



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DOCTORADO EN CIENCIAS EN MATERIALES



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

SISTEMA BIOSENSOR EN UNA PLANTA AUMENTADA MEDIANTE NANOPARTÍCULAS DE
Ag/AgCl.

Que para obtener el Grado de
Doctor en Ciencias en Materiales

Presenta

M. en I.A. Marco Antonio Merino Treviño

D01070721

No.CVU: 295355

Director de Tesis

Dra. Ana Beatriz Morales Cepeda

No.CVU: 121441

Co-director de Tesis

Dr. Hernán Peraza Vázquez

No.CVU: 336607



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, **27/Octubre/2025**

Oficio No. U3.053/25

ASUNTO: Autorización de Impresión

C. MARCO ANTONIO MERINO TREVIÑO
No. DE CONTROL D01070721
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Doctor en Ciencias en Materiales, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DRA. ANA BEATRIZ MORALES CEPEDA
SECRETARIO:	DR. HERNÁN PERAZA VÁZQUEZ
VOCAL 1:	DR. EDGAR ONOFRE BUSTAMANTE
VOCAL 2:	DR. JOSÉ LUIS RIVERA ARMENTA
VOCAL 3:	DRA. BEATRIZ ADRIANA SALAZAR CRUZ
SUPLENTE:	DR. RICARDO GARCÍA ALAMILLA

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"SISTEMA BIOSENSOR EN UNA PLANTA AUMENTADA MEDIANTE NANOPARTÍCULAS DE Ag/AgCl"

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Por Mi Patria y Por Mi Bien"®


RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
RCG/RGA/jar




2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos
C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tel. (833) 3574820 ext. 3110
e-mail: depi_cdadero@tecnm.mx www.tecnm.mx
www.cdmadero.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

A Dios, como sencillo gesto de agradecimiento, ya que Él ha hecho posible plasmar esta humilde obra de trabajo doctoral, un peldaño más en mi formación profesional y en mi vida personal.

A la memoria de mi padre, Antonio Merino Velázquez, cuya dedicación, amor y apoyo incondicional dejaron una huella imborrable en mi vida. Sus enseñanzas y su ejemplo de perseverancia y entrega me han acompañado en cada paso de este camino.

A la memoria de mi madre, Laura Marcela Treviño Varela, cuyo amor infinito, sabios consejos y constante fortaleza siguen siendo mi inspiración para superar retos y alcanzar metas.

A mi esposa, Jazmín del Carmen Rojas Sánchez, quien con paciencia, amor y comprensión estuvo a mi lado en cada etapa de este proceso, brindándome ánimo y estabilidad para culminar este proyecto.

A mis hijas, Mildred Sophie y Marion Isabella, cuya sonrisa y amor incondicional me inspiraron a dar lo mejor de mí. Ustedes son mi mayor motivación para continuar creciendo y alcanzando metas.

A mis amigos, quienes con su compañía y palabras de aliento me ayudaron a mantener el equilibrio y la perseverancia a lo largo de este reto académico.

A mis asesores, quienes, con su guía experta, consejos y paciencia contribuyeron al desarrollo y culminación de este proyecto. Su apoyo y conocimientos fueron fundamentales para lograr este resultado.

Finalmente, a todas las personas que, de manera directa o indirecta, estuvieron involucradas en este proceso, brindándome su apoyo, conocimientos y motivación, mi más sincero agradecimiento. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

RESUMEN

Las plantas y otros organismos vegetales poseen una capacidad única de expresión y percepción, reaccionando al medio ambiente, a otras entidades vivientes y regenerándose, actuando o creciendo en respuesta. Desde cierta perspectiva, las raíces, los tallos, las hojas y los circuitos vasculares de las plantas son análogos a los contactos, interconexiones, dispositivos y cables de los circuitos electrónicos discretos e integrados. Sin embargo, los mecanismos de interacción y nuestros canales de comunicación con ellas en la naturaleza son poco perceptibles. El presente trabajo de investigación estudia el efecto de la conductividad eléctrica en el sistema vascular de las plantas mediante la utilización de nanopartículas de plata al 10% en peso, soportadas por una matriz de nanocelulosa (NPs Ag/AgCl 10%wt). Se logró crear un conductor integrado y distribuido en el xilema y floema de la planta. Aprovechando la fisiología natural para el transporte de nutrientes, se trató una población de *Epipremnum aureum* (Linden & André) mediante la adición de nanopartículas en medio acuoso, generando una saturación del tejido conductor. Dentro de los canales vasculares compuestos por vasos, células traqueidas y una solución electrolítica, la adición de NPs Ag/AgCl incrementó la conductividad eléctrica. Para caracterizar el sistema, se utilizaron una computadora y un microcontrolador con un convertidor análogo-digital (ADC), permitiendo la adquisición de señales eléctricas del orden de milivoltios. Estas señales suelen verse afectadas por interferencias del entorno, por lo que se emplearon algoritmos y técnicas de medición que redujeran la incertidumbre. La especie *Epipremnum aureum* fue seleccionada por su vigor, adaptabilidad y resistencia. Se utilizó un voltaje de polarización en un rango de -1,5 V y 1,5 V con resistencias de derivación de 1, 10, 100 y 1000 ohmios, y una tasa de exploración de 15 mV/s. Se realizaron análisis estructurales mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y análisis de rayos X por dispersión de energía (EDX). Los resultados mostraron que las nanopartículas mejoraron la capacidad de conducción eléctrica del sistema vascular. Además, la prueba de rangos con signo de Wilcoxon no reveló diferencias significativas entre los voltajes de salida raíz-tallo y tallo-hoja, lo que sugiere una distribución homogénea de las nanopartículas. Con base en la ley de Faraday, se calculó una recuperación de plata de hasta 40 mg/mm² por hora. Estos descubrimientos abren nuevas oportunidades para la comprensión y manipulación de procesos fisiológicos en plantas, con aplicaciones en agricultura inteligente y recuperación de contaminantes.

ABSTRACT

Plants and other vegetative organisms possess a unique capacity for expression and perception, responding to environmental stimuli, interacting with other living entities, and regenerating by acting or growing accordingly. From a certain perspective, the roots, stems, leaves, and vascular circuits of plants are analogous to the contacts, interconnections, devices, and wiring found in discrete and integrated electronic circuits. However, the mechanisms of interaction and our communication channels with them in nature remain largely imperceptible. This research investigates the effect of electrical conductivity within the vascular system of plants through the use of silver nanoparticles at 10% by weight, supported on a nanocellulose matrix (Ag/AgCl NPs 10% wt). An integrated and distributed conductive network was formed throughout the xylem and phloem. By leveraging the plant's natural physiology for nutrient transport, a population of *Epipremnum aureum* was treated with an aqueous suspension of nanoparticles, resulting in the saturation of the conductive vascular tissue. Within these vascular channels—composed of vessels, tracheid cells, and an electrolytic solution—the presence of Ag/AgCl nanoparticles enhanced the system's electrical conductivity. To characterize the system, a computer and a microcontroller equipped with an analog-to-digital converter (ADC) were employed to acquire electrical signals in the millivolt range. Since these signals are susceptible to environmental interference, specialized algorithms and measurement techniques were implemented to reduce uncertainty. The species *Epipremnum aureum* was selected for its vigor, adaptability, and resistance. A polarization voltage ranging from -1.5 V to 1.5 V was applied, along with shunt resistors of 1, 10, 100, and 1000 ohms, and a scan rate of 15 mV/s. Structural analyses were conducted using environmental scanning electron microscopy (ESEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The results demonstrated that the addition of nanoparticles significantly improved the electrical conduction capacity of the plant's vascular system. Furthermore, the Wilcoxon signed-rank test showed no statistically significant differences between root-stem and stem-leaf voltage outputs, suggesting a homogeneous distribution of the nanoparticles. Based on Faraday's law of electrolysis, a silver recovery rate of up to 40 mg/mm² per hour was estimated. These findings open new opportunities for understanding and manipulating physiological processes in plants, with potential applications in smart agriculture and contaminant recovery.

Índice

Índice	IV
Índice de figuras	VI
Índice de tablas.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XX
1. Capítulo 1. Marco Teórico	1
1.1. Electrofisiología de las Plantas.....	2
1.2. Tecnología y el “Umwelt”.....	4
1.3. Nanotecnología y Funcionalización de Sistemas Biológicos	6
1.4. Características y Propiedades de las Nanopartículas de Plata (AgNPs).....	7
1.5. Métodos de Síntesis de Nanopartículas de Plata (AgNPs)	8
1.5.1. Síntesis Química	9
1.5.1.1. Deposición Química de Vapor (CVD - <i>Chemical Vapor Deposition</i>).....	9
1.5.1.2. Reducción Química.....	10
1.5.1.3. Proceso Sol-Gel	10
1.5.1.4. Microemulsión	10
1.5.2. Síntesis Biológica	11
1.5.3. Síntesis Física	12
1.5.3.1. Evaporación-Condensación	12
1.5.3.2. Ablación por Láser Pulsante (PLD)	13
1.5.3.3. Magnetron Sputtering.....	13
1.5.3.4. Técnica del Arco de Descarga	13
1.6. Plantas y sistemas electrónicos.....	14
1.6.1. Fundamentos de la bioelectrónica a vegetal.....	18
1.6.2. Materiales conductores y nanocompuestos aplicados <i>in planta</i>	18
1.6.3. Métodos de integración vascular y evaluación funcional.....	19
1.6.4. Aplicaciones emergentes y desafíos.....	21
1.7. Caracterización estructural y espectroscópica de nanocompuestos.....	22
1.7.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM) y análisis EDX.....	22
1.7.2. Difracción de Rayos X (DRX)	23
1.7.3. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	25
1.8. Instrumentación electrónica para adquisición de señales bioeléctricas (ADS1256 + AVR Mega 2560).....	26

1.8.1. Python y su aplicación en la adquisición y análisis de datos	28
1.8.2. Instrumentación complementaria con LabVIEW y DAQ USB-6001.....	30
1.9. Fundamento electroquímico: uso de potencióstato en sistemas bioelectrónicos.....	31
Capítulo 2. Antecedentes	33
Capítulo 3. Metodología experimental.....	35
3.1. Síntesis del nanomaterial funcionalizante (NPs Ag/AgCl sobre nanocelulosa).....	36
3.2. Formación de vías conductoras de nanopartículas de plata (AgNPs) en el xilema y floema de la planta especie <i>Epipremnum aureum</i>	39
3.3. Construcción de los microelectrodos.....	42
3.4. Sistema de adquisición de datos y configuración para mediciones eléctricas	45
3.5. Caracterización eléctrica de la vía conductora en el xilema.....	49
3.6. Cálculo de masa depositada y densidad de corriente.....	54
3.6.1. Cálculo de masa depositada (Ley de Faraday).....	55
3.6.2. Cálculo de la densidad de corriente de corrosión.....	55
3.6.3. Cálculo de la tasa de corrosión.....	56
3.7. Análisis de las plantas <i>Epipremnum aureum</i> (Potus) utilizando Microscopia Electrónica de Barrido Ambiental (ESEM)	56
3.8. Análisis de las plantas <i>Epipremnum aureum</i> (Potus) utilizando (ESEM) acoplada con Análisis de Rayos X por Dispersión de Energía (EDX).....	58
3.9. Caracterización estructural por difracción de rayos x (DRX)	60
Capítulo 4. Resultados y discusión	62
4.1. Síntesis y caracterización del nanomaterial funcionalizante.....	62
4.2. Integración del nanomaterial en la planta.....	63
4.3. Caracterización eléctrica del sistema funcionalizado con material nanométrico y del sistema no funcionalizado.....	92
4.4. Respuesta eléctrica a variaciones de temperatura.....	99
Capítulo 5. Conclusiones	108
Productos	109
Bibliografía	109

Índice de figuras

Figura 1.1.1 Dispositivo de Bose para estudiar turgencia en Mimosa Púdica (IISC, Bangalore, 1906).....	3
Figura 1.2.1 Representación del concepto de Umwelt como el mundo percibido subjetivamente por diferentes entidades: plantas, animales y máquinas.....	4
Figura 1.2.2 Representación del principio de retroalimentación en sistemas vivos y mecanizados, destacando el flujo de información y el ajuste mediante retroalimentación.....	5
Figura 1.4.1. Diferentes formas sólidas de nanopartículas sintetizadas a) esféricas (Aguilar & Rosas, 2019), b) cúbicas (Aguilar & Rosas, 2019), c) triangulares (Herrero-Calvillo et al., 2019), d) octaédricas (Aguilar & Rosas, 2019), e) decaédricas (Mares-Briones & Rosas, 2017), f) cubo-octaédricas (Aguilar & Rosas, 2019), g) tetraédricas (Mares-Briones & Rosas, 2017), h) tetragonal deuteroprismo (Mares-Briones & Rosas, 2017), i) tetraedro truncado (Aguilar & Rosas, 2019).....	8
Figura 1.5.1. Clasificación de métodos de síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs)	9
Figura 1.6.1. Telegarden: brazo robótico teleoperado que permitía a usuarios remotos sembrar y regar un micro-huerto (The Telegarden Website, n.d.-b).....	15
Figura 1.6.2. Soybot: plataforma móvil con maceta y sensor de luz(McMullen_Winkler: SoyBots, n.d.)	16
Figura 1.6.3. Elowan: planta-robot híbrido cuyo desplazamiento está gobernado por las señales bioeléctricas del propio vegetal (crédito: M. Patel, 2018) (Overview < Elowan: A Plant-Robot Hybrid — MIT Media Lab, n.d.)	17
Figura 1.6.4 Phytowalkers: robot con “piernas” de ramas naturales, exhibido, (Fogašová et al., 2022).	17
Figura 1.6.5. Infiltración vacío-presión de un nanocompuesto PEDOT:PSS-NFC en hojas de rosa [5]. (A) La hoja se coloca en una jeringa llena de la suspensión; al generar -50 kPa se expulsa el aire del mesófilo. (B) Al retornar a +70 kPa, el fluido penetra a través de los estomas y llena el entramado entre venas. (C, D) Hoja testigo antes de la infiltración. (E, F) Hoja y corte transversal tras la infiltración, donde se evidencia la deposición de PEDOT:NFC en la región vascular. Adaptado de (Stavriniidou et al., 2015).	20
Figura 1.6.6. Entrega localizada de rhodamina 6G y carboxifluoresceína en el sistema vascular de tomate mediante microinyección con microagujas tipo phytoinjector. (a) Inserción de un arreglo de microagujas en el pecíolo foliar. Barra de escala: 1 mm. (b) Corte transversal que muestra una phytoaguja alcanzando el floema del pecíolo. Barra: 500 µm. (c) Imagen de campo claro de la sección histológica del tallo en el sitio de inyección. Barra: 200 µm. (d) Microscopía de fluorescencia mostrando el transporte de rhodamina 6G en el floema desde la fuente hacia el sumidero; las flechas blancas indican acumulación en el floema. Barra: 500 µm. (e) Secuencia de fluorescencia de 5(6)-carboxifluoresceína diacetato en el xilema a 1, 3 y 5 minutos postinyección, desde raíz	

hasta copa. (f) Perfil de intensidad de fluorescencia en función de la distancia a lo largo del xilema, donde se identifican zonas de saturación, flujo y fondo. Adaptado d. (Cao et al., 2020).....	21
Figura 1.7.1. Sistema de microscopía electrónica de barrido (SEM) modelo EVO LS10 (Zeiss), empleado para el análisis morfológico de muestras vegetales y nanocompuestos. El equipo cuenta con detectores secundarios y retrodispersados, y puede acoplarse a sistemas EDX para análisis elemental en superficies biológicas y materiales nanoestructurados.....	23
Figura 1.7.2 Representación esquemática de la Ley de Bragg, que describe la condición de interferencia constructiva entre haces de rayos X reflejados sobre planos cristalinos.	24
Figura 1.7.3. Relación entre el tamaño de cristalita y el ancho del pico en un difractograma de rayos X.....	25
Figura 1.8.1. Arquitectura del sistema de adquisición de señales bioeléctricas in planta	27
Figura 1.8.2 Módulo ADC ADS1256 de 24 bits y 8 canales de adquisición de datos de alta precisión	27
Figura 1.8.3 Microcontrolador ATmega2560 integrado en una placa Arduino Mega.	28
Figura 1.8.4 Flujo de adquisición y análisis de señales bioeléctricas utilizando Python ...	30
Figura 1.8.5. Diagrama del flujo de datos desde una planta sensorizada hasta la visualización de señales bioeléctricas en LabVIEW usando el sistema DAQ-USB6001.	31
Figura 1.9.1. Potenciostato/galvanostato modelo SP-150 de Bio-Logic conectado a una celda electroquímica, empleado para la medición de corrientes y potenciales en estudios electroquímicos.....	32
Figura 3.1.1 Síntesis de nanopartículas Ag/AgCl, metodología (Macclesh del Pino Pérez et al., 2021)	38
Figura 3.2.1 Epipremnum aureum a) con luz artificial ① con AgNPs 10% wt, ② especie testigo. b) sin luz artificial ③ con AgNPs 10% wt, ④ especie testigo.	39
Figura 3.2.2 Esquema del sistema de medición de conductividad en el tallo vegetal.	40
Figura 3.2.3 Inserción de microelectrodos en tejido vascular de Epipremnum aureum para registro eléctrico.....	41
Figura 3.2.4 Distribución de nanopartículas de Ag/AgCl en tejidos vasculares de Epipremnum aureum.....	42
Figura 3.3.1. Proceso de construcción de microelectrodos. a) Vista general del equipo de inspección y del alambre de acero inoxidable de grado quirúrgico. b) y c) Alineación y separación de 1 mm entre electrodos. d) Montaje final con adhesivo epóxico para fijación y encapsulado.....	44
Figura 3.3.2 Inserción de microelectrodos en tejido vegetal a 2 mm de profundidad para contacto con el sistema vascular sin afectar su integridad.....	44
Figura 3.4.1 Montaje del sistema de adquisición de datos basado en microcontrolador Mega2560 y ADC ADS1256.	45

