2023. Agro-industrial-residues as potting media: Physicochemical and biological characters and their influence on plant growth. *Biomass Conversion and Biorefinery* 9:1-24. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01998-6>
- Ansorena Miner, J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. p. 172. 1ª ed. Mundi Prensa, Madrid, España.
- Batalla, G.A. 2019. Evaluación de la fenología de plantas cultivadas de Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) como base para un modelo predictivo de rendimiento de hoja verde. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. <https://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/47752>
- Barbaro, L.A., A. Mazzoni, M.A. Karlanian, M.N. Fernandez y D.E. Morisigue. 2014. Cenizas del volcán Puyehue como sustrato para plantas. *Horticultura Argentina* 33(81):44-53. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/10155>
- Barbaro, L.A., M.A. Karlanian, P. Rizzo y N. Riera. 2019. Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences* 35(2):126-136. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000309>
- Barbaro, L.A., D. Sisaro, S. Stancanelli y M.S. Soto. 2021. Polvo de ladrillo como sustrato para techos verdes extensivos. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences* 37(1):81-91. <http://dx.doi.org/10.29393/chjaas37-9p11b40009>
- Barbaro, L.A. 2023. Evaluación de las propiedades físicas del sustrato para la producción de plantines de YM. *Ciencia del Suelo* 41(2):131-143. <https://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/786>
- Barbaro, L.A., B.E. Iwasita, M.A. Karlanian y E.J. Rubio. 2023. Utilización de polvo de roca basáltica en comparación con la dolomita para ajustar el pH de un sustrato a base de compost de corteza de pino y su respuesta en la disponibilidad de nutrientes. *AgriScientia* 40(2):49-56. <http://dx.doi.org/10.31047/1668.298x.v40.n2.40487>
- Cabrera, R.I., A.R. Solís Pérez y W.J. Cuervo Bejarano. 2017. Tolerancia y manejo de salinidad, pH y alcalinidad en el cultivo de flores. p. 63-73. En R.V.J Flórez (Ed.). Consideraciones sobre producción, manejo y poscosecha de flores de corte con énfasis en rosa y clavel. Editorial Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Capellari, P.L. 2017. Propagación sexual a escala comercial: vivero tradicional y tecnificado donde comienza todo. p. 103-112 En P.L. Capellari (Ed). Yerba Mate. Reseña Histórica y Estadística. Producción e Industrialización en el siglo XXI. Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires, Argentina.

- Castro, E.B., L.D.T. Santos, L.A. Fernandes y C.Y. Tajima. 2016. Silicato de Aluminio em Substrato para Produção de Mudras de *Corymbia citriodora*. *Floresta e Ambiente* 23(2):229-236. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.106814>
- De Boodt, M., O. Verdonck, and J. Cappaert. 1974. Methods for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae* 37:2054-2062. [10.17660/ActaHortic.1974.37.20](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1974.37.20)
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo. 2009. InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Dickson, R.W., and P.R. Fisher. 2019. Quantifying the acidic and basic effects of vegetable and herb species in peat-based substrate and hydroponics. *HortScience* 54(6): 1093-1100. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13959-19>
- Dickson, R.W., P.R. Fisher, W.R. Argo, D.J. Jacques, J.B. Sartain, L.E. Trenholm, and T.H. Yeager. 2016. Solution ammonium: nitrate ratio and cation/anion uptake affect acidity or basicity with floriculture species in hydroponics. *Scientia Horticulturae* 200:36-44. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.034>
- Duboc, E. 2015. Erva-mate: parâmetros para seleção de planta matriz e área de coleta de sementes. 1ª Reunião Técnica sobre Produção de Mudras de Erva-Mate em Mato Grosso do Sul
- Embrapa Agropecuária Oeste. Mato Grosso do Sul, Brasil. Disponible en <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1040583/1/DOC2015132ERVAMATE.pdf>. (Consulta 14 febrero 2024)
- Eibl B., C. González, J. Cortes, M. De la Vega, D. Erbeta, H. Krausemann, G. Ortiz, M. Ortega, J. Kornuta, F. Gnass, R. Ramos, H. Hessler, P. Stej, G. Lorenzon, J. Kiefl, R. Ebert, A. Lecanda, A. Sackser K. Angermeier y N. Gasser. 2022. Documento Técnico Producción de Plantines de YM (*Ilex paraguariensis* A. ST.-HIL.) a partir de semillas. INYM. Misiones, Argentina. Disponible en <https://inym.org.ar/descargar/publicaciones/material-de-consulta/guiasmanuales-y-folletos/3039-documento-tecnico-produccion-de-plantines-de-yerba-mate-ilex-paraguariensis-a-st-hil-a-partir-de-semillas.html> (Consulta 8 febrero 2024).
- Fascella, G. 2015. Growing substrates alternative to peat for ornamental plants. p. 47-67. In Md. Asaduzzaman (Eds.). *Soilless Culture Use of Substrates for the Production of Quality Horticultural Crops*. IntechOpen Limited, London, Inglaterra.
