

Diseño Preliminar de un Sistema de Riego Automatizado para Plantaciones de Yerba Mate en Misiones: Viabilidad Técnica y Marco Legal

Demarchi Franco Brian Nicolás ^{a*}, Viarengo Gino Marco ^a, Wisniewski Brian Ernesto ^a, Oliveira Mario Orlando ^a, Cabral Roberto Jose ^a

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.
e-mails: demarchyfranco13@gmail.com, gino.viarengo@gmail.com, brian190194@gmail.com,
mario.oliveira@fio.unam.edu.ar, robert_rjc@hotmail.com

Resumen

Este artículo evalúa la viabilidad técnica y legal de implementar un sistema de riego remolcable automatizado para plantaciones de Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) en la provincia de Misiones, Argentina. A partir de entrevistas a productores y análisis de casos de estudio, se identificaron los principales desafíos de los métodos de riego actuales (dependencia de lluvias, altos costos de mano de obra e ineficiencia en sistemas por goteo). El estudio cuantifica los requerimientos hídricos del cultivo (3-7 L/planta/día) y propone un esquema operativo basado en un tanque de 3000 litros acoplado a un tractor, con riego selectivo mediante electroválvulas controladas electrónicamente. Se analizan normativas nacionales y estándares internacionales aplicables al proyecto. Los primeros resultados del estudio de viabilidad muestran que la automatización reduciría las pérdidas por sequía y optimizaría el uso de agua frente a métodos tradicionales. El trabajo sienta las bases para futuros desarrollos tecnológicos, aunque no profundiza en detalles de diseño mecánico y electrónico.

Palabras Clave – Agricultura de precisión, Marco legal, Plantaciones, Riego automatizado, Yerba mate.

1 Introducción

La yerba mate (YM), cuyo nombre científico es *Ilex paraguariensis*, es una especie de planta nativa de la selva húmeda subtropical del Bosque Atlántico Interior en Argentina, Paraguay y Brasil. En Argentina, su cultivo se concentra principalmente en la provincia de Misiones y el norte de Corrientes, donde las condiciones climáticas y del suelo favorecen su desarrollo. Esta planta se caracteriza por requerir de suelos arcillosos, húmedos, profundos y con buen drenaje para su crecimiento y formación.

Se presenta especial interés a las plantaciones de YM en la región de la Provincia de Misiones y parte de la Provincia de Corrientes, Argentina, debido a la gran extensión de este cultivo en campo, siendo la región centro de Misiones la que posee mayor superficie cultivada y a la cual se realizaron visitas y recopilación de datos. En la Fig. 1 se representa dicha zona con los datos brindados por el INYM [1].

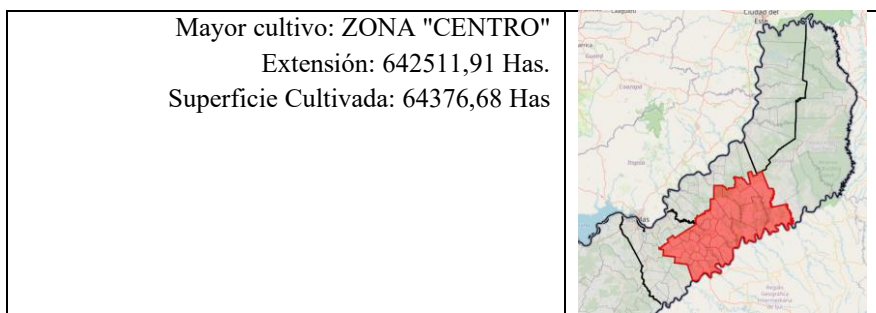


Fig. 1. Zona centro de cultivo de yerba mate en Misiones [1].

1.1 Producción de plantines en viveros

La producción de plantines de YM comienza con la recolección de semillas seleccionadas de árboles madre (de 2 años de edad si provienen de propagación vegetativa o 5 si provienen de semillas [2]) en lotes certificados y preferentemente, desde enero hasta abril, cuando adquieren color tinto-morado-negro [3]. Las semillas se extraen mediante despulpado manual o mecánico, seguido de un proceso de lavado y secado a sombra por 48 horas para eliminar residuos de pulpa [4].

La siembra se efectúa entre marzo y mayo, distribuyendo las semillas en los almácigos en cantidad de 250 a 500 g de semilla por metro cuadrado y luego tapando con una delgada capa de tierra. Según lo informado por productores, la mayoría preparan los almácigos con sustrato estéril de corteza de pino compostada (CPC) con resultados satisfactorios, donde se suele usar una mezcla de CPC con un 30-50 % de arcilla/tierra de monte/abonos caseros o en mezcla con perlita y turba. La arcilla, tierra de monte y los abonos caseros deben desinfectarse previo a su utilización en los almácigos [4]. Según [5], el pH del sustrato de CPC, debe controlarse manteniendo niveles entre 5,3 y 6,5, aplicando 2 g de dolomita por litro de sustrato. Además, el invernadero del vivero debe poseer un techo cubierto por agrotileno LDT de 150 micrones y media sombra 50% [3], para proteger a los plantines contra las bajas temperaturas de invierno y altas radiaciones en verano.

Tras 6-8 meses, se trasladan los plantines a zonas de rustificación por 45 días para su aclimatación, reduciendo gradualmente el riego y la protección lumínica [4].

Según [3], en los almácigos o viveros tecnificados, transcurren de 7 a 8 meses desde la germinación, hasta llegar a un plantín en condiciones aptas para el campo. Tras la rustificación, la dimensión del plantín ideal es de 25-30 cm de altura total y 3-5 mm de diámetro del cuello [4].