Figura 3.4.2 Interfaz de LabVIEW para adquisición serial y monitoreo gráfico de señales bioeléctricas en tiempo real.	46
Figura 3.4.3 Diagrama de bloques del sistema de adquisición de señales bioeléctricas en LabVIEW	47
Figura 3.4.4 Interfaz gráfica y código en Python para la adquisición y graficación en tiempo real de señales bioeléctricas.....	47
Figura 3.4.5 Montaje experimental con sistema de adquisición, sensor de temperatura y microelectrodos integrados en planta funcionalizada.	48
Figura 3.5.1 Modelo tridimensional de la celda electroquímica personalizada diseñada en Autodesk Fusion 360.	49
<i>Figura 3.5.2 Fabricación de la celda electroquímica personalizada mediante impresión 3D.</i>	50
Figura 3.5.3 <i>Montaje experimental para caracterización eléctrica in vivo del sistema vascular vegetal.</i>	51
Figura 3.5.4 <i>Distribución de microelectrodos y zonas de medición en Epipremnum aureum.</i>	52
Figura 3.7.1 Microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM) EVO LS10 (Carl Zeiss, Alemania) utilizado para el análisis morfológico de las muestras vegetales.	57
<i>Figura 3.7.2 Muestras vegetales de Epipremnum aureum (potus) montadas sobre porta muestras del microscopio ESEM, fijadas con cinta conductiva de carbono para su análisis morfológico.</i>	58
Figura 3.8.1 Muestras de Epipremnum aureum (Potus) empleadas para el análisis morfológico y elemental mediante ESEM-EDX. (a) Muestra testigo sin exposición a nanopartículas. (b) Muestra tratada únicamente con nanocelulosa. (c) Muestra tratada con nanopartículas de plata soportadas en nanocelulosa.	59
Figura 3.9.1 Difractómetro Bruker D8 Advance utilizado para el análisis de difracción de rayos X (DRX).....	60
Figura 4.2.1 Proceso de inmersión y evolución de la planta Epipremnum aureum en la suspensión de nanopartículas de Ag/AgCl.	63
Figura 4.2.2 Difractograma de rayos X de la muestra con nanopartículas de Ag/AgCl y celulosa	65
Figura 4.2.3 Difractograma de rayos X de Epipremnum aureum (hoja) con nanopartículas de Ag/AgCl	66
Figura 4.2.4 Difractograma de rayos X de Epipremnum aureum (tallo) con nanopartículas de Ag/AgCl.....	66
Figura 4.2.5 Difractograma de rayos X de Epipremnum aureum (raíz) con nanopartículas de Ag/AgCl	67
<i>Figura 4.2.6 Micrografía ESEM de la hoja de Epipremnum aureum funcionalizada con nanocelulosa, donde se observa la cobertura homogénea del material sobre la epidermis.</i> 69	

Figura 4.2.7 Distribución elemental (EDX) de la hoja funcionalizada, mostrando los elementos principales detectados en la superficie.....	69
Figura 4.2.8 Espectro EDX de la hoja de <i>Epipremnum aureum</i> funcionalizada con nanocelulosa.....	70
Figura 4.2.9 Micrografía ESEM del corte longitudinal del tallo funcionalizado con nanocelulosa de <i>Epipremnum aureum</i>	72
Figura 4.2.10 Micrografía ESEM del corte transversal del tallo funcionalizado con nanocelulosa, mostrando la organización de las fibras y la continuidad de la estructura vegetal.	72
Figura 4.2.11 Distribución elemental (EDX) del corte transversal del tallo funcionalizado con nanocelulosa.....	73
Figura 4.2.12 Espectro EDX correspondiente al corte transversal del tallo funcionalizado con nanocelulosa.....	73
Figura 4.2.13 Micrografía ESEM del corte longitudinal de la raíz funcionalizada con nanocelulosa de <i>Epipremnum aureum</i>	76
Figura 4.2.14 Micrografía ESEM del corte transversal de la raíz funcionalizada, mostrando la estructura interna de fibras y la red formada por la nanocelulosa.....	76
Figura 4.2.15 Distribución elemental (EDX) del corte transversal de la raíz funcionalizada con nanocelulosa.....	77
Figura 4.2.16 Espectro EDX correspondiente al corte transversal de la raíz funcionalizada con nanocelulosa.....	77
Figura 4.2.17 Micrografía ESEM del corte longitudinal de la hoja funcionalizada con nanopartículas de Ag/AgCl de <i>Epipremnum aureum</i>	80
Figura 4.2.18 Micrografía ESEM del corte transversal de la hoja funcionalizada con nanopartículas de Ag/AgCl.....	80
Figura 4.2.19 Distribución elemental (EDX) de la hoja funcionalizada con Ag/AgCl (análisis global).	81
Figura 4.2.20 Distribución específica del elemento Ag en la hoja funcionalizada con Ag/AgCl.	81
Figura 4.2.21 Espectro EDX de la hoja funcionalizada con Ag/AgCl de <i>Epipremnum aureum</i>	82
Figura 4.2.22 Micrografía ESEM del corte longitudinal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl de <i>Epipremnum aureum</i>	84
Figura 4.2.23 Micrografía ESEM del corte transversal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl.	85
Figura 4.2.24 Distribución elemental (EDX) del corte longitudinal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl (análisis global).	85
Figura 4.2.25 Distribución elemental (EDX) específica del elemento Ag en el corte longitudinal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl.....	86

Figura 4.2.26 Espectro EDX del corte longitudinal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl.	86
Figura 4.2.27 Micrografía ESEM del corte longitudinal de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl de <i>Epipremnum aureum</i> .	89
Figura 4.2.28 Micrografía ESEM del corte transversal de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl.	89
Figura 4.2.29 Mapa elemental EDX del corte transversal de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl, mostrando la distribución global de los elementos.	90
Figura 4.2.30 Mapa elemental EDX de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl resaltando la localización del elemento plata (Ag).	90
Figura 4.2.31 Espectro EDX correspondiente al corte transversal de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl.	91
Figura 4.3.1 (A) Configuración experimental empleada para la medición de voltaje y corriente en el sistema vegetal funcionalizado con nanopartículas de Ag/AgCl. (B) Conexión directa de los electrodos de acero inoxidable en el tallo de <i>Epipremnum aureum</i> durante la prueba de conductividad.	94
Figura 4.3.2 Esquema de muestreo de conductividad. Puntos de medición en raíz (verde), tallo (azul) y hoja (rojo), con equipo conectado para evaluar el flujo de corriente facilitado por las nanopartículas de plata en el sistema vascular.	95
Figura 4.3.3 Curvas corriente-voltaje (I-V) obtenidas en la hoja de <i>Epipremnum aureum</i> . Se observa la influencia de las nanopartículas de Ag/AgCl en la respuesta eléctrica al variar la resistencia de derivación (1, 10, 100 y 1000 Ω).	96
Figura 4.3.4 Curvas corriente-voltaje (I-V) correspondientes al tallo de <i>Epipremnum aureum</i> funcionalizado con nanopartículas de Ag/AgCl. Se evidencia un comportamiento lineal característico de conducción óhmica estable.	96
Figura 4.3.5 Curvas corriente-voltaje (I-V) obtenidas en la raíz del sistema vegetal funcionalizado con nanopartículas de Ag/AgCl, mostrando una mejora en la conductividad eléctrica en comparación con la planta no funcionalizada.	97
Figura 4.3.6 Densidad de carga obtenida con diferentes resistencias en derivación.	98
Figura 4.3.7 Cantidad de material recuperado en mg/mm ² por hora.	99
Figura 4.4.1 Configuración experimental para evaluar la respuesta eléctrica y térmica en <i>Epipremnum aureum</i> . Incluye la tarjeta DAQ USB-6000, el sensor DS18B20, resistencias de derivación y electrodos conectados al tallo.	100
Figura 4.4.2 Voltaje vs. tiempo, 1 Ω .	101
Figura 4.4.3 Voltaje vs. tiempo, 10 Ω .	101
Figura 4.4.4 Voltaje vs. tiempo, 100 Ω .	101
Figura 4.4.5 Voltaje vs. tiempo, 1000 Ω .	102
Figura 4.4.6 Corriente vs. tiempo, 1 Ω .	102
Figura 4.4.7 Corriente vs. tiempo, 10 Ω .	103
Figura 4.4.8 Corriente vs. tiempo, 100 Ω .	103

Figura 4.4.9 Corriente vs. tiempo, 1000 Ω	103
Figura 4.4.10 Flujo de corriente vs. tiempo, 1 Ω	104
Figura 4.4.11 Flujo de corriente vs. tiempo, 10 Ω	104
Figura 4.4.12 Flujo de corriente vs. tiempo, 100 Ω	104
Figura 4.4.13 Flujo de corriente vs. tiempo, 1000 Ω	105
<i>Figura 4.4.14 Temperatura vs. tiempo, 1 Ω.....</i>	<i>105</i>
Figura 4.4.15 Temperatura vs. tiempo, 10 Ω	106
Figura 4.4.16 Temperatura vs. tiempo, 100 Ω	106
Figura 4.4.17 Temperatura vs. tiempo, 1000 Ω	106

Índice de tablas

Tabla 1.5.1. Comparativa resumida — Métodos químicos para sintetizar AgNPs.....	11
Tabla 1.5.2. Características distintivas de la síntesis biológica de AgNPs.....	12
Tabla 1.5.3. Comparativa resumida — Métodos físicos para sintetizar AgNPs.....	14
Tabla 1.7.2.1 Técnicas de caracterización aplicadas a nanocompuestos y su utilidad.....	26
Tabla 4.2.1 Espectro EDX correspondiente a la hoja funcionalizada, con los picos característicos de los elementos identificados.....	70
Tabla 4.2.2 Composición elemental del tallo funcionalizado con nanocelulosa obtenida mediante EDX.....	74
Tabla 4.2.3 Composición elemental (EDX) del corte transversal de la raíz funcionalizada con nanocelulosa de <i>Epipremnum aureum</i>	78
Tabla 4.2.4 Composición elemental (EDX) de la hoja funcionalizada con Ag/AgCl de <i>Epipremnum aureum</i>	82
Tabla 4.2.5 Composición elemental (EDX) del tallo funcionalizado con Ag/AgCl de <i>Epipremnum aureum</i>	86
Tabla 4.2.6 Composición elemental cuantitativa de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl de <i>Epipremnum aureum</i> , expresada en porcentaje en peso (wt.%).....	91
Tabla 4.3.1 Resultados del análisis estadístico mediante la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para comparar los voltajes de salida entre las regiones raíz–tallo (D_1) y tallo– hoja (D_2) del sistema vegetal funcionalizado.....	93

GLOSARIO

ADS1256: Convertidor análogo-digital de alta resolución usado en sistemas de adquisición de datos para capturar señales eléctricas precisas.

Análisis de Rayos X por Dispersión de Energía (EDX): Técnica de caracterización elemental utilizada para identificar la distribución de elementos químicos en las muestras.

AVR Mega2560: Microcontrolador utilizado para controlar el sistema de adquisición de datos y procesar las señales del experimento.

Bioelectrónica vegetal: Rama interdisciplinaria que estudia la integración de sistemas electrónicos en tejidos vegetales para sensado, monitoreo o interacción activa.

Biosensores: Dispositivos que combinan sistemas biológicos con detectores electrónicos para medir parámetros ambientales o biológicos.

Células Traqueidas: Células alargadas del xilema responsables del transporte de agua y minerales en plantas, esenciales para la formación de canales conductores.

Conductividad Eléctrica: Capacidad de un material para permitir el paso de corriente eléctrica, evaluada en este estudio en el sistema vascular de las plantas.

Conductividad Óhmica: Relación lineal entre corriente y voltaje en un sistema conductor, como se observó en las nanopartículas de plata dentro de las plantas.

Convertidor Análogo-Digital (ADC): Dispositivo que transforma señales analógicas en datos digitales, crucial para la adquisición precisa de información experimental.

Difracción de Rayos X (DRX): Técnica que permite identificar las fases cristalinas presentes en un material, útil para caracterizar la estructura interna de nanocompuestos.

Electrofisiología de las Plantas: Estudio de los procesos eléctricos en plantas, incluyendo los potenciales de acción y la conducción de impulsos en respuesta a estímulos externos.

Epipremnum aureum: Planta conocida como "Pothos", utilizada en estudios debido a su adaptabilidad y resistencia, ideal para experimentos de conductividad eléctrica.

Espectroscopía de Impedancia Eléctrica (EIE): Técnica que mide la respuesta de un sistema biológico a una señal eléctrica alterna para inferir propiedades como resistencia o capacitancia.

Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR): Técnica analítica utilizada para identificar grupos funcionales en materiales orgánicos e inorgánicos mediante absorción de radiación infrarroja.

Ley de Faraday: Principio que describe la relación entre la cantidad de material depositado o disuelto durante una reacción electroquímica y la cantidad de carga eléctrica transferida.

Microscopía Electrónica de Barrido Ambiental (ESEM): Técnica de microscopía utilizada para observar estructuras microscópicas bajo condiciones ambientales controladas.

Nanocelulosa: Material derivado de la celulosa con propiedades mecánicas, químicas y eléctricas mejoradas, usado como soporte para nanopartículas.

Nanopartículas de Plata (AgNPs): Nanoestructuras metálicas con propiedades ópticas, eléctricas y antimicrobianas, utilizadas en aplicaciones biomédicas, ambientales y electrónicas.

P-MFC (Plant Microbial Fuel Cell): Celda de combustible microbiana vegetal, sistema bioelectroquímico que integra una planta como parte activa del proceso de generación de energía.

Polarización Eléctrica: Proceso de aplicar un voltaje constante o variable a un sistema, usado aquí para evaluar las propiedades conductoras de las nanopartículas.

Potenciales de Acción (PA): Señales eléctricas rápidas generadas por despolarización celular en respuesta a estímulos.

Potenciales de Variación (PV): Cambios eléctricos graduales inducidos por variaciones ambientales, sin umbral definido.

Prueba de Rangos con Signo de Wilcoxon: Método estadístico no paramétrico utilizado para comparar pares de datos y evaluar diferencias significativas.

Resistencia de Derivación (Shunt): Componente eléctrico usado para desviar parte de la corriente, facilitando la medición precisa en circuitos.

Sistema Vascular de las Plantas: Red de xilema y floema que transporta agua, nutrientes y, en este caso, partículas conductoras.

Umwelt: Término de origen alemán introducido por Jakob von Uexküll. Se refiere al entorno perceptivo subjetivo de un organismo, es decir, al conjunto de estímulos y señales del medio que dicho organismo puede detectar, interpretar y con los cuales puede interactuar.

Voltametría Cíclica (CV): Técnica electroquímica que mide la corriente en función del potencial aplicado en ciclos, útil para analizar propiedades de transferencia de carga.

NOMENCLATURAS

ADC: *Analog-to-Digital Converter*. Convertidor analógico-digital utilizado para digitalizar señales eléctricas de baja amplitud.

AgNPs: *Silver Nanoparticles*. Nanopartículas de plata.

AVR Mega2560: Microcontrolador de arquitectura AVR usado para gestionar la adquisición de datos y la comunicación con el sistema principal.

CV: *Cyclic Voltammetry*. Voltametría cíclica, técnica utilizada para caracterizar materiales electroactivos aplicando ciclos de voltaje.

DAQ USB-6000: Tarjeta de adquisición de datos de National Instruments usada como sistema de referencia en la medición de señales bioeléctricas.

D1 y D2: Distancias definidas entre raíz-tallo y tallo-hojas, respectivamente, para análisis de conducción eléctrica.

DRX: *Difracción de Rayos X*. Técnica para identificar fases cristalinas en materiales.

DS-1820: Sensor digital de temperatura utilizado en la caracterización ambiental del sistema.

E1, E2 y E3: Intervalos de medición definidos por la posición de las sondas en el sistema vascular de la planta.

EDX: *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*. Técnica de análisis elemental acoplada a microscopía electrónica.

EIS: *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. Técnica para evaluar impedancia en sistemas bioelectroquímicos.

ESEM: *Environmental Scanning Electron Microscopy*. Microscopía electrónica de barrido ambiental, permite observación de muestras biológicas sin recubrimiento metálico.

FTIR: *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. Técnica espectroscópica utilizada para identificar grupos funcionales en materiales.

NPs Ag/AgCl: Nanopartículas de plata y cloruro de plata utilizadas como medio conductor dentro de tejidos vegetales.

P-MFC: *Plant Microbial Fuel Cell*. Celda de combustible microbiana vegetal, dispositivo bioelectroquímico que genera energía a partir del metabolismo de plantas y microorganismos.

PA: *Potencial de Acción*. Pulso eléctrico rápido generado por cambios en el potencial de membrana.

PV: *Potencial de Variación*. Señal eléctrica gradual inducida por estímulos ambientales.

RShunt: *Shunt Resistor*. Resistencia de derivación utilizada para medir corriente indirectamente.

SPI: *Serial Peripheral Interface*. Protocolo de comunicación entre dispositivos embebidos.

UART: *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*. Protocolo de comunicación serie utilizado para transmisión de datos.

VDD: Voltaje de alimentación de los componentes electrónicos.

WT: *Weight Percentage*. Porcentaje en peso de un componente en una mezcla o formulación.

μV: Microvoltios, unidad de potencial eléctrico empleada para registrar señales de bajo nivel en sistemas biológicos.

INTRODUCCIÓN

Hace aproximadamente mil millones de años se produjo un hito evolutivo decisivo: la aparición de los primeros organismos capaces de generar su propia energía. Estos autótrofos fotosintéticos—las algas—constituyeron los primeros sistemas autosuficientes, capaces de fijar carbono inorgánico y, con ello, allanaron el camino hacia la colonización del medio terrestre por las plantas. Algunas algas y plantas superiores, además de su autonomía energética, desarrollaron excitabilidad eléctrica y redes de señalización que les permiten responder con rapidez a estímulos ambientales. Dichas señales, denominadas potenciales de acción (PA), viajan a través de canales iónicos y recorren grandes distancias dentro del organismo vegetal; al cuantificarlas en tiempo real es posible inferir el estado hídrico y fotoquímico de la planta—variables críticas para modelar productividad y estrés (Fromm & Lautner, 2007). Se ha demostrado, por ejemplo, que los PA inducen movimientos foliares rápidos, evidencia directa del carácter sensorial de estos organismos. Asimismo, estudios sobre la actividad eléctrica radicular bajo estrés climático indican que la capacitancia y la impedancia eléctrica son métricas valiosas para evaluar crecimiento y tolerancia (Cseresnyés et al., 2016).