- Fisher, P.R., Dickson R.W., G.S. Mohammad-Pour, and J. Huang. 2013. Effect of solution electrical conductivity (EC) and pre-plant nutrient form on the pH of a peat-perlite substrate. p. 249-254. In *International Symposium on Growing Media and Soilless Cultivation 1034*. Leiden, Países Bajos. [10.17660/ActaHortic.2014.1034.30](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1034.30)
- Fonseca, E.P., S.V. Valeri, E. Miglioranza, N.A.N. Fonseca, e L. Couto. 2002. Padrão de Qualidade de mudras de *Trema micrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. *Revista Árvore* 26(4):515-523. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000400015>
- Gabira, M.M., J.F.P. Gomes, D. Kratz, I. Wendling, and C.A. Stuepp. 2020. Industrial residues as substrate components for the production of *Ilex paraguariensis* seedlings. *Comunicata Scientiae* 11:3215-3215. <https://doi.org/10.14295/cs.v11i.3215>
- Gayosso Rodríguez, S., L. Borges Gómez, E. Villanueva Couoh, M.A. Estrada Botello y R. Garruña. 2018. Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia* 52(4): 639-652. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952018000400639&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952018000400639&script=sci_arttext)
- Girardi, E., I.F. Zampier, P.H. Petranski, K.C. Lombardi, and F.W. de Ávila. 2024. Soil fertility and yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) growth under sheep manure or mineral fertilization in monoculture or intercropped with *Mimosa scabrella* Benth. *Agroforestry Systems*, 98(1):81-101. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-023-00892-6>
- Gruda, N.S. 2019. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy* 9(6):298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
- INYM. 2022. Cantidad de hectáreas cultivadas en Misiones y Corrientes. Superficie cultivada por Departamentos. Disponible en <https://inym.org.ar/descargar/publicaciones/estadisticas/superficie-cultivada-por-departamento/2801-cantidad-de-hectareas-cultivadas-en-misiones-y-corrientes.html> (Consulta 8 marzo 2024).
- Jeong, K.Y., C.C. Pasian, M. McMahan, and D. Tay. 2010. Response of six begonia species to fertilizer concentration and substrate pH. *The Open Horticulture Journal* 3:36-46. [10.2174/1874840601003010036](https://doi.org/10.2174/1874840601003010036)

- Jeong, K.Y., P.V. Nelson, C.E. Niedziela, and D.A. Dickey. 2016. Effect of plant species, fertilizer acidity/basicity, and fertilizer concentration on pH of soilless root substrate. *HortScience* 51(12):1596-1601. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11237-16>
- Krug, B.A., A. Papineau, and J.S. Owen. 2013. Comparing controlled release fertilizers to constant liquid feed for zonal geranium production. p. 525-529. In *International Symposium on Growing Media and Soilless Cultivation 1034*. Leiden, Países Bajos. 10.17660/ActaHortic.2014.1034.66
- Lucas, R.E., and J.F. Davis. 1961. Relationships between pH values of organic soils and availabilities of 12 plant nutrients. *Soil science* 92(3):177-182. [https://journals.lww.com/soilsci/citation/1961/09000/RELATIONSHIPS\\_BETWEEN\\_PH\\_VALUES\\_OF\\_ORGANIC\\_SOILS.5.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/citation/1961/09000/RELATIONSHIPS_BETWEEN_PH_VALUES_OF_ORGANIC_SOILS.5.aspx)
- Llera, V. y R.D. Medina. 2017. Hacia el logro del establecimiento exitoso de las plantas para garantizar una producción sustentable y duradera. p. 153-168. En P.L. Capellari (Ed.). *Yerba Mate. Reseña Histórica y Estadística. Producción e Industrialización en el siglo XXI*. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires, Argentina.
- Marques, J.J., C. Burille, C. Schuster, M.A.A. Brandoli, D. Rocha, B. Bresolin, P. Rodrigues, D. Diovane Cardoso, M. Brock, A. Mallmann e J.D. Silveira. 2013. Erva-mate: guia para aplicação das boas práticas agrícolas. Emater/RS-ASCAR. Lajeado, Brasil. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/erva-mate/anos-anteriores/boas-praticas-agricolas-sebrae.pdf>
- Morales Pérez, E. 2018. Indicadores de calidad de planta en viveros forestales del estado de Tamaulipas. Tesis de Maestría. Facultad de ciencias forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México. <http://eprints.uanl.mx/15965/>
- Othman, Y., K. Bataineh, M. Al Ajlouni, N. Alsmairat, J. Ayad, S. Shiyab, B. Al Qarallah, and R. St Hilaire. 2019. Soilless culture: Management of growing substrate, water, nutrient, salinity, microorganism and product quality. *Fresenius Environmental Bulletin* 28(4):3249-3260.
- Owen, W.G., B.E. Whipker, J.B. Henry, P. Cockson, and H. Landis. 2018. Low substrate pH-induced Iron/Manganese toxicity of New Guinea impatiens: A Diagnostic Guide. *Plant health progress* 19(4):324-328. <https://doi.org/10.1094/PHP-06-18-0031-DG>
- Pancerz, M. and J.E. Altland. 2020. pH buffering in pine bark substrates as a function of particle size. *HortScience* 55(11):1817-1821. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14969-20>
- Pennisi, S.V., and P.A. Thomas. 2009. Essential pH management in greenhouse crops-part 1: pH and plant nutrition. Universidad de Georgia. Disponible en <https://esploro.lib.uga.edu/esploro/>