1.2 Plantación en campo abierto

Los plantines producidos en los viveros son plantados posteriormente en campos de la región subtropical húmeda Argentina, más precisamente en las provincias de Misiones y Nordeste de Corrientes, porque allí los regímenes de lluvias son alrededor de 1800 milímetros anuales y las temperaturas medias de 21° C [6], como así también se dispone de suelos aptos para este cultivo. Previo a la plantación, se laborea el suelo con alguna de las metodologías existentes, siendo lo más común una preparación tradicional, con por lo menos una arada y dos o tres rastreadas [3]. La preparación del suelo y la plantación de YM contempla las siguientes etapas:

- Laboreo Inicial: Consiste en un subsolado a 30-40cm, para romper capas compactadas y marcar las líneas de plantación. Experiencias de productores indican que el subsolado a profundidades de 80 cm, mejora las posibilidades de implantación y crecimiento de las plantas de yerba mate [3]. En la Fig. 2 se observa un subsolador trabajando la tierra [7].
- Diseño de la Plantación: Algunas configuraciones comúnmente utilizadas son [7]:
 - Líneos simples: 3 m entre líneas y 1,5 m entre plantas (2222 plantas/ha).
 - Líneos dobles: 3 m entre calles y 1,5 m entre líneas dobles por 1,2 m entre plantas (5555 plantas/ha).
- Técnica de Plantación:

- Los plantines se trasladan a campo en la temporada óptima de plantación (15 de abril al 15 de septiembre para plantines en macetas; junio-julio para raíz desnuda) [3].
- Plantación manual con pozos de 40 cm de diámetro y 30-40 cm de profundidad, incorporando una cantidad de fertilizante variable según el grado equivalente de nutrientes requeridos por el terreno (Nitrógeno, fósforo y potasio), o plantación mecanizada, utilizando una máquina acoplada al sistema de 3 puntos del tractor [7].
- En suelos con pendiente de hasta el 2% se recomienda emplear un espaciamiento de curvas de nivel de 40 m y hasta 3% el espaciamiento debería ser de 35 m, para controlar la erosión hídrica. Con pendientes del 10 al 15%, el escurrimiento es muy rápido y para proteger los suelos se deben construir terrazas o bancales [7].



Fig. 2. Subsolador trabajando a la máxima profundidad [7].

2 **Sistemas de riego para plantaciones de YM**

2.1 Problemáticas identificadas en los sistemas de riego para YM

Los sistemas de riego empleados actualmente en las plantaciones de YM presentan limitaciones técnicas y operativas, según información obtenida por productores [8][9][10]. Los principales problemas identificados son:

- A. Dependencia de precipitaciones: Un gran porcentaje de los productores de Misiones dependen exclusivamente de las lluvias, lo que genera:
 - Pérdidas alrededor del 30% [11][12] en plantaciones jóvenes (menores de 3 años) durante eventos de sequía (El Niño/La Niña) [13][14].
 - Irregularidad en la producción, con una fluctuación interanual del 24% en rendimiento, registrada entre los años 2023 y 2024 [15].
- B. Poca eficiencia del riego manual: Existe una investigación [16] que demuestra que, con un sistema de riego automatizado por aspersión, se obtuvo un ahorro de tiempo de riego del 80% y un ahorro de agua de 45%, comparado con el riego manual. Este elevado tiempo de riego manual, que puede concretarse incluso en varias horas, se condice con la experiencia de productores (entrevistas realizadas a productores [8][9][10]).
- C. Costos elevados del riego por goteo:

- Costo de instalación elevado, con una inversión de 4500 U\$S/ha en materiales, instalación y equipos de bombeo, según Sebastián Halpern, fundador y socio de Masteragua (empresa dedicada al diseño de sistemas de riego agrícolas) [17].
- Alto costo de mantenimiento por obstrucción frecuente de tuberías y cabezales por sedimentos. Dependiendo de la calidad del agua e impurezas, esta operación de limpieza de materiales varía entre una a tres veces por temporada, según [18].

Como se observa, ninguno de los métodos de riego actualmente existentes, es totalmente seguro, ya que el primero (precipitaciones) es asequible y rápido, pero no es confiable en periodos de sequía. El segundo (riego manual) es confiable y eficiente por la experiencia de los agricultores y el control que ellos tienen sobre la cantidad de agua regada en cada planta, pero no es asequible y demora mucho tiempo. Luego, la tercera opción (riego por goteo) es eficiente, pero no es asequible, ni confiable porque se pueden tapar constantemente los orificios de las mangueras. Por lo tanto, esto justifica la creación de un equipo de riego que sea asequible, confiable, eficiente y rápido y que pueda ser remolcado por tractor, trayendo consigo las siguientes ventajas: simplificación del mantenimiento del sistema y de las actividades de riego, la necesidad de menor cantidad de operarios y la reducción de las pérdidas en los cultivos.