Entre las metodologías no invasivas destaca la Espectroscopía de Impedancia Eléctrica (EIE), capaz de monitorizar la respuesta electrofisiológica vegetal frente a distintos estresores abióticos (Wu et al., 2017). Recientemente, la incorporación de nanopartículas conductoras y electrodos flexibles ha ampliado el alcance de tales estudios. En particular, las nanopartículas de plata (AgNPs) modulan procesos metabólicos y de señalización, introduciendo nuevas rutas de interacción planta-entorno (Angelini et al., 2016); (Stavrinidou et al., 2015). Al incrementar la conductividad del xilema, las AgNPs atenúan menos los PA, extendiendo su propagación a regiones usualmente aisladas y, potencialmente, acelerando respuestas de defensa sistémica. En paralelo, los electrodos basados en polímeros conductores—v. gr. PEDOT:PSS (poli(3,4-etilendioxitiofeno):poliestirensulfonato), un polímero orgánico altamente conductivo, biocompatible y mecánicamente flexible—han demostrado registrar microvoltajes del floema y correlacionarlos con flujos de sacarosa y hormonas, lo que abre oportunidades para la administración localizada de fármacos, la medicina regenerativa y la creación de interfaces sinápticas artificiales (Masarovicová & Králová, 2013); (Ouyang et al., 2014). El presente trabajo plantea avanzar en la bioelectrónica vegetal mediante la implantación de un nanocompuesto Ag/AgCl-nanocelulosa (10 % p/p de Ag) en el sistema vascular de *Epipremnum aureum*. Por su naturaleza metálica e iónica, dicho material puede transportar simultáneamente cargas

electrónicas (electrones y huecos) y especies cargadas (cationes y aniones), facilitando la comunicación interna y la interacción con el medio. La inserción deliberada de conductores en haces vasculares constituye, a la vez, herramienta para profundizar en la fisiología vegetal y plataforma para desarrollar aplicaciones de alto impacto en agricultura, medio ambiente y tecnología. No obstante, las aproximaciones actuales adolecen de limitaciones en durabilidad, biocompatibilidad y escalabilidad (Stavrinidou et al., 2015), (Stavrinidou et al., 2017). Sin una interfaz electroquímica estable que preserve la viabilidad vascular, las métricas eléctricas no pueden traducirse en indicadores agronómicos accionables. De ahí la brecha que esta investigación pretende subsanar: la ausencia de estudios sistemáticos sobre la implantación estable de nanocompuestos Ag/AgCl-nanocelulosa *in planta*. Al sintetizar dichos materiales mediante rutas verdes se combinan conducciones electrónica e iónica con mínima citotoxicidad, lo que abre la puerta a arquitecturas de sensado y generación de energía *in planta* y, en consecuencia, amplía el horizonte de la bioelectrónica vegetal.

Capítulo 1. Marco Teórico

Las plantas, aunque no poseen un sistema nervioso como los animales, han desarrollado mecanismos sorprendentes para mantener una comunicación interna eficiente. De forma silenciosa y continua, coordinan reacciones complejas que les permiten adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno. Entre dichos mecanismos destaca su capacidad para generar señales eléctricas en respuesta a estímulos externos. Estos estímulos pueden incluir variaciones en la intensidad de la luz, cambios de temperatura, contacto físico, la presencia de compuestos químicos o la interacción con organismos vivos. Este fenómeno, conocido como excitación bioelectroquímica, implica alteraciones en el equilibrio iónico de las células vegetales que desencadenan impulsos eléctricos capaces de propagarse a través de sus tejidos.

Cabe desatacar que estas señales eléctricas no se producen exclusivamente en contextos de estrés o amenaza. Diversos estudios han demostrado que forman parte integral de los procesos fisiológicos cotidianos de las plantas. Estas señales participan activamente en funciones como la fotosíntesis, la regulación de las estomas, el transporte de agua y nutrientes, así como en el crecimiento y desarrollo general de la planta. A través del sistema vascular, en especial mediante el floema, estas señales eléctricas se desplazan facilitando la coordinación entre diferentes órganos. Por ejemplo, una alteración detectada en una hoja puede generar una señal que se propaga hasta las raíces, permitiendo que la planta responda de forma integrada y adaptativa (Volkov, 2012).

A partir de este conocimiento, surge una visión más amplia sobre el papel funcional de las plantas. De ser consideradas organismos pasivos, se reconoce ahora su capacidad de percibir, procesar y reaccionar ante su entorno. En este contexto se plantea el concepto de plantas aumentadas, una propuesta que busca potenciar las capacidades naturales de las plantas mediante la incorporación de tecnología. No se trata de modificar su código genético, sino de integrar materiales funcionales como nanopartículas conductoras, sensores electroquímicos o plataformas electrónicas que permitan registrar y amplificar las señales bioeléctricas que la planta genera de forma natural.

Como resultado de esta integración, se consolida un enfoque verdaderamente interdisciplinario, en el que convergen la botánica, la nanotecnología, la electrónica, la ciencia de materiales y la computación. En particular, el uso de nanopartículas de plata y cloruro de plata (Ag/AgCl) ha mostrado resultados prometedores debido a sus propiedades eléctricas, su biocompatibilidad y su capacidad antimicrobiana. Cuando estas nanopartículas se integran en la planta utilizando una

matriz como la nanocelulosa, se facilita la conducción interna de señales sin comprometer la salud ni el funcionamiento fisiológico del organismo vegetal.

Con base en estos avances, se abre la posibilidad de construir sistemas biosensores vivos, en los cuales la planta actúa como componente sensorial activo. Estos sistemas pueden captar información del entorno y transmitirla en tiempo real mediante circuitos electrónicos adaptados. Así, la presente investigación se enfoca en el diseño y validación de una arquitectura basada en una planta aumentada mediante nanopartículas de Ag/AgCl, que actúa como el núcleo de un sistema biosensor destinado a la monitorización ambiental inteligente.

1.1. Electrofisiología de las Plantas

La capacidad de los organismos vivos para generar y conducir impulsos eléctricos representa una propiedad fundamental que regula múltiples procesos fisiológicos. En particular, en el caso de las plantas, esta característica ha sido históricamente subestimada, aunque actualmente se reconoce con mayor claridad su papel central en la percepción y respuesta a estímulos ambientales. Las plantas, al enfrentarse a cambios en su entorno, responden generando gradientes eléctricos inducidos por alteraciones en el potencial de membrana de sus células. Estos gradientes pueden originarse por diversos factores, como variaciones en la intensidad y calidad de la luz, alteraciones gravitacionales, cambios en la presión osmótica, exposición a compuestos químicos, heridas mecánicas o modificaciones en el potencial hídrico del suelo o de la propia planta.

Desde el punto de vista funcional, las señales eléctricas generadas por estos estímulos se manifiestan generalmente en dos formas principales: los potenciales de acción y los potenciales de variación. Los primeros son respuestas rápidas, con umbrales definidos, que implican una despolarización seguida de una repolarización, similares en comportamiento a las señales neuronales animales. Por otro lado, los potenciales de variación se caracterizan por ser más lentos y graduales, y su magnitud depende de la intensidad del estímulo recibido. Ambos tipos de señales están estrechamente relacionados con la reacción del organismo vegetal frente a condiciones normales o de estrés, y permiten que la planta coordine respuestas sistémicas en tiempo real.

En términos históricos, el estudio formal de estos fenómenos en vegetales tiene antecedentes históricos notables. Sir John Burdon-Sanderson, en 1874, fue el primero en documentar experimentalmente la existencia de potenciales eléctricos en plantas, particularmente en la especie *Dionaea muscipula*, conocida comúnmente como Venus atrapamoscas. Durante sus

experimentos, aplicó estímulos mecánicos a los filamentos sensoriales de las hojas y logró registrar diferencias de voltaje entre las superficies adaxial y abaxial de una hoja, marcando un hito en la comprensión de la electrofisiología vegetal. Posteriormente, en 1906, el científico Jagadish Chandra Bose profundizó en estas observaciones mediante estudios sistemáticos en la *Mimosa pudica*, una planta reconocida por su movimiento rápido ante estímulos. Bose estableció una correlación directa entre los movimientos observables de la planta y los impulsos eléctricos generados internamente, reforzando la idea de que la electricidad vegetal no solo es una respuesta pasiva, sino un componente activo del comportamiento fisiológico. Estas investigaciones tempranas sentaron las bases para la comprensión moderna de la señalización eléctrica en plantas, permitiendo posteriormente el desarrollo de métodos de registro más precisos y la integración de este conocimiento en campos como la bioelectrónica y los sistemas biosensores (Bose, 1926). (figura 1.1.1).

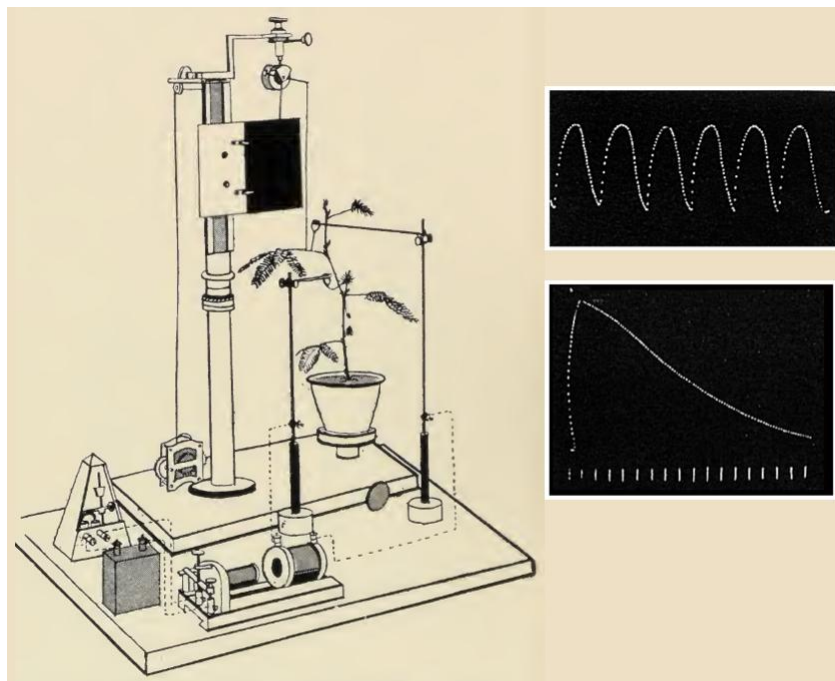


Figura 1.1.1 Dispositivo de Bose para estudiar turgencia en *Mimosa Púdica* (IISC, Bangalore, 1906).

1.2. Tecnología y el “Umwelt”.

El filósofo francés Gilbert Simondon concibe los objetos técnicos no como unidades aisladas, sino como entidades inmersas en un proceso de evolución y concretización, el cual responde a una lógica interna y contextual. En su planteamiento, la *concretización* es el proceso mediante el cual los elementos técnicos adquieren coherencia funcional en relación con su entorno, generando una coadaptación entre estructura, uso y medio (Schmidgen, 2005), (Henning Schmidgen & Translated by Nils F. Schott, 1851). Este enfoque se articula con el concepto de un *Umwelt* —concepto introducido por Jakob von Uexküll— que describe una esfera perceptiva específica para cada forma de vida, y por extensión, para cada sistema tecnológico. En este marco interpretativo, el entorno no es un fondo neutro, sino un sistema de significados al cual la tecnología responde activamente. (figura 1.2.1).

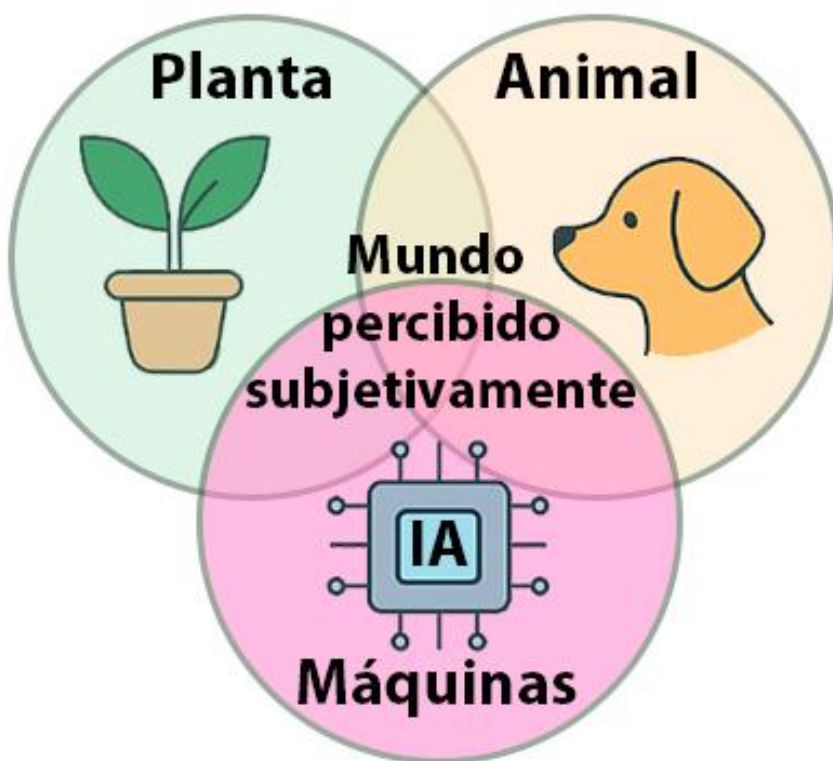


Figura 1.2.1 Representación del concepto de Umwelt como el mundo percibido subjetivamente por diferentes entidades: plantas, animales y máquinas.

En esta misma línea de pensamiento, Norbert Wiener, padre de la cibernética, propone una visión en la que los sistemas vivos y las máquinas no constituyen entidades dicotómicas, sino elementos

que pueden integrarse funcionalmente mediante retroalimentación y control. En *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine* (1948), Wiener establece que “las máquinas modernas están acopladas al mundo exterior tanto para la recepción de impresiones como para la ejecución de acciones, conteniendo órganos sensoriales, efectores y equivalentes de un sistema nervioso” (Wiener, 2019), (figura 1.2.2). Esta integración permite pensar en máquinas sensibles que coexisten en el mismo tiempo bergsoniano que los organismos vivos, lo cual disuelve la frontera entre lo natural y lo artificial.(Wiener, 2019)

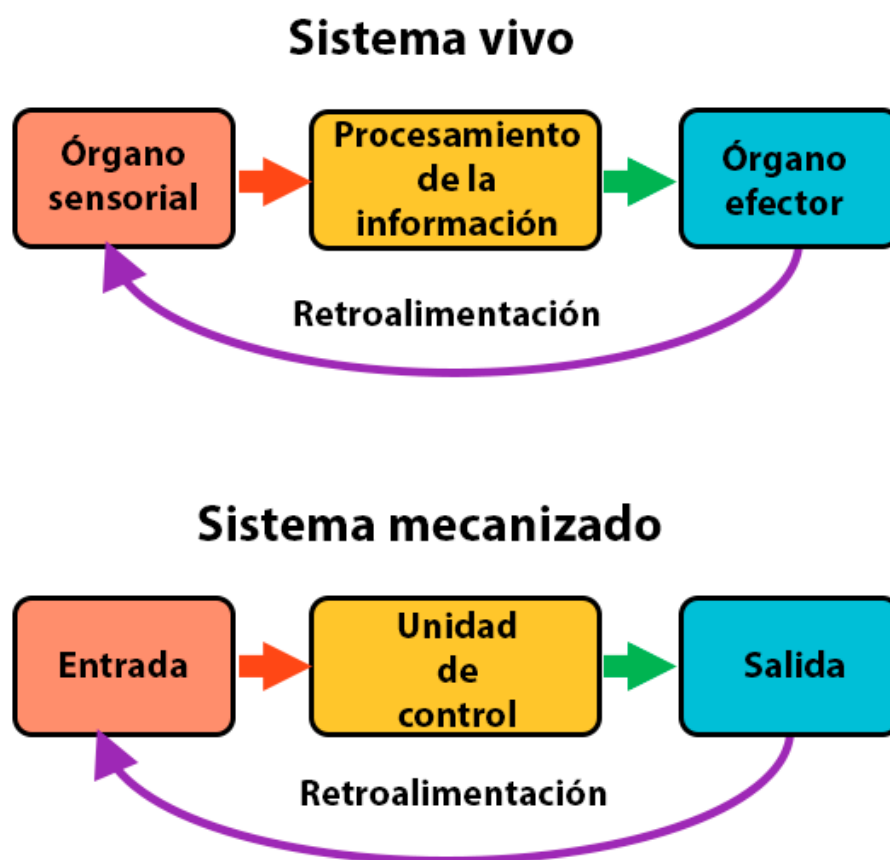


Figura 1.2.2 Representación del principio de retroalimentación en sistemas vivos y mecanizados, destacando el flujo de información y el ajuste mediante retroalimentación.

La convergencia entre cuerpo, máquina y entorno también se manifiesta en las aplicaciones actuales de tecnologías híbridas, como prótesis inteligentes, neurointerfaces y sistemas bioelectrónicos. No obstante, el vínculo entre sistemas tecnológicos y organismos vegetales — particularmente plantas— permanece poco explorado. Aunque carecen de un sistema nervioso centralizado, las plantas presentan mecanismos de señalización eléctrica y química que pueden ser modulados tecnológicamente. En este contexto, desarrollamos un sistema biosensor basado en

plantas aumentadas con nanopartículas de plata, constituyendo un ejemplo tangible del entrelazamiento entre tecnología y medioambiente. A diferencia de una mera inserción mecánica, aquí la tecnología se convierte en parte activa del *Umwelt* de la planta, habilitando nuevas funciones orientadas al monitoreo ambiental, la sostenibilidad y la sensibilidad ecológica.

1.3. Nanotecnología y Funcionalización de Sistemas Biológicos

La nanotecnología ha emergido como una disciplina transversal de gran impacto científico y tecnológico, al situarse en la intersección entre la física, la química, la biología y la ingeniería. Su rasgo distintivo radica en la manipulación controlada de la materia a escala nanométrica (1–100 nm), donde las propiedades físicas, químicas y biológicas de los materiales pueden diferir radicalmente de las observadas a macroescala. A estas dimensiones, los efectos cuánticos, la relación superficie-volumen y la reactividad superficial juegan un papel predominante, generando nuevos fenómenos que pueden ser aprovechados en aplicaciones funcionales de alta precisión.

En particular, uno de los enfoques más prometedores en nanotecnología es la utilización de nanopartículas metálicas, entre las cuales destacan las nanopartículas de plata (AgNPs). Estas estructuras presentan propiedades ópticas, electrónicas, térmicas y biológicas únicas, derivadas de su elevada área superficial y de su capacidad para interactuar con sistemas vivos a nivel molecular. Las AgNPs han sido ampliamente estudiadas por sus efectos antibacterianos, antifúngicos, y antivirales, pero también por su potencial como materiales funcionales en sensores electroquímicos, catalizadores y plataformas de diagnóstico.

Desde una perspectiva biológica, las AgNPs pueden ser incorporadas o soportadas en matrices naturales como la nanocelulosa, formando sistemas compuestos capaces de interactuar con organismos vivos sin inducir toxicidad significativa, siempre que se respeten umbrales adecuados de concentración y tamaño. Estas interfases bio-nanoestructuradas pueden aprovecharse para modificar las propiedades eléctricas de las plantas, habilitando la conducción de señales o incluso la recolección de carga eléctrica en configuraciones tipo celda de combustible microbiana vegetal (P-MFC, por sus siglas en inglés: *Plant Microbial Fuel Cell*).

En este sentido, el uso de AgNPs en combinación con plantas representa un enfoque emergente en el desarrollo de sistemas bioelectrónicos híbridos, donde la vegetación deja de ser únicamente un ente pasivo de estudio para convertirse en un componente activo en el monitoreo ambiental, la generación de energía y la respuesta sensorial. Esta integración habilita nuevas funcionalidades

tecnológicas a través de la convergencia entre nanotecnología, biología vegetal y electrónica, en línea con la visión contemporánea de una ecología tecnológica avanzada.

A partir de esta premisa, este trabajo explora dicha interacción mediante el diseño y caracterización de sistemas biosensores en los que plantas del género *Epipremnum aureum* son aumentadas con nanopartículas de Ag/AgCl soportados en nanocelulosa. Cuyo objetivo es aprovechar sus propiedades de transporte electrónico y compatibilidad estructural para desarrollar un entorno funcional donde lo natural y lo artificial coexisten de manera sinérgica.

1.4. Características y Propiedades de las Nanopartículas de Plata (AgNPs)

Las nanopartículas de plata (AgNPs) han cobrado un lugar central en el campo de la nanotecnología aplicada debido a su combinación única de propiedades fisicoquímicas, biológicas y electrónicas. Gracias a su alta relación superficie-volumen, su reactividad superficial y los efectos cuánticos que emergen a escala nanométrica, presentan comportamientos radicalmente distintos a los de sus contrapartes macroscópicas. Como resultado, las AgNPs se consideran materiales de elección en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo optoelectrónica, catálisis, remediación ambiental, sistemas de liberación controlada de fármacos, bioimagenología y sensores electroquímicos.

En el ámbito antimicrobiano, su fotoactividad permite la generación de especies reactivas de oxígeno bajo radiación luminosa, lo que les confiere un efecto bactericida eficaz frente a bacterias grampositivas y gramnegativas, así como contra hongos. Esta propiedad resulta fundamental en su uso dentro de membranas filtrantes, superficies médicas y sistemas de purificación de agua. Adicionalmente, las AgNPs pueden emplearse como marcadores ópticos debido a sus propiedades plasmónicas, lo que permite su detección mediante espectroscopía de absorción y dispersión, aspecto clave en aplicaciones biomédicas y de diagnóstico.

Otro factor determinante en el desempeño de las AgNPs es su morfología. Dependiendo de las condiciones de síntesis —como la temperatura, el tiempo de reacción, la relación de precursores, el flujo de agentes reductores y la presencia de sustratos o agentes estabilizantes— las AgNPs pueden adoptar diversas formas, incluyendo esferas, varillas, cubos, triángulos y prismas. Dicha variabilidad morfológica influye directamente en su comportamiento óptico (por ejemplo, el

desplazamiento del pico de resonancia del plasmón superficial localizado), así como en su eficiencia catalítica y su capacidad de interacción con matrices biológicas. (figura 1.4.1).

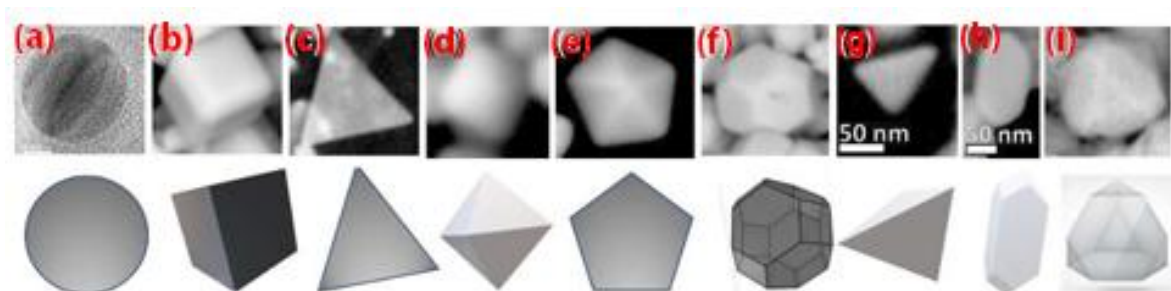


Figura 1.4.1. Diferentes formas sólidas de nanopartículas sintetizadas a) esféricas (Aguilar & Rosas, 2019), b) cúbicas (Aguilar & Rosas, 2019), c) triangulares (Herrero-Calvillo et al., 2019), d) octaédricas (Aguilar & Rosas, 2019), e) decaédricas (Mares-Briones & Rosas, 2017), f) cubo-octaédricas (Aguilar & Rosas, 2019), g) tetraédricas (Mares-Briones & Rosas, 2017), h) tetragonal deuteroprisma (Mares-Briones & Rosas, 2017), i) tetraedro truncado (Aguilar & Rosas, 2019).

Los enfoques de síntesis verde o biológicamente asistida han cobrado relevancia en los últimos años, al emplear extractos de origen vegetal como agentes reductores y estabilizantes naturales en la producción de nanopartículas. Este tipo de metodología presenta ventajas significativas, ya que permite reducir el impacto ambiental asociado a la síntesis convencional, al tiempo que mejora la compatibilidad biológica de los nanomateriales obtenidos. Diversos estudios han demostrado que las nanopartículas generadas mediante estos procesos pueden integrarse eficazmente en membranas poliméricas, dotándolas de propiedades antimicrobianas, mayor estabilidad estructural y funcionalidad en condiciones húmedas o biológicamente activas (Ledezma A et al., 2014).

Además, la incorporación de estas nanopartículas en sistemas híbridos bio-nanoestructurados permite desarrollar nuevas plataformas funcionales, particularmente en aplicaciones orientadas al monitoreo ambiental, al sensado químico, y a la generación de energía a partir de procesos bioelectroquímicos.

1.5. Métodos de Síntesis de Nanopartículas de Plata (AgNPs)

Existen diversos métodos para la síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs), los cuales pueden clasificarse en tres grandes grupos: **métodos químicos, biológicos y físicos** (Ledezma A et al., 2014). Cada uno de estos enfoques presenta ventajas y limitaciones particulares en términos de control morfológico, pureza, costo, escalabilidad y sostenibilidad. Esta diversidad metodológica

permite adaptar la producción de AgNPs según los requerimientos específicos de cada aplicación (figura 1.5.1).

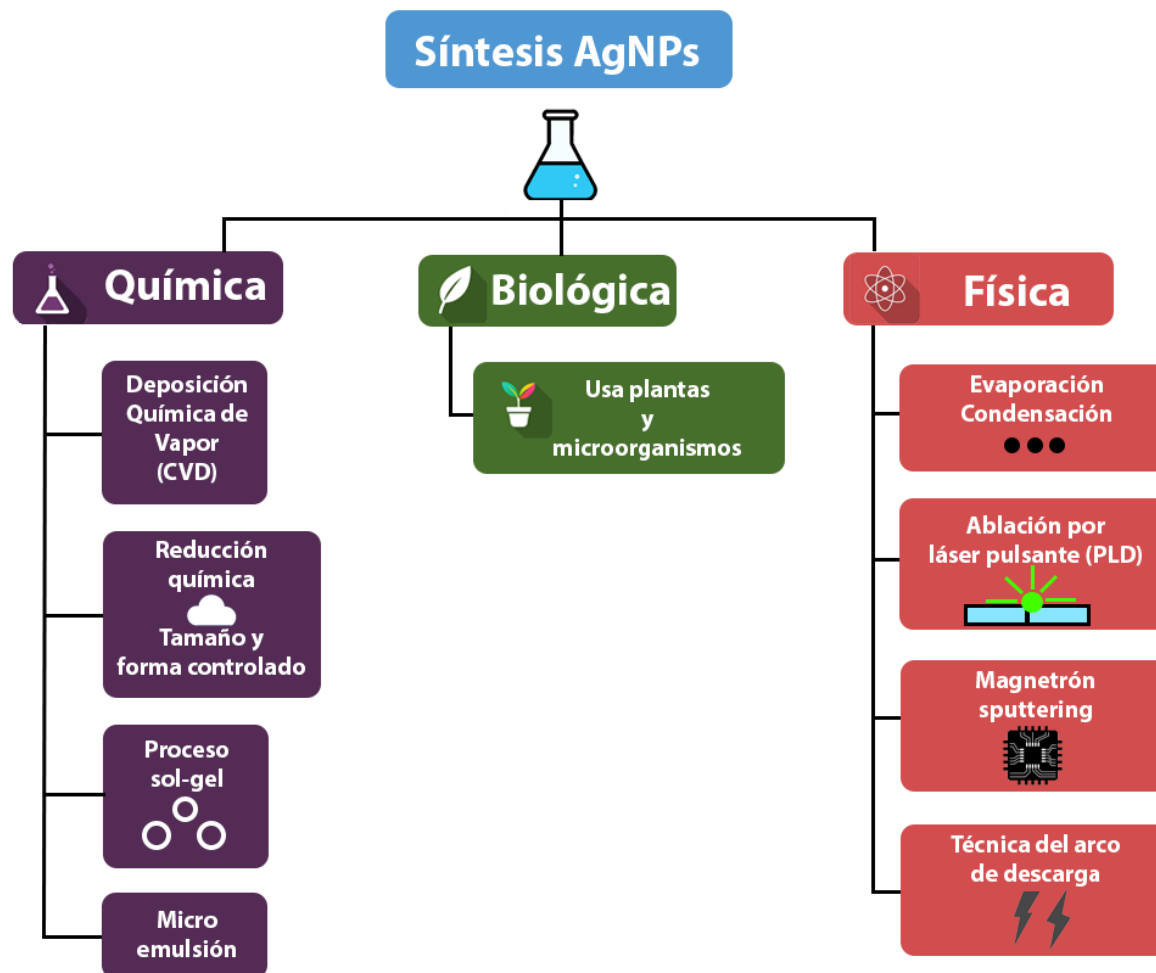


Figura 1.5.1. Clasificación de métodos de síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs)

1.5.1. Síntesis Química

1.5.1.1. Deposición Química de Vapor (CVD - Chemical Vapor Deposition)

Es un proceso en el cual uno o más compuestos volátiles que contienen el material deseado (por ejemplo, sales de plata) reaccionan o se descomponen en la superficie de un sustrato sólido, formando una capa delgada de nanopartículas.

Características:

- Alta pureza y control de espesor.
- Requiere temperaturas elevadas.
- Muy usada en recubrimientos, sensores y microelectrónica.

1.5.1.2. Reducción Química

Consiste en la reducción de iones de plata (Ag^+) en solución a plata metálica (Ag^0) mediante un agente reductor como borohidruro de sodio (NaBH_4), citrato de sodio o ácido ascórbico.

Características:

- Muy utilizada por su simplicidad y eficiencia.
- Permite controlar el tamaño y la forma de las nanopartículas ajustando las condiciones de síntesis.
- Puede requerir agentes estabilizantes para evitar la aglomeración.

1.5.1.3. Proceso Sol-Gel

Es una técnica en la que se parte de una solución líquida (*sol*) de precursores metálicos que, mediante reacciones de hidrólisis y condensación, forman una red tridimensional sólida (*gel*), dentro de la cual se pueden formar o incorporar nanopartículas.

Características:

- Adecuado para integrar AgNPs en matrices vítreas o cerámicas.
- Útil para recubrimientos y materiales híbridos.
- Permite una distribución homogénea de nanopartículas.

1.5.1.4. Microemulsión

Consiste en una mezcla estable de agua, aceite y tensioactivos que forma micelas (estructuras coloidales). Dentro de estas micelas ocurre la reacción de reducción de Ag^+ , funcionando como “nanorreactores” para formar nanopartículas con tamaño muy uniforme.

Características:

- Alta monodispersión (tamaño muy uniforme).
- Condiciones suaves de síntesis.
- Ideal para obtener nanopartículas bien definidas y estables.

A continuación, la *Tabla 1.5.1* resume comparativamente los principales métodos químicos empleados para la síntesis de nanopartículas de plata, destacando su principio de operación, ventajas y aplicaciones típicas.

Tabla 1.5.1. Comparativa resumida — Métodos químicos para sintetizar AgNPs

Método	Medio/Principio	Ventaja clave	Uso típico
CVD	Precursores gaseosos sobre sustrato caliente	Películas muy puras y uniformes	Recubrimientos, microelectrónica
Reducción química	Ag^+ + agente reductor en solución	Síntesis sencilla y barata	Tintas conductoras, antimicrobianos
Sol-Gel	Hidrólisis/condensación → gel poroso	Inserción homogénea en matrices	Películas ópticas, catalizadores
Microemulsión	Reducción dentro de micelas (agua/aceite)	Tamaño casi monodisperso	Aplicaciones biomédicas, plasmones

1.5.2. Síntesis Biológica

Síntesis biológica: utiliza extractos vegetales (hojas, frutos, algas) o cultivos de bacterias y hongos como agentes reductores y estabilizantes naturales. En condiciones suaves de pH y temperatura, los metabolitos liberan electrones que transforman Ag^+ en Ag^0 , formando nanopartículas recubiertas por biomoléculas. El proceso es ecoamigable y produce AgNPs biocompatibles con tamaño muy uniforme. De forma complementaria, la *Tabla 1.5.2* presenta las características distintivas de la síntesis biológica de nanopartículas de plata, resaltando su naturaleza ecoamigable y las variables experimentales más relevantes.

Tabla 1.5.2. Características distintivas de la síntesis biológica de AgNPs

Atributo	Descripción resumida
Fuente reductora-capping	Metabolitos de plantas , bacterias u hongos (flavonoides, azúcares, enzimas).
Sostenibilidad	Ruta ecoamigable ; no emplea reductores ni solventes tóxicos.
Condiciones de reacción	Temperatura ambiente–60 °C; pH neutro-básico; presión atmosférica.
Estabilización in situ	Biomoléculas se adsorben sobre AgNPs → alta estabilidad coloidal y biocompatibilidad.
Tamaño típico	5 – 50 nm; dispersión controlable variando pH, [extracto]/[Ag ⁺] y tiempo.
Morfología	Mayormente esférica; formas anisotrópicas posibles con ajuste fino del protocolo.
Reproducibilidad	Sensible a la variabilidad del extracto biológico; requiere estandarizar lotes.
Aplicaciones	Recubrimientos antimicrobianos, nanocompuestos “verdes”, sensores y usos médicos.

1.5.3. Síntesis Física

1.5.3.1. Evaporación-Condensación

Una fuente de plata metálica se vaporiza (calentamiento resistivo, haz de electrones o horno de inducción) en una cámara de vacío o atmósfera inerte. El vapor se enfría rápidamente en una zona más fría, nucleando y creciendo nanopartículas que se colectan como polvo o se depositan sobre un sustrato.

Características:

- **Alta pureza** (sin reactivos químicos) y baja contaminación.
- Tamaño controlado (5-30 nm) variando presión de gas, gradiente térmico y distancia de condensación.
- Equipo sencillo comparado con otras técnicas de vacío; producción continua posible con colectores fríos.

1.5.3.2. Ablación por Láser Pulsante (PLD)

Pulsos láser de alta energía inciden sobre un blanco de plata dentro de una cámara de vacío o gas inerte; el material se vaporiza formando un plasma que se expande y condensa como nube de nanogotas metálicas sobre un sustrato o colector.

Características:

- Control fino de tamaño (3-50 nm) disparo-a-disparo ajustando fluencia, frecuencia y presión del gas.
- Permite **co-depositar** capas delgadas o polvos libres de aglomerados.
- Produce nanopartículas con formas casi esféricas y dispersión estrecha; sin agentes químicos.

1.5.3.3. Magnetron Sputtering

Un plasma de Argón (Ar) ioniza y acelera iones (Ar^+) hacia un cátodo (blanco) de Plata (Ag); los impactos liberan átomos que se agregan y nucleon formando nanopartículas que se depositan sobre sustratos fríos o sobre un gas portador (para polvo).

Características:

- Depósitos **uniformes y adherentes**; espesores de unas pocas a centenas de nm.
- Escalable a grandes áreas y procesos roll-to-roll.
- Tamaño de partícula controlable ($\approx$ 5-20 nm) mediante potencia, presión y distancia cátodo-sustrato.
- Requiere vacío y fuente de potencia RF/DC (costo medio-alto).

1.5.3.4. Técnica del Arco de Descarga

Se genera un arco eléctrico de alto amperaje entre dos electrodos de plata en gas inerte (o vacío parcial); la intensa energía ($\sim 4000^\circ\text{K}$) vaporiza el metal, que luego se enfría y condensa en forma de nanopartículas.

Características:

- Síntesis masiva de polvos, mayor a gramos por hora, con tamaño 10-100 nm.
- Equipo robusto; fácil escalado industrial.
- Morfología principalmente esférica; posible aglomeración, por lo que suele requerir post-tratamiento para dispersión coloidal.
- Consumo energético elevado y menor control de distribución que PLD o sputtering.

Tabla 1.5.3. Comparativa resumida — Métodos físicos para sintetizar AgNPs

Técnica	Condiciones de operación (ambiente / energía)	Tamaño típico	Rendimiento
Evaporación-Condensación	Vacío $\leq 10^{-2}$ Torr; 1 200-1 500 $^\circ\text{C}$	5-30 nm	0.1-1 g h ⁻¹
Ablación láser (PLD)	Láser Nd:YAG 1064 nm, 5-10 J cm ⁻² , 10 Hz; Ar	3-50 nm	0.01-0.2 g h ⁻¹
Magnetron sputtering	Plasma Ar 1-5 Pa; 300-600 V, 0.1-2 A	5-20 nm	0.5-3 $\mu\text{m h}^{-1}$ (película)
Arco de descarga	Arco 20-40 V, 50-150 A ($\approx 1-6$ kVA); Ar	10-100 nm	> 10 g h ⁻¹

1.6. Plantas y sistemas electrónicos

La convergencia entre sistemas vegetales y artefactos electrónicos –en ocasiones denominada **botánica ciborg**– ha sido abordada, en su etapa inicial, desde iniciativas artísticas y de diseño crítico, las cuales funcionan como laboratorios conceptuales para explorar nuevas ontologías de “*máquina-organismo*”. Un antecedente paradigmático es Telegarden (Goldberg & Mataric, 1995) (*The Telegarden Website*, n.d.-a), instalación en la que un brazo robótico industrial, teleoperado vía Internet, permitía a miles de usuarios sembrar y regar un micro-huerto durante casi diez años, prefigurando la noción de horticultura remota y colaborativa. (*figura 1.6.1*).