2.2 Estudio del riego en plantaciones de yerba mate

Luego de realizar entrevistas a dos productores distintos (VYO SRL [8][10] y Prod. E. Siruk [9]) dedicados al cultivo de YM, se prestó especial interés a la problemática mencionada sobre el riego y la falta de lluvias que encarecen la producción, en la cual la planta es llevada a cultivarse en el campo hasta los tres primeros años. La información brindada indica que en estos primeros años es crucial la presencia de agua para el crecimiento eficiente del mismo; de igual manera, años posteriores a éste, el riego también es necesario para mantener la producción. Un ensayo realizado por la empresa VYO SRL, indicó la importancia que tiene la presencia del riego. El ensayo consistió en la plantación de YM en dos cuadros pequeños separados, en los cuales uno de ellos poseía riego por goteo con mangueras perforadas medidas, entregando un caudal constante durante todo el tiempo, mientras que el otro cuadro, solamente dependía del agua de lluvia. Los resultados del ensayo luego de varios meses de prueba indicaron un impacto positivo en las plantas con riego por goteo, ya que éstas poseían una estructura más robusta, de mayor altura y colores más vivos, tal como se puede ver en la Fig. 3 (a), comparado con las plantas del otro cuadro (dependiente de las lluvias), como se puede ver en la Fig. 3 (b). Esto indica claramente que el riego en la planta no solo sirve para salvarla en épocas de sequía, sino para lograr un aumento de aproximadamente un 50% en la producción (rendimiento) de la misma.

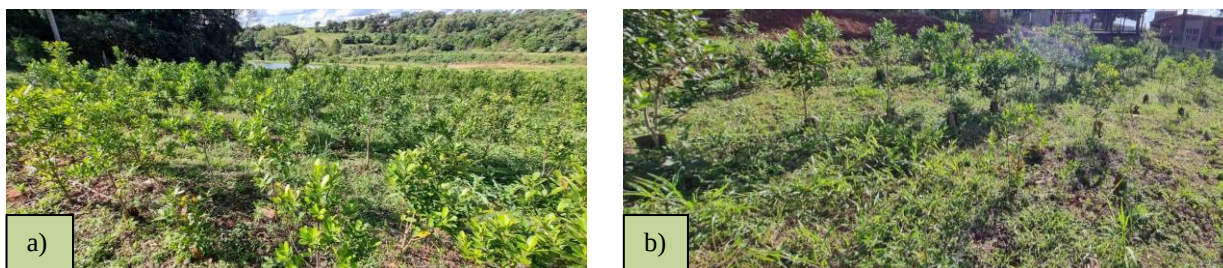


Fig. 3. (a) Cuadro de plantación con sistema de riego. (b) sin sistema de riego. Fotos tomadas en VYO SRL [8].

3 Procedimiento Metodológico

Para el diseño del equipo de riego, primeramente, se hizo un estudio de los diferentes parámetros que afectan su desempeño, ya sea por medio de bibliografías, o bien, a través de relevamientos y entrevistas realizadas a productores de YM. Entre las variables más importantes a tener en cuenta, se encuentran: la densidad y distribución de las plantaciones, la edad de las plantas, la cantidad de agua que requieren, la compactación del suelo y otras cuestiones referidas a las tareas de riego (como el horario y la cantidad de veces que se realiza por día o semana).

3.1 Densidad y distribución de las plantaciones

Normalmente se recomienda densidades mayores a 2000 plantas por hectárea, con la precaución de considerar el uso de las maquinarias y herramientas disponibles por el productor. Sin embargo, la densidad de plantación de YM es un factor crítico que influye directamente en el rendimiento, la eficiencia del riego y la tecnología de mecanización de esta actividad. Estudios demuestran que este parámetro debe optimizarse considerando los siguientes fundamentos técnicos y evidencia experimental:

A. Bases productivas:

- La vinculación entre las densidades de plantación con las prácticas de manejo asociadas, evidencian las brechas en los rendimientos del cultivo, clasificándolos en 4 perfiles [7]:
 - I) Bajo: Con densidad menor a 1200 plantas por hectárea (pl/ha) y rendimiento menor a 3000 kg de hoja verde por hectárea (kg/ha).
 - II) Medio: Densidad de 1200 a 1500 pl/ha y rendimiento entre 4000 y 7000 kg/ha.
 - III) Intensivo: Densidad de 1500 a 2500 pl/ha y rendimiento mayor a 7000 kg/ha.
 - IV) Industrial: Densidad mayor a 2500 pl/ha y rendimientos de más de 12000 kg/ha.

B. Configuraciones validadas experimentalmente:

- Líneos simples: (3m x 1,5m – 2222 pl/ha). Es la configuración más utilizada, en términos de porcentaje de superficie cultivada, correspondiéndole al 24,5% de la superficie total de YM cultivada en Misiones [1], con las siguientes ventajas:
 - Permite el tránsito de maquinaria estándar (tractores de hasta 80 HP).

- Facilita la poda mecánica lateral, por existir mayor espacio libre entre líneas.
- Líneos dobles: (3m por [1,5 + 1,5] m por 1,2m – 5555 pl/ha)
 - Permite una cosecha el doble de rápida que en línea simple, utilizando máquinas cosechadoras con trocha mayor a 2,5m, según las pruebas vistas en la visita [10].

En la Tabla 1 se puede ver una comparativa entre los distintos perfiles tecnológicos de cultivos de YM, en base a datos obtenidos del INYM, 2007.

Tabla 1. Comparativa entre los perfiles tecnológicos de cultivo de YM [19].