Figura 1.6.1. Telegarden: brazo robótico teleoperado que permitía a usuarios remotos sembrar y regar un micro-huerto (The Telegarden Website, n.d.-b).

A este primer experimento le sucedieron obras que profundizan en el binomio *plant-machine*. Soybots (McMullen et al., 2016) y Floiaboigs (Demaray, 2014) incorporan sensores de irradiancia y plataformas móviles capaces de recolocar macetas a fin de optimizar la captación lumínica, trasladando el *tropismo* de la planta al plano robótico (McMullen_Winkler: *SoyBots*, n.d.), (figura 1.6.2). En Elowan (Patel, 2018) las señales electrofisiológicas del vegetal se acoplan directamente a los actuadores de una base rodante, de modo que la planta deviene “conductora” del sistema y no mero pasajero biológico, (figura 1.6.3).



Figura 1.6.2. Soybot: plataforma móvil con maceta y sensor de luz (McMullen_Winkler: SoyBots, n.d.)

Existen, asimismo, propuestas que hibridan biomateriales y mecatrónica: Phytowalkers (Yamaoka, 2016) (Leopoldseder & Schopf, 2017) emplea ramas naturales como elementos de locomoción articulados mediante servomotores, (*figura 1.6.4*); Parasitic (Menz, 2016) tensiona el diálogo naturaleza-tecnología mediante un cabezal fresador que graba texto sobre la corteza arbórea, evidenciando la agencia recíproca entre organismo vivo y dispositivo industrial (*'Parasitic / Symbiotic' Robot Crawls Up Trees, CNC Carves into Bark 'like a Parasite' #Arduino* «Adafruit Industries – Makers, Hackers, Artists, Designers and Engineers!», n.d.).



Figura 1.6.3. Elowan: planta-robot híbrido cuyo desplazamiento está gobernado por las señales bioeléctricas del propio vegetal (crédito: M. Patel, 2018) (Overview < Elowan: A Plant-Robot Hybrid — MIT Media Lab, n.d.)



Figura 1.6.4 Phytowalkers: robot con “piernas” de ramas naturales, exhibido, (Fogašová et al., 2022).

Los antecedentes revisados confirman la posibilidad de acoplar circuitos de información y movilidad entre la planta y el dispositivo; sin embargo, tales experiencias siguen limitadas a pruebas exploratorias. Persiste la ausencia de protocolos sistemáticos que garanticen biocompatibilidad duradera, integración vascular y desempeño electroquímico fiable. La

investigación aquí planteada se orienta a subsanar estas brechas mediante la implantación, *in planta*, de nanocompuestos Ag/AgCl soportados en nanocelulosa.

1.6.1. Fundamentos de la bioelectrónica a vegetal

Las plantas no son entes pasivos: poseen complejas redes de señalización eléctrica y química que coordinan fotosíntesis, movimientos foliares, cicatrización y respuestas al estrés abiótico. Los potenciales de acción (PA) y los potenciales de variación (PV) viajan a lo largo de tejidos vasculares mediante corrientes de iones Potasio (K^+), Calcio (Ca^{2+}) y Cloro (Cl^-), alcanzando velocidades de hasta 10 cm s^{-1} . En este sistema vascular el xilema transporta savia ascendente rica en cationes y actúa como vía preferencial para cargas positivas; el floema, con su alto contenido de azúcares, facilita el desplazamiento de protones y aniones. En conjunto, estos haces conductores constituyen, a escala micrométrica, una arquitectura de cables bio-iónicos capaz de integrarse con materiales electrónicos blandos. Sobre esta base fisiológica, se erige la bioelectrónica vegetal, disciplina que busca registrar, amplificar o modular esas señales mediante electrodos flexibles, polímeros conductores y nanosistemas híbridos. Esta interfaz permite tanto la lectura (sensado *in planta*) como la escritura (estimulación controlada) de información, habilitando aplicaciones en agricultura de precisión, fitopatología y robótica viva.

1.6.2. Materiales conductores y nanocompuestos aplicados *in planta*

Los electrodos tradicionales de metal noble son invasivos, rígidos y químicamente inestables frente a la savia vegetal. Para superar estas limitaciones, se han propuesto polímeros conductores —como PEDOT:PSS, PEDOT:PCL o polianilina— que pueden imprimirse o electropolimerizarse directamente sobre los tejidos, brindando conformabilidad mecánica y modulación *in situ* de su dopaje. De manera complementaria, las nanopartículas metálicas, tales como plata (Ag), oro (Au) y cobre (Cu), ofrecen una conductividad electrónica superior y fenómenos plasmónicos útiles en aplicaciones de fotobiosensado; no obstante, también presentan riesgos de citotoxicidad y tendencia a la agregación.

Ante este escenario, la nanocelulosa emerge como un soporte biocompatible de alto valor funcional: su elevada relación superficie-volumen y su red tridimensional de fibrillas permiten enlazar físicamente nanopartículas (NPs) o partículas de Ag/AgCl, formando aerogeles o hidrogeles que se hinchan con la savia sin comprometer la integridad del tejido. Además, las

síntesis “verdes” basadas en extractos vegetales —como los obtenidos de *Opuntia* sp.— permiten reducir sales de plata inorgánicas y, al mismo tiempo, recubrir las NPs con compuestos fenólicos naturales. Estos recubrimientos no sólo atenúan la toxicidad, sino que también mejoran la compatibilidad a largo plazo con el parénquima vascular, facilitando su integración en el entorno fisiológico de la planta.

1.6.3. Métodos de integración vascular y evaluación funcional

Las estrategias de incorporación del material conductor persiguen maximizar el contacto eléctrico sin comprometer la fisiología de la planta. Entre las técnicas más empleadas se encuentran la infiltración por vacío-presión, la microinyección asistida por microagujas huecas y la electropolimerización *in vivo*, todas ellas orientadas a introducir o formar conductores dentro de los tejidos vasculares sin alterar su funcionalidad.

La infiltración por vacío-presión ha sido ampliamente documentada en la literatura [5] como un método eficaz para inducir la penetración de nanocompuestos en los haces vasculares. Este procedimiento alterna ciclos de vacío (−50 kPa) y presión positiva (+70 kPa), lo que favorece el desplazamiento de la suspensión dentro del xilema y el floema. La (Figura 1.6.5) ilustra el principio del proceso mediante un ejemplo clásico con hojas de rosa tratadas con el nanocompuesto PEDOT:PSS-NFC, donde se evidencia la infiltración del material en la región vascular. En el presente trabajo, se aplicó un protocolo análogo utilizando una suspensión de nanopartículas Ag/AgCl soportadas en nanocelulosa, adaptando los parámetros de presión y tiempo a las condiciones fisiológicas de *Epipremnum aureum* para lograr una integración estable del material conductor

Electropolimerización *in vivo*: se aplican pulsos de corriente a electrodos externos; el monómero conductor s Por su parte, la microinyección asistida por microagujas huecas permite depositar volúmenes inferiores a 1 µL con resolución milimétrica, resultando especialmente útil en pecíolos foliares sin inducir cavitación (Figura 1.6.6). Finalmente, la electropolimerización *in vivo* consiste en aplicar pulsos de corriente entre electrodos externos para inducir la formación controlada de un film conductor adherido a las paredes vasculares, garantizando continuidad eléctrica y biocompatibilidad a largo plazo.e oxida y forma un film adherido a la pared vascular.

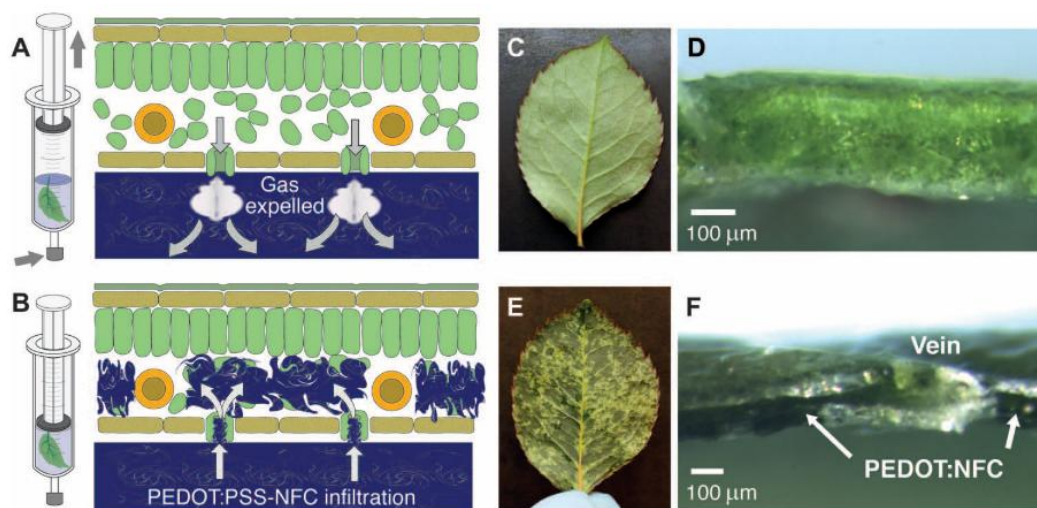


Figura 1.6.5. Infiltración vacío–presión de un nanocompuesto **PEDOT:PSS-NFC** en hojas de rosa [5]. (A) La hoja se coloca en una jeringa llena de la suspensión; al generar -50 kPa se expulsa el aire del mesófilo.

(B) Al retornar a $+70$ kPa, el fluido penetra a través de los estomas y llena el entramado entre venas. (C, D) Hoja testigo antes de la infiltración.

(E, F) Hoja y corte transversal tras la infiltración, donde se evidencia la deposición de PEDOT:NFC en la región vascular.

Adaptado de (Stavrinidou et al., 2015).

La eficacia de cada protocolo se evalúa mediante espectroscopía de impedancia eléctrica (10 mHz–1 MHz), microscopía confocal con sondas fluorescentes y mapas EDX-SEM, los cuales permiten verificar la distribución axial y radial del conductor. Parámetros como resistencia vascular, constante de tiempo RC y capacidad de retención de carga informan sobre la funcionalidad electroquímica del sistema integrado

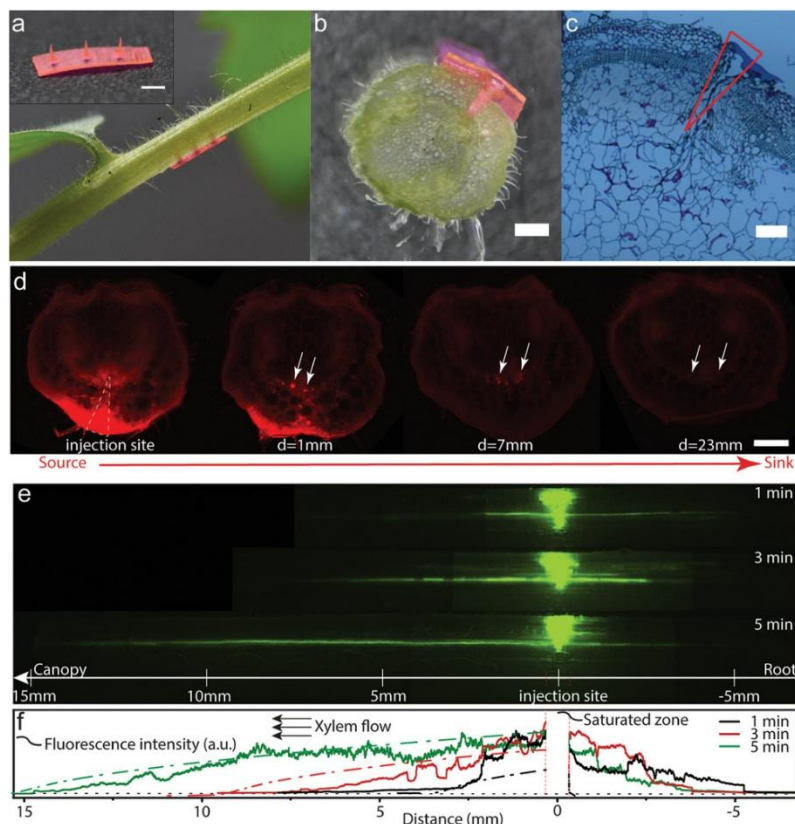


Figura 1.6.6. Entrega localizada de rhodamina 6G y carboxifluoresceína en el sistema vascular de tomate mediante microinyección con microagujas tipo phytoinjector.

(a) Inserción de un arreglo de microagujas en el pecíolo foliar. Barra de escala: 1 mm.

(b) Corte transversal que muestra una phytoaguja alcanzando el floema del pecíolo. Barra: 500 μm.

(c) Imagen de campo claro de la sección histológica del tallo en el sitio de inyección. Barra: 200 μm.

(d) Microscopía de fluorescencia mostrando el transporte de rhodamina 6G en el floema desde la fuente hacia el sumidero; las flechas blancas indican acumulación en el floema. Barra: 500 μm.

(e) Secuencia de fluorescencia de 5(6)-carboxifluoresceína diacetato en el xilema a 1, 3 y 5 minutos postinyección, desde raíz hasta copa.

(f) Perfil de intensidad de fluorescencia en función de la distancia a lo largo del xilema, donde se identifican zonas de saturación, flujo y fondo.

Adaptado d. (Cao et al., 2020)

1.6.4. Aplicaciones emergentes y desafíos

Una vez establecida la interfaz, los tejidos vegetales pueden funcionar como biosensores autoalimentados que detectan pH, metales pesados o compuestos orgánicos volátiles, enviando la señal a nodos IoT invernadero-satélite. Los haces dopados actúan asimismo como cátodos o ánodos en celdas de combustible microbianas-vegetales, generando $\mu\text{W cm}^{-2}$ de potencia a partir

de exudados radiculares. En robótica híbrida, tallos con nanoconductores sirven de actuadores electro-osmóticos, plegándose tras estimulación eléctrica para guiar el crecimiento. No obstante, persisten desafíos críticos: (i) durabilidad frente a ciclos de expansión-contracción hídrica; (ii) balance iónico planta-material para evitar fitotoxicidad latente; (iii) escalabilidad de los procesos de síntesis e infiltración a cultivos comerciales; y (iv) marco regulatorio y bioético para la liberación de nano-materiales en entornos agrícolas. Resolver estos puntos definirá la transición de la bioelectrónica vegetal desde prototipos de laboratorio hacia tecnologías de impacto agronómico y ambiental.

1.7. Caracterización estructural y espectroscópica de nanocompuestos

La caracterización estructural y espectroscópica es esencial para comprender las propiedades físicas y químicas de los nanocompuestos, especialmente aquellos destinados a aplicaciones bioelectrónicas. Las técnicas analíticas como la microscopía electrónica de barrido (SEM), la espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDX), la difracción de rayos X (DRX) y la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) proporcionan información complementaria sobre la morfología, composición elemental, estructura cristalina y grupos funcionales de estos materiales.

1.7.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM) y análisis EDX

La SEM permite obtener micrografías de alta resolución que revelan la morfología superficial de los nanocompuestos, permitiendo evaluar la forma, distribución y tamaño promedio de las nanopartículas. Cuando se acopla con EDX, esta técnica facilita la identificación cualitativa y semicuantitativa de los elementos presentes, como plata (Ag) y cloro (Cl), siendo especialmente útil para verificar la distribución homogénea de las partículas en la matriz polimérica. (*figura 1.7.1*).



Figura 1.7.1. Sistema de microscopía electrónica de barrido (SEM) modelo EVO LS10 (Zeiss), empleado para el análisis morfológico de muestras vegetales y nanocompuestos. El equipo cuenta con detectores secundarios y retrodispersados, y puede acoplarse a sistemas EDX para análisis elemental en superficies biológicas y materiales nanoestructurados.

1.7.2. Difracción de Rayos X (DRX)

DRX permite identificar las fases cristalinas presentes en los nanocompuestos mediante el análisis de los patrones de difracción. Su fundamento teórico se basa en la Ley de Bragg, la cual describe la condición de interferencia constructiva que ocurre cuando un haz de rayos X incide sobre planos cristalinos paralelos y se refleja bajo un ángulo igual al de incidencia. Esta relación geométrica permite calcular la distancia interplanar a partir de los ángulos observados en el difractograma, (figura 1.7.2.1).

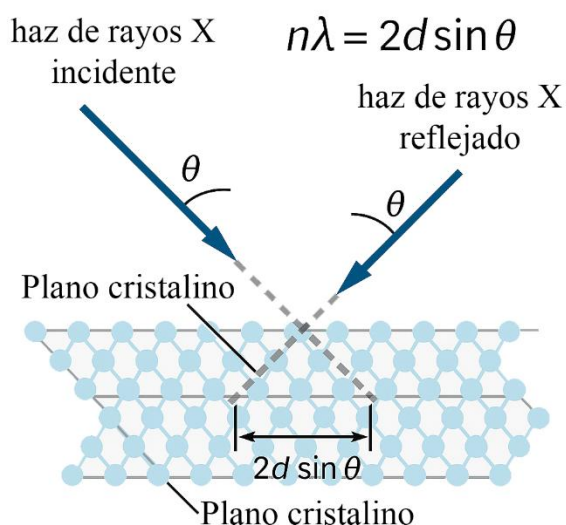


Figura 1.7.2 Representación esquemática de la Ley de Bragg, que describe la condición de interferencia constructiva entre haces de rayos X reflejados sobre planos cristalinos.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \dots \text{Ecuación 1. Ley de Bragg}$$

donde:

n es el orden de la difracción,
 λ es la longitud de onda del haz incidente,
 d es la distancia interplanar,
 θ es el ángulo de incidencia.

A partir del ensanchamiento de los picos en el difractograma, es posible estimar el tamaño de cristalita mediante la ecuación de Scherrer: (figura 1.7.2.2).

$$D = \frac{K\lambda}{(\beta \cos \theta)} \text{Ecuación 2. Scherrer}$$

donde:

D es el tamaño del cristalito,
 K es la constante de forma (generalmente 0.9),
 λ es la longitud de onda,
 β es el ancho del pico a media altura (en radianes),
 θ es el ángulo de Bragg.

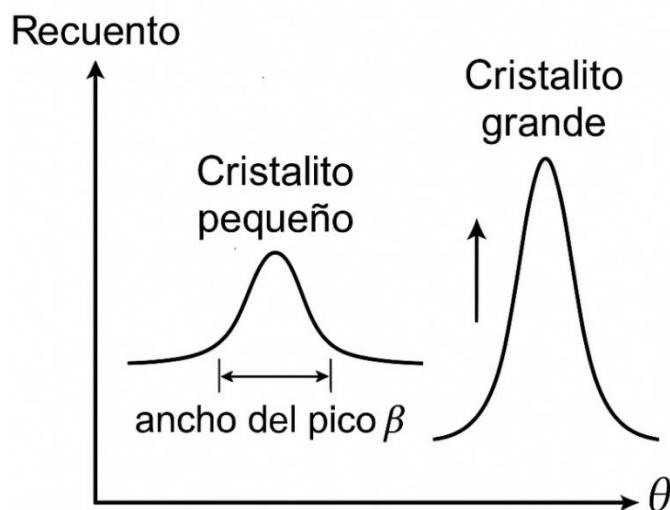


Figura 1.7.3. Relación entre el tamaño de cristalita y el ancho del pico en un difractograma de rayos X.

Esta información permite establecer correlaciones entre la fase cristalina, la estabilidad estructural y la eficiencia funcional de los materiales. Por ejemplo, la presencia de fases bien definidas y con bajo tamaño de cristalita puede asociarse con una mayor actividad superficial, lo cual es deseable en sistemas destinados al sensado o a la transferencia de carga en aplicaciones bioelectrónicas.

1.7.3. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) es una técnica analítica utilizada para identificar grupos funcionales presentes en compuestos orgánicos e inorgánicos mediante la absorción de radiación infrarroja en regiones específicas del espectro. Cada tipo de enlace molecular tiene una frecuencia de vibración característica, por lo que el análisis del espectro infrarrojo permite inferir la composición química de un material y las posibles interacciones entre sus componentes. En el contexto de nanocompuestos funcionalizados o sintetizados mediante métodos biológicos, la FTIR resulta especialmente útil para detectar la presencia de enlaces superficiales o cambios estructurales inducidos por el proceso de síntesis. Por ejemplo, en materiales basados en nanocelulosa, pueden identificarse bandas características asociadas a los grupos hidroxilo ($-OH$), enlaces $C-H$, $C-O-C$ y $C=O$, así como posibles desplazamientos o disminuciones de intensidad que indiquen interacción química con nanopartículas metálicas o agentes de estabilización.

La FTIR también permite evaluar la eficacia de procesos de funcionalización superficial y verificar la compatibilidad química entre la matriz polimérica y los aditivos inorgánicos. En aplicaciones bioelectrónicas, esta información es clave para asegurar que los materiales utilizados mantengan su integridad estructural y su biocompatibilidad al ser incorporados en sistemas vivos.

De esta manera, la espectroscopía FTIR complementa otras técnicas de caracterización estructural y ofrece una herramienta no destructiva para validar la composición química de sistemas híbridos como los compuestos Ag/AgCl–nanocelulosa empleados en esta investigación.

Para evaluar las propiedades estructurales, ópticas y morfológicas de los nanocompuestos obtenidos, se emplearon diversas técnicas instrumentales cuya aplicación y utilidad se resumen en la *Tabla 1.7.2.1*. Estas herramientas permiten identificar la fase cristalina, el tamaño de partícula, la morfología superficial y las transiciones electrónicas características de las nanopartículas metálicas.

Tabla 1.7.1 Técnicas de caracterización aplicadas a nanocompuestos y su utilidad

Técnica	Parámetro caracterizado	Aplicación en el estudio
SEM	Morfología, tamaño, forma superficial	Visualización de la distribución de nanopartículas sobre la matriz de nanocelulosa
EDX	Composición elemental	Confirmación de la presencia de Ag y Cl, análisis de homogeneidad
DRX	Fase cristalina, tamaño de cristalita	Identificación de estructuras cristalinas de Ag ⁰ y AgCl; estimación del tamaño mediante la ecuación de Scherrer
FTIR	Grupos funcionales y enlaces químicos	Detección de interacciones entre la nanocelulosa y las nanopartículas metálicas; verificación de funcionalización

1.8. Instrumentación electrónica para adquisición de señales bioeléctricas (ADS1256 + AVR Mega 2560)

La detección de señales eléctricas generadas en sistemas vegetales requiere dispositivos de adquisición capaces de operar en condiciones de bajo nivel de señal, alta impedancia de entrada y entornos biológicos sensibles. Las señales de origen vegetal, como los potenciales de acción y variación inducidos por estímulos externos, suelen presentarse en el rango de los microvoltios, con duraciones de milisegundos a segundos y formas de onda no periódicas. Por ello, la elección

de componentes electrónicos adecuados para su adquisición resulta crucial para preservar la fidelidad de los registros, (figura 1.8.1).

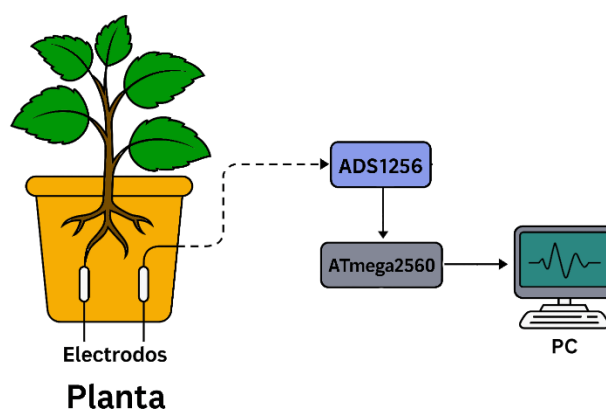


Figura 1.8.1. Arquitectura del sistema de adquisición de señales bioeléctricas in planta

En este contexto, el convertidor analógico-digital ADS1256 representa una solución óptima debido a su resolución de 24 bits, bajo ruido y capacidad de muestreo diferencial. Este ADC permite digitalizar con alta precisión señales bioeléctricas débiles, respetando la relación señal/ruido (SNR) sin requerir etapas de amplificación excesiva que pudieran distorsionar la información fisiológica. Además, su arquitectura multiproceso de entrada permite registrar varios canales simultáneamente, lo cual es ideal para el análisis espacial de señales distribuidas en diferentes regiones del sistema vegetal, (figura 1.8.2).

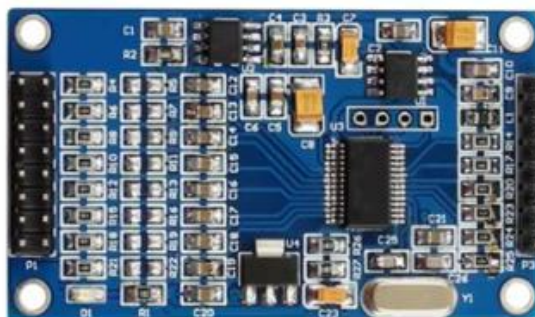


Figura 1.8.2 Módulo ADC ADS1256 de 24 bits y 8 canales de adquisición de datos de alta precisión

Como unidad de control se emplea el microcontrolador AVR Mega2560, cuya arquitectura de 8 bits y múltiples interfaces de comunicación lo convierten en un nodo intermedio eficaz entre el ADC y los entornos de procesamiento superiores. Este microcontrolador gestiona la configuración del ADS1256, sincroniza los canales de adquisición, y transmite los datos digitalizados hacia una

plataforma externa mediante protocolos estándar como SPI o UART. Su versatilidad permite integrarlo fácilmente en arquitecturas modulares, donde se requiera escalabilidad, portabilidad o compatibilidad con sensores adicionales, (figura 1.8.3).



Figura 1.8.3 Microcontrolador ATmega2560 integrado en una placa Arduino Mega.

La combinación ADS1256 + Mega2560 constituye, por tanto, una arquitectura robusta, de bajo costo y alta sensibilidad para la adquisición de señales bioeléctricas en entornos vegetales funcionalizados. Esta plataforma posibilita el análisis en tiempo real del comportamiento eléctrico vegetal inducido por nanopartículas, y se alinea con los requerimientos de un sistema biosensor de nueva generación. Para su operación, el microcontrolador ATmega2560 es programado mediante el entorno de desarrollo Arduino IDE, que permite escribir código en un lenguaje derivado de C/C++, incluyendo bibliotecas específicas para comunicación SPI, lectura de datos desde el ADC y envío vía UART. Esta programación embebida facilita la adquisición sincronizada de múltiples canales y la transmisión de datos hacia entornos superiores de visualización y análisis, complementando así la arquitectura electrónica con una interfaz de control adaptable, eficiente y reproducible.

1.8.1. Python y su aplicación en la adquisición y análisis de datos

Python es un lenguaje de programación de alto nivel ampliamente adoptado en la investigación científica y la ingeniería debido a su sintaxis clara, portabilidad multiplataforma y extensa

colección de bibliotecas especializadas. En el contexto de la instrumentación electrónica aplicada a biosensores vegetales, Python ofrece una solución flexible y escalable tanto para la adquisición de datos en tiempo real como para su posterior análisis y visualización.

Una de sus principales ventajas es la capacidad de comunicarse con microcontroladores y dispositivos de adquisición mediante interfaces como UART (a través de la biblioteca pyserial) o SPI/I²C en sistemas embebidos más avanzados. Esto permite recibir y almacenar flujos de datos provenientes de sensores, como los digitalizados por el ADC ADS1256, con configuraciones personalizadas de frecuencia de muestreo, filtrado o multiplexado.

Para el análisis de los datos adquiridos, Python cuenta con herramientas robustas como NumPy y SciPy, que permiten realizar operaciones matemáticas, estadísticas y de procesamiento de señales; Pandas, para la manipulación estructurada de datos en tiempo real; y Matplotlib o Seaborn para la visualización gráfica. Estas capacidades facilitan el estudio de señales bioeléctricas generadas por plantas funcionalizadas, permitiendo representar su comportamiento frente a estímulos, cuantificar respuestas fisiológicas y validar modelos experimentales.

En conjunto, el uso de Python como entorno de análisis complementa la arquitectura de adquisición, ya que permite construir sistemas modulares y reproducibles sin depender de software propietario. Su integración con microcontroladores, junto con su capacidad de procesamiento y visualización, lo convierte en una herramienta clave para el desarrollo de plataformas abiertas de monitoreo bioelectrónico, (figura 1.8.4).

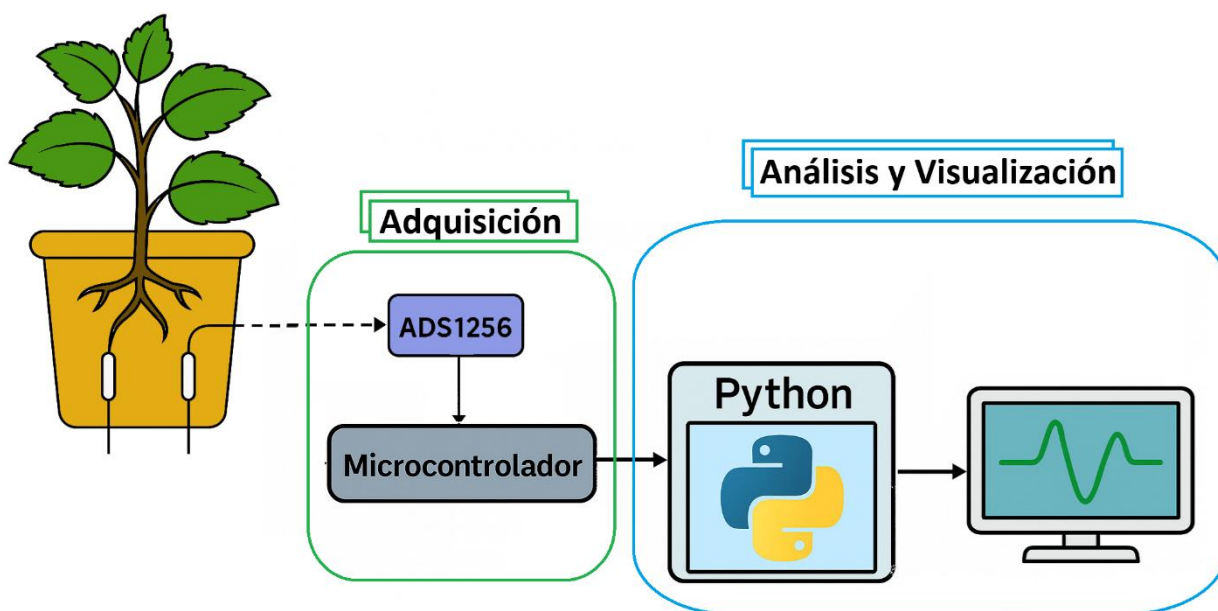


Figura 1.8.4 Flujo de adquisición y análisis de señales bioeléctricas utilizando Python

1.8.2. Instrumentación complementaria con LabVIEW y DAQ USB-6001

Además del sistema de adquisición desarrollado con el convertidor ADS1256 y el microcontrolador ATmega2560, se utilizó de forma complementaria un sistema de adquisición de datos comercial basado en LabVIEW (National Instruments) y una interfaz USB-6001. Este dispositivo DAQ cuenta con entradas analógicas de 14 bits y una velocidad de muestreo de hasta 10 kS/s, lo cual lo convierte en una herramienta útil para el registro de señales eléctricas de baja frecuencia con alta estabilidad.

Su integración en el presente estudio tuvo como propósito **comparar, validar y visualizar** de forma paralela las señales bioeléctricas adquiridas por el sistema principal, proporcionando una referencia adicional mediante una interfaz profesional y de uso extendido en entornos académicos e industriales. La programación mediante el entorno gráfico de LabVIEW permitió configurar paneles de adquisición personalizados, establecer umbrales de disparo y realizar registros temporales sin necesidad de codificación manual, lo cual fue especialmente útil en pruebas preliminares y en la validación de los canales activos de señal.

En conjunto, la utilización del DAQ USB-6001 y LabVIEW refuerza la confiabilidad de los registros obtenidos y complementa la arquitectura de adquisición propuesta, al ofrecer una herramienta de comparación útil en entornos controlados y flexibles, (*figura 1.8.5*).

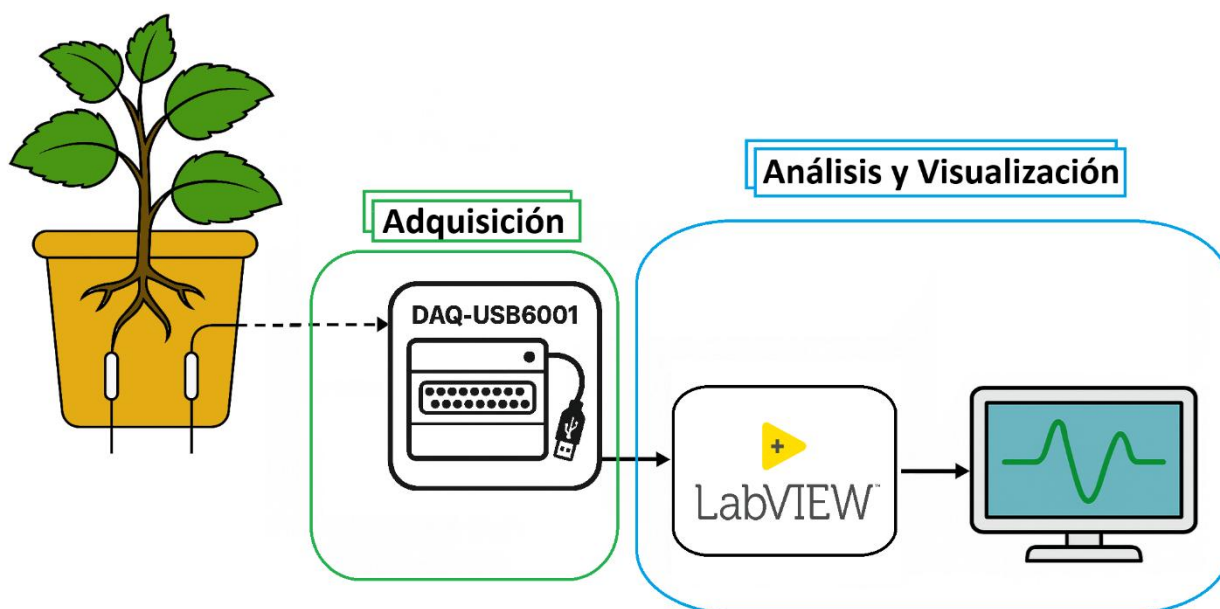


Figura 1.8.5. Diagrama del flujo de datos desde una planta sensorizada hasta la visualización de señales bioeléctricas en LabVIEW usando el sistema DAQ-USB6001.

1.9. Fundamento electroquímico: uso de potenciostato en sistemas bioelectrónicos.

La caracterización de sistemas bioelectrónicos que integran materiales conductores en organismos vegetales requiere herramientas capaces de registrar con precisión la transferencia de carga eléctrica y las propiedades de interfaz electroquímica. En este contexto, el uso de **potenciostatos/galvanostatos** permite aplicar potenciales controlados y medir la respuesta de corriente del sistema, lo cual resulta fundamental para estudiar procesos de conducción, almacenamiento o modulación de carga.

Técnicas como la **polarización lineal**, la **voltametría cíclica** o la **espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)** se utilizan ampliamente en la investigación de materiales funcionales, y han sido adaptadas para analizar la respuesta de tejidos vivos ante estímulos eléctricos. Estas metodologías permiten estimar parámetros como la resistencia interna, la capacitancia interfacial o la densidad de corriente, aportando evidencia sobre el comportamiento activo de sistemas vegetales modificados, (figura 1.9.1).



Figura 1.9.1. Potenciostato/galvanostato modelo SP-150 de Bio-Logic conectado a una celda electroquímica, empleado para la medición de corrientes y potenciales en estudios electroquímicos.

En resumen, el presente capítulo ha abordado los fundamentos teóricos relacionados con la bioelectricidad vegetal, los sistemas de adquisición y análisis de datos, así como las técnicas electroquímicas empleadas en la caracterización de señales eléctricas en sistemas vegetales funcionalizados. Estos conceptos sustentan el desarrollo experimental descrito en los capítulos posteriores.

Capítulo 2. Antecedentes

El estudio de la señalización eléctrica en plantas tiene sus raíces en investigaciones pioneras que datan del siglo XIX. En 1874, Sir John Burdon-Sanderson (Burdon Sanderson, 1873) documentó por primera vez los potenciales eléctricos generados en la *Dionaea muscipula* (Venus atrapamoscas), y años más tarde, Jagadish Chandra Bose (Tandon, 2019) estableció una relación directa entre impulsos eléctricos y movimientos en *Mimosa pudica*. Estos descubrimientos sentaron las bases para lo que hoy se conoce como electrofisiología vegetal, disciplina que ha evolucionado desde la observación empírica hasta la implementación de metodologías cuantitativas y modelos bioelectrónicos.