Perfil	Bajo	Medio	Intensivo	Industrial
Densidad pl/ha	Menos 1200	1200 - 1500	1500 - 2500	Más de 2500
Rendimiento kg/ha	Menos de 3000	4000 a 7000	Más de 7000	Más de 12000
Manejo del suelo	Erosión - compactación, enmalezados, sin cubiertas verdes, una sola limpieza anual	Aplicaciones de herbicidas, combina tareas mecánicas, 2 limpiezas: septiembre-octubre y febrero-marzo	Manejo de cubiertas verdes y herbicidas. 3 limpiezas por año: septiembre-octubre, febrero-marzo y mayo-junio	Cubiertas verdes, dos limpiezas por año: primavera y fin de verano-otoño
Fertilizante	No	Poco (octubre a febrero)	Sí y enmiendas octubre y febrero	Práctica necesaria en aplicación dividida octubre y febrero
Manejo de planta	Pobre, se limita sólo a cosecha	Incorpora apertura de plantas y poda de rejuvenecimiento en periodos largos	Remoción de ramas afectadas y podas de rejuvenecimiento	Alternancia de podas manuales y cosecha mecánica
Cosecha	Una sola entrada Descopado en cualquier época yerables "pelados"	Una sola entrada ramas maduras y se deja protección (ramas verdes sin cosechar)	Dos entradas anuales dejan a la planta bien protegida con ramas verdes. Puede hacerse "melena" y "copa"	Cosecha mecánica y cortadores con quebradores
Vida útil del yerbal	20 a 25 años	Más de 30 años con bajos rendimientos	25 - 30 años	20 años con el manejo descrito

3.2 Determinación del caudal de riego necesario

En base a pruebas y ensayos realizados por diferentes productores, se determinó que las plantas de YM requieren entre 3 y 7 litros de agua por día, y que no necesariamente se riegan a diario. Este parámetro no es constante y depende tanto de factores biológicos, como la genética y edad de la planta, como así también de las condiciones climáticas, como la frecuencia de lluvias y su cantidad en milímetros. En este trabajo, se tomaron como caso de estudio 3 cuadros de YM de un productor local [9], ubicadas en Colonia Alberdi, departamento de Oberá.

A. Cuadro de plantaciones nuevas de 3 años (Cuadro 1)

El cuadro 1 de YM se corresponde con el mostrado en la imagen satelital de la Fig. 4 (a). El sistema de riego propuesto utilizará puntos de riego dispuestos sobre 4 líneas en simultáneo, acoplados a un tanque central montado sobre la máquina de riego. El caudal de riego se definió en función del requerimiento hídrico promedio de la planta, considerando una aplicación de 6 litros (L)

por planta y por día. Dichos 6 L, se aplicarán en dos etapas: 3 L por la mañana y, llegando la noche, los 3 L restantes. Esto último se establece por la característica pivotante de las raíces de YM y la capacidad de absorción superficial que poseen las demás raíces, logrando un óptimo riego y acumulación de agua necesaria durante la noche, datos proporcionados en la entrevista [9].

Con esta configuración, se pueden regar 8 líneas sin la necesidad de recargar el tanque. Luego, para efectuar el riego del cuadro completo, se debe recargar el tanque 5 veces. Este sistema presenta una alta eficiencia, ya que el volumen del tanque cubre la totalidad del consumo calculado.

B. Cuadro de plantaciones jóvenes de 5 años (Cuadro 2)

El mismo análisis se realiza para el caso de un cuadro de mayor edad, como se puede ver en la Fig. 4 (b). En particular, este caso presenta menor cantidad de líneas y plantas, por lo cual con solo una recarga se logra el riego de todo el cuadro. En la Tabla 2 mostrada anteriormente se representan los resultados de los análisis obtenidos para el presente cuadro, indicando que, con una sola recarga del tanque se podrá regar toda la plantación.

C. Cuadro de plantaciones de 40 años (Cuadro 3)

En los cuadros de edad adulta, el riego no se aplicaría para salvar la planta, sino para aumentar y mantener su producción. Se observa en la Fig. 4 (c), el sector analizado, destacando que, para el análisis de todos los cuadros, se reubicaron los líneas y las plantas de forma cuadrada, para contabilizar de forma uniforme y de igual manera a todos los casos. En la Tabla 2 indicada anteriormente se representan los datos analizados, y se determinó que con 5 cargas del tanque se permite el riego para todas las plantas presentes.



Fig. 4. (a) Cuadro de plantaciones nuevas de 3 años. (b) De 5 años. (c) De 40 años.

Como demuestran los cuadros observados, todos son de características y disposiciones irregulares, con lo cual un riego manual no sería eficiente en cuanto al consumo de agua. Este comportamiento justifica el uso de electroválvulas con regulación de caudal, tal como propone el sistema en la Sección 2.6. Los resultados de los cuadros de YM analizados se representan en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de diferentes cuadros de plantaciones analizados

Parámetros	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 3
Longitud "a" (m)	135	161	235
Ancho "b" (m)	120	42	150
Área (ha)	1,62	0,676	3,53
Densidad (pl/ha)	2333,3	2751	1274,9
Agua por planta (L/pl)	3	3	3
Distancia entre lineos (m)	3	2,6	3,7
Distancia entre plantas (m)	1,5	1,3	2,2
Nº de lineos	42	15	42
Nº de plantas en 1 lineo	90	124	107
Agua por lineo (L/lineo)	270,0	372	321,0
Agua por 8 lineos (L)	2160	2976	2568
Agua L/planta/día	6	6	6
TANQUE (L)	3000	3000	3000
Nº DE RECARGAS	5	1	5

En función de lo analizado en este ítem, en términos generales el diseño del equipo de riego deberá considerar una densidad aproximada de 2777 plantas/ha ($3\text{ m} \times 1,2\text{ m}$) como caso de estudio, permitiendo la cobertura simultánea de 4 lineos con paneles de 4 m de ancho cada uno (Fig. 5).