Diversos estudios han corroborado que las plantas responden activamente a estímulos ambientales mediante la generación de señales eléctricas. Estas señales, que incluyen potenciales de acción (PA) y potenciales de variación (PV), se propagan a través del sistema vascular, particularmente en el floema y xilema, y regulan procesos como la apertura estomática, el transporte de nutrientes, el crecimiento y la respuesta al estrés. Investigaciones contemporáneas han demostrado que estas respuestas eléctricas pueden correlacionarse con variables fisiológicas críticas, tales como la hidratación del tejido, la actividad fotosintética y la interacción con factores abióticos y bióticos (Cseresnyés et al., 2016; Fromm & Lautner, 2007).

En paralelo al avance en fisiología vegetal, la instrumentación científica ha experimentado una notable evolución. La aplicación de técnicas como la espectroscopía de impedancia eléctrica (EIE), la voltametría cíclica (CV), la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y el uso de potencióstatos/galvanostatos ha permitido caracterizar con alta precisión el comportamiento electroquímico de tejidos vivos. Estas herramientas se han adaptado a sistemas vegetales funcionalizados para cuantificar la resistencia interna, la capacitancia interfacial y la eficiencia en la transferencia de carga (Masarovicová & Králová, 2013; Stavrinidou et al., 2015). Simultáneamente, el desarrollo de plataformas de adquisición de datos ha permitido registrar señales bioeléctricas con una resolución sin precedentes. Sistemas como el ADS1256, en conjunto con microcontroladores como el AVR Mega2560, han demostrado ser soluciones de bajo costo y alta sensibilidad para el monitoreo de señales de microvoltios. Asimismo, plataformas comerciales como LabVIEW y la interfaz DAQ USB-6001 han sido empleadas en investigaciones comparativas, brindando entornos robustos para el análisis en tiempo real.

En cuanto a los materiales funcionales, las nanopartículas metálicas —en especial las de plata (AgNPs)— han cobrado protagonismo en la interfaz planta-dispositivo. Estas estructuras

nanométricas poseen propiedades eléctricas, ópticas y antimicrobianas que las hacen ideales para la fabricación de sensores, electrodos y dispositivos de conducción *in situ*. Investigaciones recientes han demostrado que al integrar nanopartículas de Ag/AgCl en matrices biocompatibles como la nanocelulosa, es posible aumentar la conductividad vascular de la planta sin inducir toxicidad significativa (Masarovicová & Králová, 2013; Stavrinidou et al., 2017).

Particularmente, estudios como los de Stavrinidou et al. (Stavrinidou et al., 2015, 2017) y Ouyang et al. (Ouyang et al., 2014) han demostrado la factibilidad de integrar redes conductoras en plantas vivas mediante técnicas de infiltración, microinyección o electropolimerización. Estas estrategias han permitido la formación de interfaces bioelectrónicas estables, que no solo registran señales fisiológicas, sino que también permiten la estimulación externa del tejido vegetal.

Sin embargo, persisten desafíos en la consolidación de estas plataformas: la compatibilidad a largo plazo, la uniformidad en la distribución del material conductor, la integración estable en el sistema vascular y la validación funcional bajo condiciones reales de campo. Además, la mayoría de los estudios se han limitado a prototipos de laboratorio sin considerar la escalabilidad ni los impactos bioéticos de liberar nanomateriales en entornos agrícolas. En este contexto, la presente investigación se propone avanzar en el diseño y validación de un sistema biosensor funcional basado en plantas aumentadas. Mediante la incorporación de nanopartículas de Ag/AgCl (10% wt) soportadas en una matriz de nanocelulosa, se busca mejorar la conducción interna de señales en *Epipremnum aureum*, una especie vegetal seleccionada por su adaptabilidad y robustez. Esta plataforma permitirá analizar la respuesta bioeléctrica inducida por estímulos controlados, utilizando tanto instrumentación personalizada (ADS1256 + Mega2560 + Python) como sistemas de referencia (DAQ USB-6001 + LabVIEW), en conjunto con técnicas de caracterización estructural (SEM, EDX, FTIR, DRX).

Este trabajo se sitúa así en la intersección de la nanotecnología, la bioelectrónica vegetal y la ingeniería ambiental, y responde a la necesidad de desarrollar tecnologías sostenibles para el monitoreo de variables ambientales en tiempo real. Al aprovechar la capacidad sensorial intrínseca de las plantas, se abre una nueva vía para la creación de interfaces biohíbridas, sostenibles, precisas y funcionalmente activas.

Capítulo 3. Metodología experimental

Este capítulo expone de manera sistemática y detallada los procedimientos experimentales empleados para el diseño, desarrollo y validación de un sistema biosensor basado en plantas funcionalizadas con nanopartículas de plata y cloruro de plata (Ag/AgCl) soportadas en una matriz de nanocelulosa. La metodología se estructuró con el objetivo de establecer una plataforma capaz de registrar y analizar en tiempo real las variaciones en las señales bioeléctricas inducidas por factores externos, evaluando su potencial como herramienta de monitoreo ambiental y diagnóstico funcional.

El enfoque experimental adoptado integra diversas disciplinas, incluyendo la síntesis y caracterización de nanomateriales, la fisiología vegetal, la electrónica aplicada a la adquisición de señales de bajo voltaje, así como el procesamiento de datos mediante algoritmos de inteligencia artificial. Esta integración multidisciplinaria permite establecer una correlación entre la funcionalización nanométrica de los sistemas biológicos y su respuesta eléctrica, mediante un análisis cuantitativo y controlado.

La organización cronológica del presente capítulo permite describir de manera coherente cada una de las fases experimentales, desde la preparación del nanomaterial y su caracterización fisicoquímica, hasta su aplicación en organismos vegetales vivos, el diseño del sistema de medición, la adquisición y procesamiento de los datos, y la posterior validación del desempeño del sistema propuesto.

3.1. Síntesis del nanomaterial funcionalizante (NPs Ag/AgCl sobre nanocelulosa)

La síntesis del nanomaterial funcionalizante se realizó mediante una reacción en un solo paso (*one-step synthesis*) que permitió la incorporación simultánea de nanopartículas de plata y cloruro de plata (Ag/AgCl) en una matriz de nanofibras de celulosa (CNFs). Esta metodología fue adaptada del protocolo propuesto por Macclesh del Pino Pérez et al. (2021) (Macclesh del Pino Pérez et al., 2021), cuya eficiencia ha sido validada en aplicaciones electroquímicas y de almacenamiento energético.

El proceso se inició con la preparación de una suspensión acuosa de α -celulosa (50 μm , Sigma Aldrich), agregando 1 g del polímero a 100 mL de agua desionizada. Posteriormente, se incorporó bromuro de sodio (NaBr, 99%) en una relación 1:0.1 con respecto a la masa de celulosa, seguido por la adición de 16 mg del radical libre 2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxilo (TEMPO), actuando como agente catalítico en el proceso de oxidación selectiva de los grupos hidroxilo primarios del carbono C6 de la glucosa.

Para iniciar la incorporación metálica, se disolvieron 10 mL de nitrato de plata (AgNO_3 , 99%) en agua desionizada tipo I (resistividad $\geq 18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$), añadiéndose a la suspensión bajo agitación constante. La reacción de oxidación fue iniciada mediante la incorporación de 15 mL de hipoclorito de sodio (NaOCl, 6–9%), ajustando progresivamente el pH a 10 mediante adición controlada de hidróxido de sodio (NaOH 0.5 M). La estabilización del pH durante el proceso se vigiló con un potenciómetro digital.

Durante las primeras horas de la reacción, se evidenció un cambio cromático progresivo de blanco lechoso a violeta intenso, lo que sirvió como indicio visual de la formación de estructuras cúbicas de Ag/AgCl. La mezcla fue mantenida en agitación por 24 horas a temperatura ambiente.

Finalizado este periodo, el nanocompuesto fue sometido a un proceso de purificación por centrifugación (2500 rpm durante 10 minutos), utilizando una mezcla etanol: agua desionizada (2:1 v/v). Este proceso se repitió hasta alcanzar pH neutro (pH 7). El producto resultante fue almacenado en condiciones estériles para su posterior uso en las pruebas de funcionalización vegetal, (*figura 3.1.1*).

Las propiedades nanométricas del material sintetizado fueron verificadas mediante análisis de microscopia electrónica de barrido ambiental (ESEM) y espectroscopía de dispersión de rayos X (EDX), los cuales confirmaron la distribución homogénea de las nanopartículas dentro de la matriz celulósica y la formación de estructuras cúbicas características de Ag/AgCl, (Merino-Treviño et al., 2024).

Este enfoque de síntesis *in situ*, además de ser eficiente y reproducible, permite una fuerte interacción química entre las especies metálicas y los grupos funcionales de la celulosa oxidada, otorgando al material propiedades eléctricas estables y adecuadas para su integración en sistemas bioelectroquímicos basados en plantas.

Diagrama de flujo de la síntesis in situ en un solo paso de nanopartículas de Ag/AgCl soportadas por nanocelulosa.

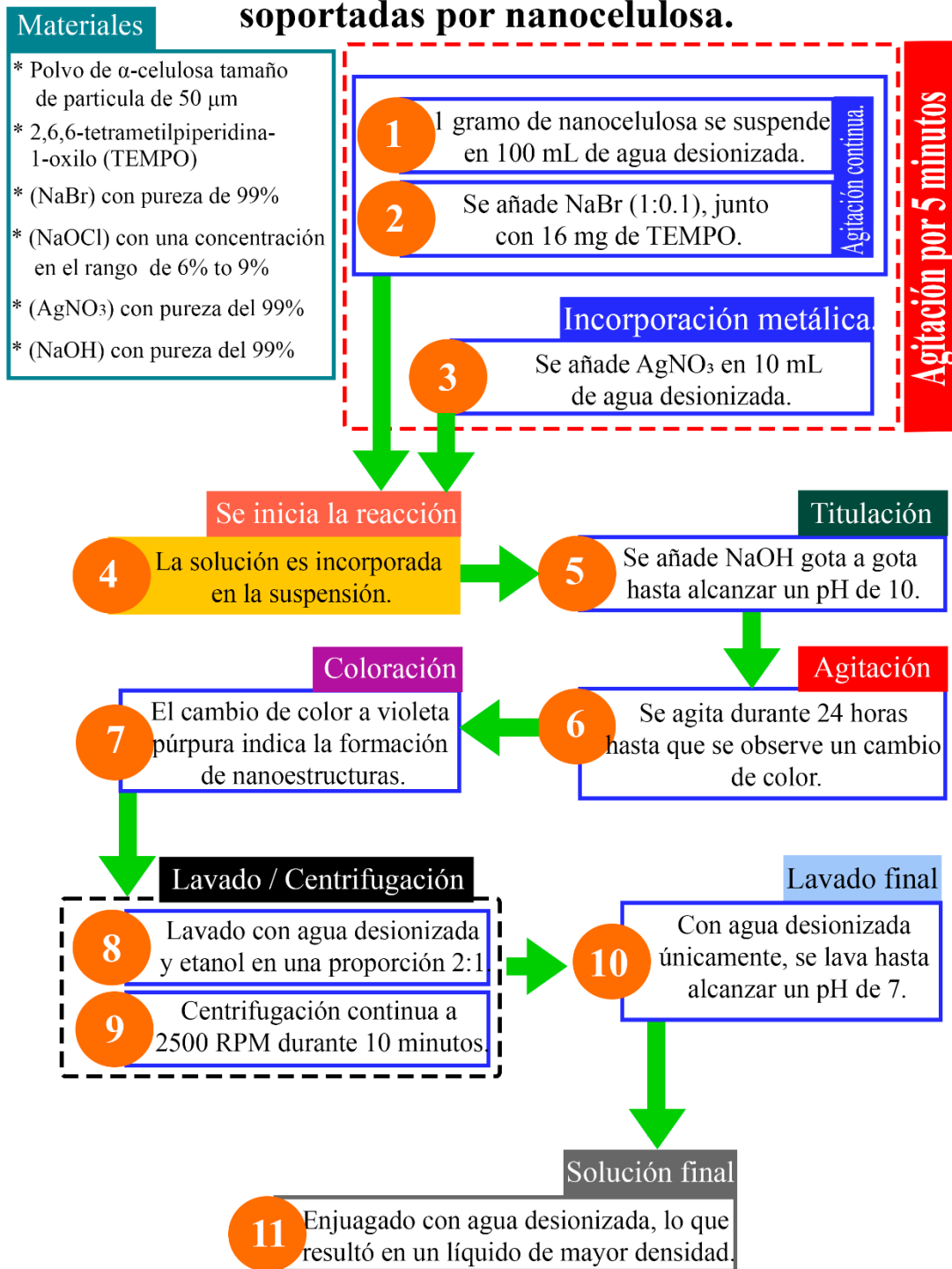


Figura 3.1.1 Síntesis de nanopartículas Ag/AgCl, metodología (Macclesh del Pino Pérez et al., 2021)

3.2. Formación de vías conductoras de nanopartículas de plata (AgNPs) en el xilema y floema de la planta especie *Epipremnum aureum*.

Con el fin de evaluar el comportamiento electrofisiológico de un sistema vegetal funcionalizado, se seleccionó la especie *Epipremnum aureum* (conocida comúnmente como potus), debido a su notable adaptabilidad, resistencia a condiciones adversas y facilidad de propagación. Esta planta fue utilizada como organismo modelo para estudiar la incorporación de nanopartículas de plata y su efecto sobre la conducción eléctrica en tejidos vasculares.

Dos poblaciones experimentales fueron establecidas: un grupo control sin nanopartículas (testigo) y un grupo funcionalizado, al cual se le aplicaron nanopartículas de Ag/AgCl sintetizadas según el protocolo descrito en el apartado anterior. La aplicación se realizó mediante inmersión radicular en la suspensión acuosa de nanopartículas al 10 % en peso, durante un periodo continuo de 12 semanas, bajo condiciones ambientales controladas (humedad relativa de 73 % y temperatura constante de 30 °C) (figura 3.2.1.)

Este procedimiento intencional permitió evaluar los efectos del nanomaterial sobre la conductividad interna del sistema vascular, constituyendo una etapa clave del estudio. (figura 3.2.2.)



Figura 3.2.1 *Epipremnum aureum* a) con luz artificial (1) con AgNPs 10% wt, (2) especie testigo. b) sin luz artificial (3) con AgNPs 10% wt, (4) especie testigo.

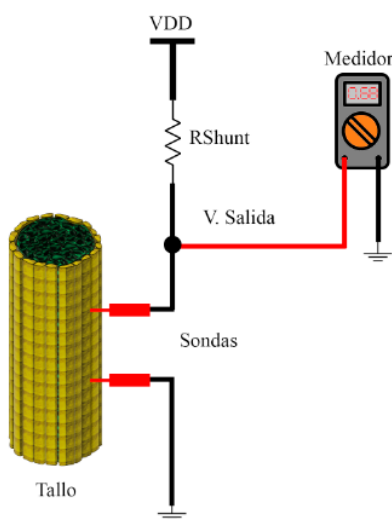


Figura 3.2.2 Esquema del sistema de medición de conductividad en el tallo vegetal.

Durante el periodo de exposición, se buscó favorecer la absorción natural del nanomaterial por las raíces, aprovechando los mecanismos fisiológicos de la planta para el transporte de nutrientes. Las nanopartículas fueron progresivamente translocadas a través del sistema vascular (xilema y floema), formando una red de conducción interna observable tanto morfológica como eléctricamente.

Al concluir el periodo de exposición, se llevaron a cabo inserciones de microelectrodos conductoras fabricadas con acero inoxidable de grado quirúrgico en las regiones de raíz, tallo y hoja de las plantas funcionalizadas. Las sondas fueron colocadas a una profundidad de 2 mm y con una separación de 1 cm entre ellas, directamente en el tejido vascular, permitiendo establecer contacto eléctrico con los canales internos de conducción formados por la distribución de las nanopartículas de Ag/AgCl. Esta disposición fue diseñada para garantizar una lectura estable y reproducible del potencial eléctrico generado a lo largo del sistema vascular funcionalizado, (figura 3.2.3.).

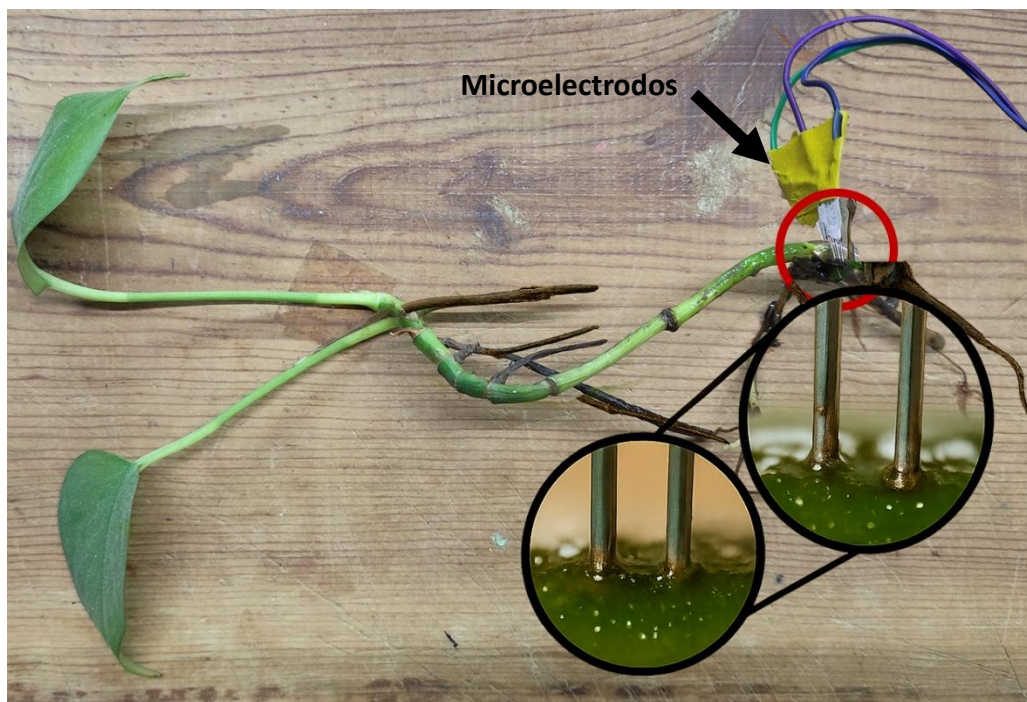


Figura 3.2.3 Inserción de microelectrodos en tejido vascular de Epipremnum aureum para registro eléctrico.