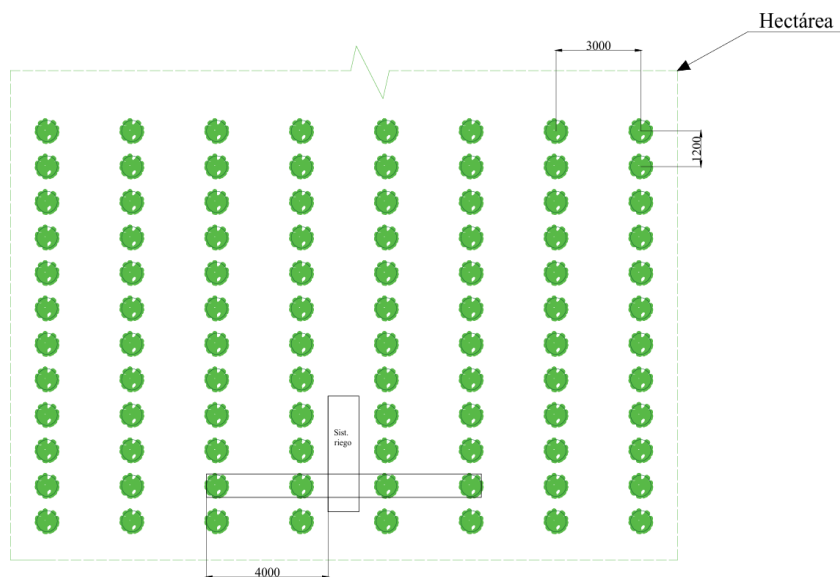


Fig. 5. Configuración de densidad adoptada para el diseño del sistema de riego.

3.3 Integración de requerimiento hídrico por edad del cultivo de YM

El cálculo del caudal de riego se fundamenta en estudios fisiológicos y ensayos agronómicos que demuestran variaciones críticas en los requerimientos hídricos según la edad de las plantas [16]. Los datos obtenidos de los cuadros analizados en el ítem 3.2 revelan los siguientes patrones:

- i. Requerimiento por ciclo de vida:
 - Plantaciones jóvenes (1 a 3 años):
 - o 6 L/planta/día, divididos en 2 riegos (3 L mañana/3 L tarde), según monitoreo de humedad en suelo en el ensayo de VYO SRL [10].
 - o Evidencia experimental: Las plantas regadas con este protocolo mostraron un 50% más de biomasa de raíces a los 6 meses vs. testigo sin riego, Fig. 3 (a) vs. Fig. 3 (b).
 - Plantaciones adultas (5 a 40 años):
 - o Debido al tamaño de la planta, la densidad de esta logra una retención de la humedad en el suelo protegiéndolo de las radiaciones solares, por lo cual la cantidad de agua y su frecuencia es menor, según datos experimentales de VYO SRL [10].
 - o Eficiencia comprobada: el cuadro de 5 años (Sección 3.2, B) requirió solo una recarga de tanque (3000 L) para regar 0,5 ha, logrando una uniformidad del 85%.
- ii. Variables técnicas:
 - Tipo de suelo: En suelos yerbateros (como los analizados en Colonia Alberdi), el intervalo entre riegos se extiende a mayor tiempo ya que el nivel de absorción es menor [20].
 - Clima: Durante eventos climáticos como La Niña (2022-2023), el riego suplementario aumentó el rendimiento en un 30% en plantaciones >20 años [21].

Con estas consideraciones, el sistema propuesto busca optimizar el caudal según la edad del cultivo, a saber:

- Automatización: Las electroválvulas regulan el flujo para aplicar 3-6 L/planta según datos de humedad relevados previamente en el terreno.
- Escalabilidad: El mismo equipo adapta su operación a densidades variables (1200-5555 plantas/ha) sin modificar infraestructura.

3.4 *Diseño conceptual de máquina automatizada para riego de YM*

En el mercado actual existen diversos equipos remolcados utilizados en tareas de pulverización para cultivos extensivos, aunque la mayoría están diseñados para cultivos de grano fino, hortalizas o frutales, y no contemplan las particularidades del cultivo de YM. Algunos ejemplos de equipos son:

- Ceres Eco (Batasa) [22]: Equipo pulverizador arrastrado, con paneles desplegables que permiten una cobertura lateral amplia. Si bien está pensado para la aplicación de agroquímicos, su estructura sirve como referencia para el diseño del sistema de brazos desplegables que se podría utilizar en este proyecto, ver Fig. 6 (a).
- Tanque remolcable con motobomba [23]: En la Ciudad de Apóstoles, provincia de Misiones, debido a la necesidad de cubrir la deficiencia de lluvias, un productor yerbatero creó un sistema de riego continuo para líneas de YM.

- Plásticos Lapsiur (PL) [24]: Poseen equipos de riego sobre chasis de arrastre con diferentes capacidades de almacenamiento, con bomba centrífuga y un chasis de doble eje con capacidad de rotación de uno de ellos. En la Fig. 6 (b) se representa el modelo mencionado.



Fig. 6. (a) Equipo pulverizador CERES ECO. (b) Equipo de riego sobre chasis de arrastre PL.

El diseño de la máquina de riego remolcable se fundamenta en las densidades de plantación predominantes en Misiones y los requerimientos espaciales para operación eficiente. A diferencia de los modelos existentes, el sistema propuesto introduce una innovación clave: el riego selectivo de las plantas individuales y la activación del riego a través de válvulas controladas electrónicamente, adaptándose específicamente al marco productivo de la YM, maximizando la eficiencia en el riego, reduciendo costos de mano de obra y minimizando el tiempo empleado. A continuación, se detallan los aspectos clave, obtenidos en base a parámetros agronómicos y características operativas que se esperan de la máquina. Es importante aclarar que los cálculos detallados del sistema de riego no están incluidos en este documento.

A. Parámetros agronómicos considerados:

- Distancia entre plantas:
 - Para líneas simples, el sistema de riego cubre 4 hileras simultáneas con un ancho de 4m cada panel.
 - En líneas dobles, el diseño permite ajustar los brazos a 3m de ancho cada panel.
- Geometría de aplicación:
 - Los brazos extensibles incorporan boquillas a 1,2m de altura.
 - Ángulo de 45° para evitar mojado foliar excesivo (previene hongos).

B. Componentes principales del sistema:

- Estructura portante:
 - Chasis de acero ASTM A36 con tratamiento anticorrosivo.
 - 2 ejes con suspensión elástica para terrenos irregulares.
 - Ancho de trabajo: plegado de 2,5m (para transporte) y extendido entre 8 - 9m.
- Sistema de distribución de agua:
 - Tanque principal de 3000 L (polietileno grado alimenticio).
 - Red de tuberías PVC Schedule 40 (Ø2") con: 32 electroválvulas (8 por hilera) y presión de trabajo entre 2,5 y 3 bar.
- Mecanismo de detección:

- Sensores infrarrojos (alcance 0,1-5m) para identificación de plantas
- Tasa de muestreo: 50ms/planta
- Precisión de posicionamiento: $\pm 5\text{cm}$

Este desarrollo propone una solución tecnológica adaptable a diferentes terrenos y pensada para pequeños y medianos productores. Su diseño apunta a modernizar las prácticas tradicionales de riego, promoviendo un uso más racional del agua y una mayor eficiencia operativa en el manejo del cultivo de YM. La integración del diseño propuesto con las densidades de plantación se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos típicos de diseño.

Parámetro	Líneos Simple	Líneos Dobles
Ancho de trabajo	8m (4 líneas)	6m (2 pares de líneas)
Caudal requerido	18L/s (6L/planta)	22L/s (5,5L/planta)
Velocidad de avance	0,8 km/h	0,6 km/h

En cuanto a la optimización del diseño, se puede incorporar a la máquina de riego un sistema de auto-nivelación para mantener los brazos en línea con terrenos con pendientes mayores a 15%. Además, un control centralizado con PLC programable e interfaz HMI (Human-Machine Interface) aportaría al diseño en aspectos como: registro de datos por GPS, ajuste de caudal según edad de plantas y generación de mapas de humedad.

4 Análisis legal

El análisis legal del presente proyecto electromecánico se divide en 2 partes: una referida a las leyes y decretos que intervienen o alcanzan al proyecto, y la segunda, trata acerca de normativas de organismos o instituciones nacionales o internacionales, usados de guía para desarrollar el proyecto.

4.1 Leyes y decretos nacionales y provinciales:

Dentro de las leyes y decretos nacionales y provinciales, se encuentran las siguientes:

- Ley N.º 24449 (Ley de Tránsito) [25]: Regula el uso de la vía pública para personas, animales, vehículos y actividades relacionadas con el transporte. Es relevante porque el equipo de riego será transportado en vehículos que circularán por la vía pública.
- Ley 26727 (Trabajo agrario) [26]: Regula el contrato de trabajo agrario, incluyendo derechos, obligaciones, retribuciones, jornadas y condiciones de seguridad. Es relevante para el análisis económico y la evaluación de riesgos laborales del proyecto.
- Decreto N° 617/97 (Actividad Agraria) [27]: Establece criterios de prevención de riesgos laborales, obligaciones de las ART y del empleador, y requisitos de seguridad e higiene para maquinarias, herramientas, sistemas eléctricos, protección contra incendios y transporte de trabajadores. Es clave para el diseño seguro del equipo de riego.

- Ley N° 19587 (Seguridad e Higiene en el Trabajo) [28]: Define las condiciones de higiene y seguridad que deben cumplir los establecimientos en todo el país, con el objetivo de proteger la salud e integridad de los trabajadores. Junto con el Decreto N.º 617/97, es fundamental para un diseño seguro del equipo de riego.
- Ley 25564 (Creación del Instituto Nacional de la Yerba Mate) [29]: Establece políticas para la producción y comercialización de yerba mate, asegurando el cumplimiento de estándares técnicos, ambientales y sanitarios. Promueve el riego eficiente y buenas prácticas agrícolas, por lo que deben respetarse los requisitos técnicos y legales del INYM.
- Ley N°18284 (Código Alimentario Argentino) [30]: En su Capítulo XV, establece los estándares de identidad y calidad para la yerba mate. Es de fundamental importancia ya que se centra en la prevención de contaminantes, trazabilidad y calidad del suelo a las plantas.
- Ley XVI-N.º 124 (Promoción de Bioinsumos y Prohibición del Glifosato) [31]: Prohíbe el uso de glifosato y sus componentes afines en toda la provincia, con un plazo de transición de dos años (vigencia total desde 2025). De esta manera, al diseñar un riego de alta eficiencia, el sistema facilita la transición hacia prácticas sin glifosato.
- Sistema de Trazabilidad de la Cadena Yerbatera (Resolución MArP-ATM 2025) [32]: El 9 de mayo de 2025, Misiones implementó el sistema digital CETYM para la trazabilidad completa de la yerba mate, registrando desde la plantación hasta el consumidor, incluyendo datos de riego, ensilado, secado y despacho. El sistema de riego puede integrarse a esta plataforma, aportando datos precisos y mejorando la transparencia.

4.2 Normativas y estándares internacionales:

- IRAM-ISO 14001 (Sistemas de Gestión Ambiental) [33]: Es el estándar líder para certificar la gestión sistemática de impactos ambientales. Implementar el proyecto bajo este estándar, mejora la imagen de la empresa agrícola y facilita el acceso a mercados que exigen certificaciones ambientales.

5 Trabajos futuros

El desarrollo del proyecto se llevará a cabo durante todo el ciclo lectivo 2025, en la cual se completarán las siguientes líneas de trabajo planificadas:

1. Diseño de la estructura del reticulado que contiene todos los elementos de riego: mangueras, electroválvulas, cables de señal, etc. (Mayo-Agosto).
2. Diseño mecánico del acoplado remolcable, junto con el sistema de bombeo y selección del acoplamiento cardánico (Mayo-Agosto).
3. Estudio técnico de la máquina que incluye el análisis estático, eléctrico y dimensional de todo el conjunto (Mayo-Julio).
4. Diseño del sistema de detección de la planta para efectuar el riego (Agosto-October).
5. Análisis de alternativas de diferentes modelos de máquinas (October-Noviembre).

6. Análisis económico de la viabilidad del proyecto y tiempo de retorno (Octubre-Noviembre).
7. Evaluación del impacto ambiental del proyecto, como así también acciones mitigantes antes efectos adversos del mismo contra el medio ambiente (Octubre-Noviembre).

6 Conclusiones

El presente estudio ha establecido las bases técnicas, agronómicas y legales para el desarrollo de un sistema de riego remolcable automatizado adaptado a plantaciones de YM en la región de Misiones. Si bien el proyecto se encuentra en fase de análisis y diseño preliminar, los resultados obtenidos demuestran su potencial para resolver las principales limitaciones de los sistemas de riego actuales descritos en este documento. Las principales características del sistema de riego propuesto pueden dividirse en los siguientes aspectos:

- Viabilidad técnica:
 - o Los parámetros operativos definidos (caudales de 3-7 L/planta/día, configuración para 4-8 m de ancho de trabajo) responden a las necesidades reales del cultivo, sustentados por datos experimentales de campo.
 - o La integración de tecnologías de detección (sensores) y control (electroválvulas automatizadas) muestra ventajas promisorias frente a métodos tradicionales.
- Sostenibilidad agronómica:
 - o El enfoque en riego localizado podría reducir el consumo hídrico hasta un 35% comparado con sistemas por aspersión.
 - o La adaptabilidad a diferentes densidades de plantación (1200-5500 plantas/ha) amplía su rango de aplicación.

De lo expuesto, este proyecto representa una oportunidad para modernizar las prácticas de riego en el sector yerbatero, aunque su implementación exitosa requerirá superar desafíos técnicos y económicos en las próximas fases de desarrollo. Los resultados preliminares justifican ampliamente la continuidad de la investigación. Vale recalcar que, *la innovación aquí propuesta no es un producto terminado, sino un camino tecnológico promisorio que requiere recorrer las etapas de diseño de ingeniería, validación y ajuste propias de todo desarrollo agrícola de precisión*. Los próximos pasos deberán documentarse en publicaciones técnicas que complementan este estudio inicial, con especial atención en la memoria de cálculo detallada de los componentes del sistema de riego propuesto.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo de la cátedra de Proyecto Electromecánico 2 de la Facultad de Ingeniería de Oberá por el apoyo brindado para la realización del estudio del proyecto, como así también a las autoridades de Secretaría Académica Estudiantil por la gestión práctica de la movilidad a las visitas técnicas realizadas. Los autores agradecen al productor de la visita realizada a C. Alberdi por brindarnos toda su disposición para la realización del proyecto y la

información técnica en campo, como también al vivero VYO SRL por la información brindada sobre el entendimiento del cultivo para la preparación de este artículo.

Referencias

- [1] INYM, “Mapa interactivo: CULTIVOS DE YERBA MATE DE LA REPÚBLICA ARGENTINA”, Argentina, Jun. 13, 2025. [Online], Disponible: <https://gis.inym.org.ar/>
- [2] Carvalho, P.E.R, “Espécies arbóreas brasileiras. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica,” vol. 1 - Colombo, PR, Brasil: Embrapa Florestas, 2003, pp 458-459
- [3] Burtnik, O. J, “Yerba Mate: Manual de Producción,” INTA. Santo Tomé, Corrientes, Argentina, 2006.
- [4] Beatriz, E. *et al.*, “Producción de plantines de yerba mate -Ilex paraguariensis A. ST. HIL- a partir de semillas,” 1era ed. - Posadas, Misiones, Argentina: UNaM. FCF, 2022. [Online], Disponible: <https://www.fcf.unam.edu.ar/modules/uploads/2017/03/DocumentoTecnicoYerba2021.pdf>
- [5] Barbaro, L. A *et al.*, “ESTRATEGIAS DE MANEJO DEL pH DEL SUSTRATO EN LA PRODUCCIÓN DE PLANTINES DE YERBA MATE (Ilex paraguariensis A. St.-Hil.)”. Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences, 40(3), 530-544. [Online], Disponible: <https://doi.org/10.29393/CHJAAS40-44EMLB40044>
- [6] Servicio Meteorológico Nacional, “Características: Estadísticas de largo plazo, POSADAS AERO, Misiones”, Argentina, Jun. 29, 2025. [Online], Disponible: <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>
- [7] Capellari, P. L. *et al.*, “YERBA MATE Reseña Histórica y Estadística. Producción e Industrialización en el siglo XXI.”, 1era ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Consejo Federal de Inversiones, 2017.
- [8] Visita técnica al vivero VYO SRL, Oberá, Misiones, Argentina, 13/05/2025.
- [9] Visita técnica a plantaciones de yerba mate de productor local, Colonia Alberdi, Misiones, Argentina, 27/06/2025.
- [10] Visita técnica a la plantación de yerba mate de VYO SRL, Guaraní, Misiones, Argentina, 08/07/2025.
- [11] El Territorio, “En medio del contexto de déficit hídrico que aqueja a la región: Colonos preocupados por fuertes daños de la sequía en yerbales”, Argentina, Jun. 29, 2025. [Online], Disponible: <https://www.eltterritorio.com.ar/noticias/2021/12/20/731733-colonos-preocupados-por-fuertes-danos-de-la-sequia-en-yerbales>
- [12] Infobae, “Alertan por el impacto de la sequía en la producción de yerba mate, trigo y otros cultivos”, Argentina, Jun. 29, 2025. [Online], Disponible: <https://www.infobae.com/economia/campo/2022/09/07/alertan-por-el-impacto-de-la-sequia-en-la-produccion-de-yerba-mate-trigo-y-otros-cultivos/>
- [13] INYM, “Fenómeno de la niña”, Argentina, Jun. 13, 2025. [Online], Disponible: <https://inym.org.ar/noticias/produccion-sustentable/79597-ante-la-falta-de-lluvias-se-recomienda-monitorear-y-regar-los-plantines-de-yerba-mate.html>
- [14] Servicio Meteorológico Nacional, “El Niño / La Niña, Año 2023”, Argentina, Jun. 29, 2025. [Online], Disponible: <https://www.smn.gob.ar/enos/informes-anteriores>
- [15] INYM, “Abril 2025 Estadísticas del sector yerbatero argentino”, Argentina, Jun. 29, 2025. [Online], Disponible: <https://inym.org.ar/descargar/publicaciones/estadisticas/2025.html>
- [16] Kucuk, L. G. y Marinelli, J. M, “Control automatizado de riego de yerba mate mediante lógica difusa y entornos de telemetría”, In XXVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC), Puerto Madryn, Chubut, Argentina, 2024. [Online], Disponible: <https://wicc2024.unp.edu.ar/images/galeria/15095.pdf>
- [17] Los Andes, “Cuánto sale tecnificar el riego en una hectárea”, Argentina, Jun. 29, 2025. [Online], Disponible: <https://www.losandes.com.ar/fincas/cuanto-sale-tecnificar-el-riego-en-una-hectarea>
- [18] M. Liotta *et al.*, “Manual de capacitación: riego por goteo”, 1ra ed., ed. esp. Rivadavia, Argentina: Marta Laura Paz, 2015, 22 pp.

- [19] Sessa, C., “ANÁLISIS DE DIAGNÓSTICO TECNOLÓGICO SECTORIAL: YERBATERO Y TEALERO”. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, 2013.
- [20] INYM, “El suelo cubierto y sistematizado es central para producir en tiempos de cambio climático”, Argentina, Jul. 9, 2025. [Online], Disponible: <https://inym.org.ar/noticias/produccion-sustentable/79989-el-suelo-cubierto-y-sistematizado-es-central-para-producir-en-tiempos-de-cambio-climatico.html>
- [21] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), "Efecto del riego suplementario en el rendimiento de yerba mate (*Ilex paraguariensis*) durante eventos climáticos extremos en la provincia de Misiones," Informe Técnico N° 78, Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul, Misiones, Argentina, 2023.
- [22] ATATSA, “Equipo arrastrado CERES ECO”, Chile, Jun. 13, 2025. [Online], Disponible: https://www.atasa.eu/ceres_eco.php?var1=3
- [23] MisionesOnline, “Apóstoles: diseñan sistema de riego automatizado para plantaciones de yerba mate”, *MisionesOnline*, Jun. 13, 2025.
- [24] PLÁSTICOS LASPIUR, “Equipos de riego sobre chasis de arrastre,” Córdoba, Argentina, Jun. 13, 2025. [En línea]. Disponible: <https://plasticoslaspiur.com.ar/producto/equipos-de-riego-sobre-chasis-de-arrastre/>
- [25] Ley de Tránsito, Ley Nacional N° 24.449, 1994.
- [26] Ley de Trabajo Agrario, Ley Nacional N°26.727, 2011.
- [27] Actividad Agraria, Decreto N° 617/97, 1997.
- [28] Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo, Ley Nacional N° 19.587, 1972.
- [29] Instituto Nacional de la Yerba Mate, Ley Nacional N.º 25.564, Argentina, 2002.
- [30] Código Alimentario Argentino, Ley Nacional N.º 18.284, 1969.
- [31] Provincia de Misiones, *Prohibición del uso del glifosato, sus componentes y afines en la Provincia de Misiones*, Ley XVI-N.º 124, 2018.
- [32] Centro de Transacción de la Yerba Mate, Resolución 461/25 del Ministerio de Hacienda, 2025.
- [33] Sistema de Gestión Ambiental, ISO 14001, 2015.