Esta disposición experimental permitió verificar la existencia de una vía conductora continua, generada por el depósito interno y distribuido de nanopartículas de Ag/AgCl en la red de vasos y traqueidas del sistema vascular. La interacción directa de los microelectrodos con el tejido permitió medir variaciones de potencial eléctrico atribuibles a la presencia del nanomaterial. Esta hipótesis fue posteriormente confirmada mediante análisis de microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDX), los cuales revelaron la presencia homogénea de las nanopartículas en las estructuras vasculares (*figura 3.2.4*).

Los resultados obtenidos sugieren que el nanomaterial se integró de manera efectiva en la red vascular de la planta, favoreciendo la formación de una arquitectura interna con capacidad para facilitar el transporte de carga eléctrica (iónica y electrónica). Esta observación concuerda con estudios previos donde se ha reportado que la incorporación de nanopartículas metálicas en matrices celulósicas puede generar estructuras con propiedades electroconductoras, sin afectar negativamente la morfología general del sistema vegetal (Macclesh del Pino Pérez et al., 2021) .

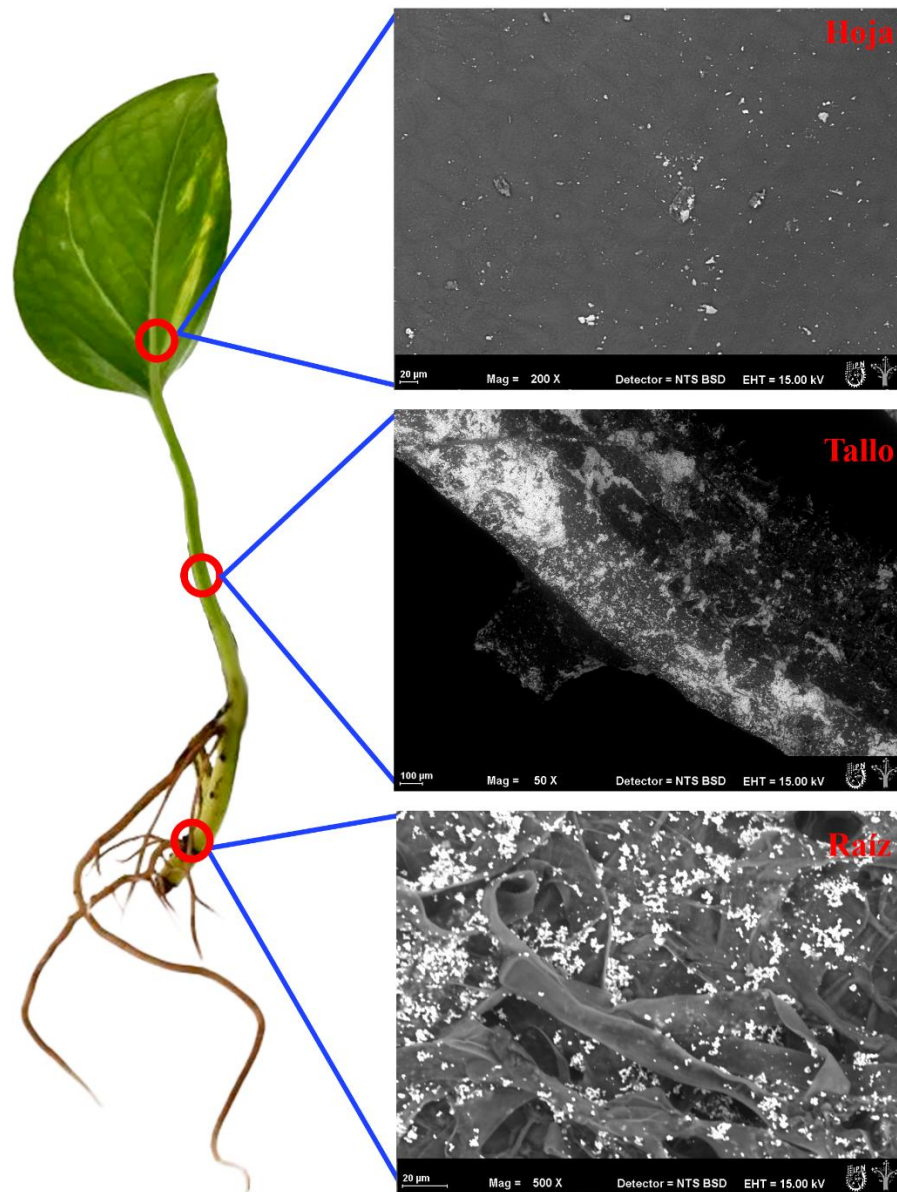


Figura 3.2.4 Distribución de nanopartículas de Ag/AgCl en tejidos vasculares de *Epipremnum aureum*.

3.3. Construcción de los microelectrodos

Para llevar a cabo la caracterización eléctrica del sistema vegetal funcionalizado, se diseñaron y construyeron microelectrodos específicos, adaptados a las dimensiones y características morfofisiológicas de la planta *Epipremnum aureum*. Los criterios de diseño incluyeron compatibilidad biológica, resistencia a la humedad, estabilidad estructural y mínima invasividad en los tejidos.

Los microelectrodos fueron fabricados a partir de alambre de acero inoxidable de grado quirúrgico, con un diámetro de 0.30 mm, por sus propiedades de resistencia mecánica, conductividad y tolerancia a ambientes húmedos sin corrosión significativa. Cada alambre fue cortado en segmentos de 3 cm y pulido en sus extremos activos para garantizar una interfaz limpia y homogénea de contacto eléctrico con el tejido vegetal.

El ensamblaje de los pares de microelectrodos se realizó utilizando una base rígida de soporte, fijando su posición mediante resina epóxica bicomponente, la cual permitió mantener la geometría deseada sin desplazamientos durante la inserción o el registro. En la etapa inicial del diseño, se experimentó con separaciones de 1 mm entre sondas; sin embargo, se observó que esta configuración generaba mayor ruido de fondo y posibles interferencias por proximidad entre campos eléctricos. Tras una serie de pruebas comparativas, se estableció que una separación de 1 cm ofrecía una mejor relación señal/ruido, mayor reproducibilidad y menor capacitancia parasitaria, por lo cual fue adoptada para las mediciones finales (*figura 3.3.1*).

La profundidad de inserción de los electrodos en el tejido vegetal se fijó en 2 mm, permitiendo un contacto efectivo con el sistema vascular (principalmente xilema), sin comprometer la integridad estructural del órgano vegetal ni interferir con su transporte interno de savia (*figura 3.3.2*). Finalmente, los extremos opuestos de los electrodos se conectaron mediante cables a la tarjeta de adquisición de datos, asegurando una disposición que reduce al mínimo las interferencias electromagnéticas externas.

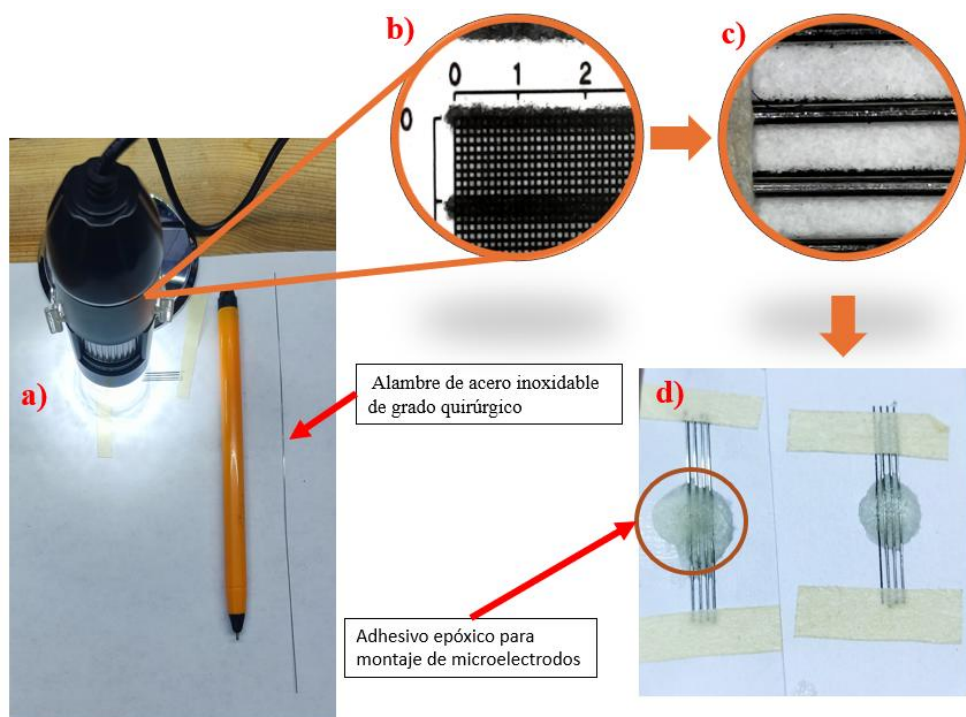


Figura 3.3.1. Proceso de construcción de microelectrodos. a) Vista general del equipo de inspección y del alambre de acero inoxidable de grado quirúrgico. b) y c) Alineación y separación de 1 mm entre electrodos. d) Montaje final con adhesivo epóxico para fijación y encapsulado.

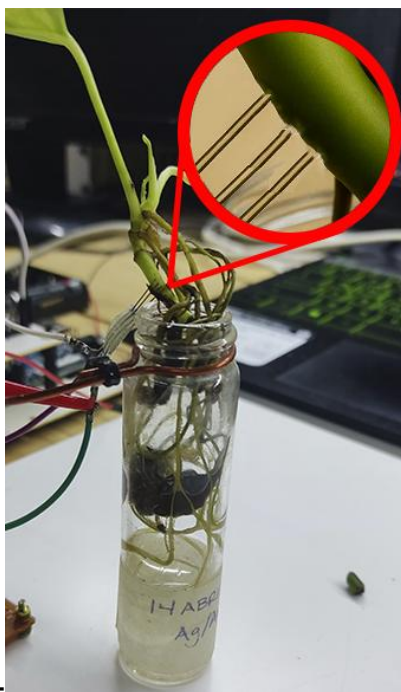


Figura 3.3.2 Inserción de microelectrodos en tejido vegetal a 2 mm de profundidad para contacto con el sistema vascular sin afectar su integridad.

3.4. Sistema de adquisición de datos y configuración para mediciones eléctricas

Para el registro de señales bioeléctricas generadas en plantas funcionalizadas con nanopartículas de Ag/AgCl, se desarrolló un sistema de adquisición de datos de alta sensibilidad, capaz de captar variaciones de potencial en el rango de microvoltios. La arquitectura del sistema estuvo conformada por un microcontrolador AVR Mega2560, conectado a un convertidor analógico-digital ADS1256, operando en modo diferencial con resolución de 24 bits. El sistema fue programado para adquirir señales a una frecuencia constante de 10 muestras por segundo, generando por sesión un total de aproximadamente 700 datos por canal, cantidad utilizada para los análisis estadísticos de comparación, incluyendo la prueba de Wilcoxon, (figura 3.4.1), donde se presenta el sistema físico implementado.

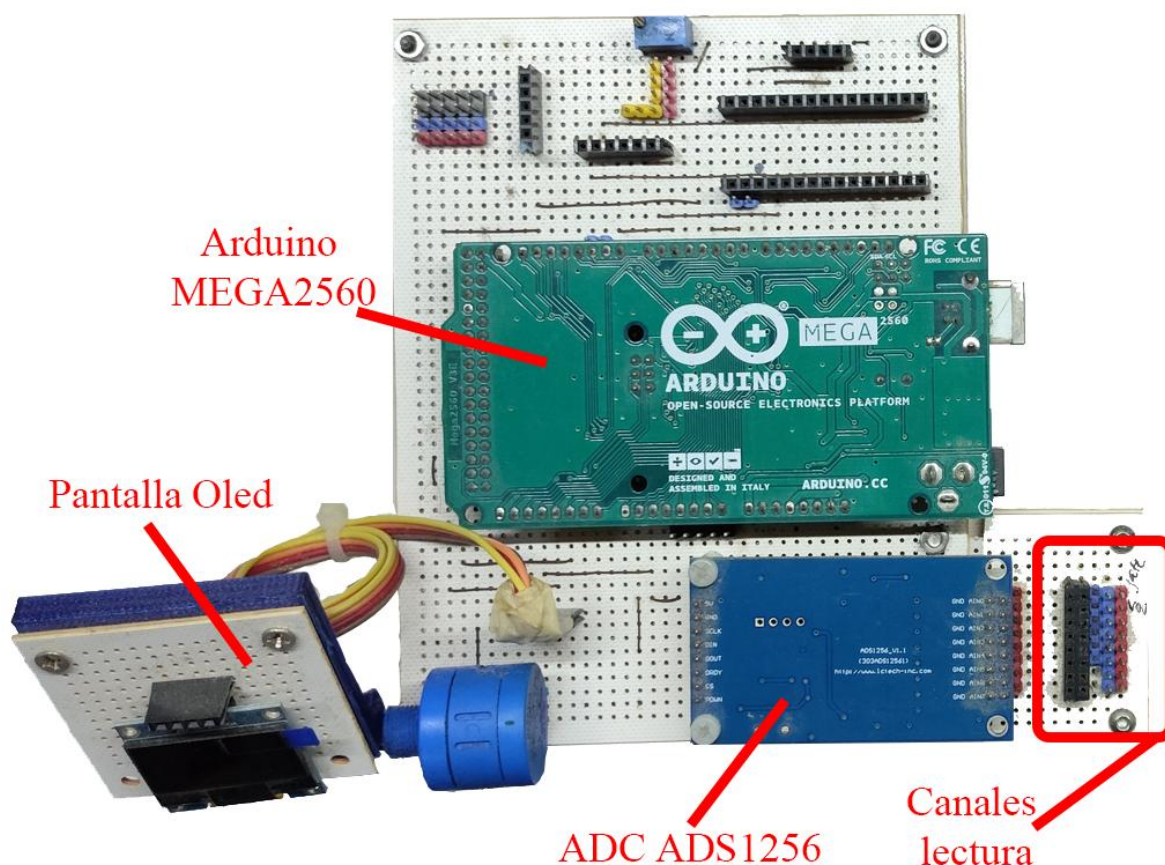


Figura 3.4.1 Montaje del sistema de adquisición de datos basado en microcontrolador Mega2560 y ADC ADS1256.

La adquisición y visualización de los datos se realizaron de manera paralela utilizando tres entornos de desarrollo: LabVIEW 2023, (figuras 3.4.2 y 3.4.3), para graficar en tiempo real; Python 3.8, mediante librerías como: *pyserial*, *numpy* y *matplotlib*, para el manejo y procesamiento

automatizado de los datos, (figura 3.4.4, y MATLAB R2022a, utilizado para generar gráficas adicionales, realizar análisis estadísticos, y validar los resultados obtenidos en los otros entornos.

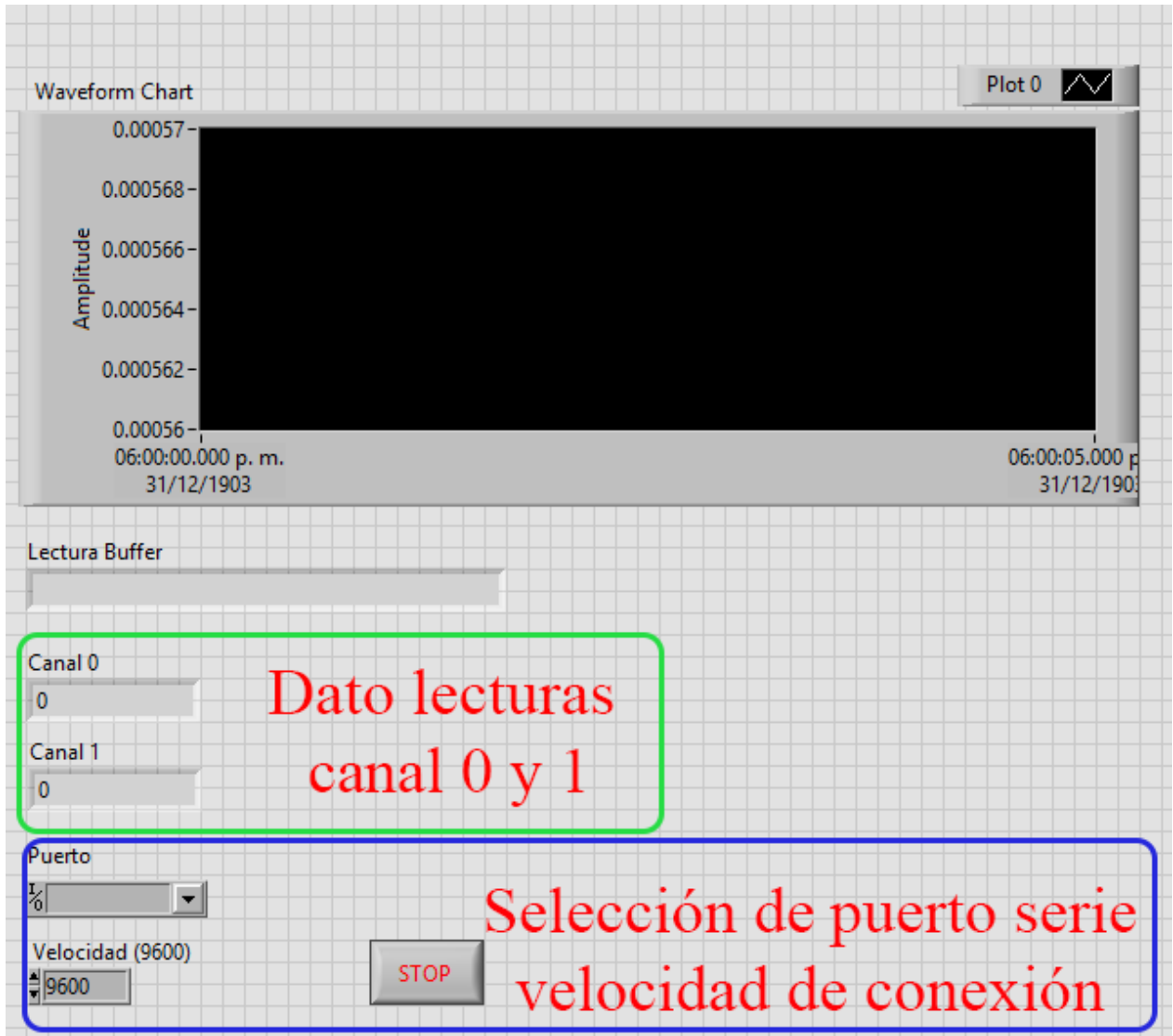


Figura 3.4.2 Interfaz de LabVIEW para adquisición serial y monitoreo gráfico de señales bioeléctricas en tiempo real.

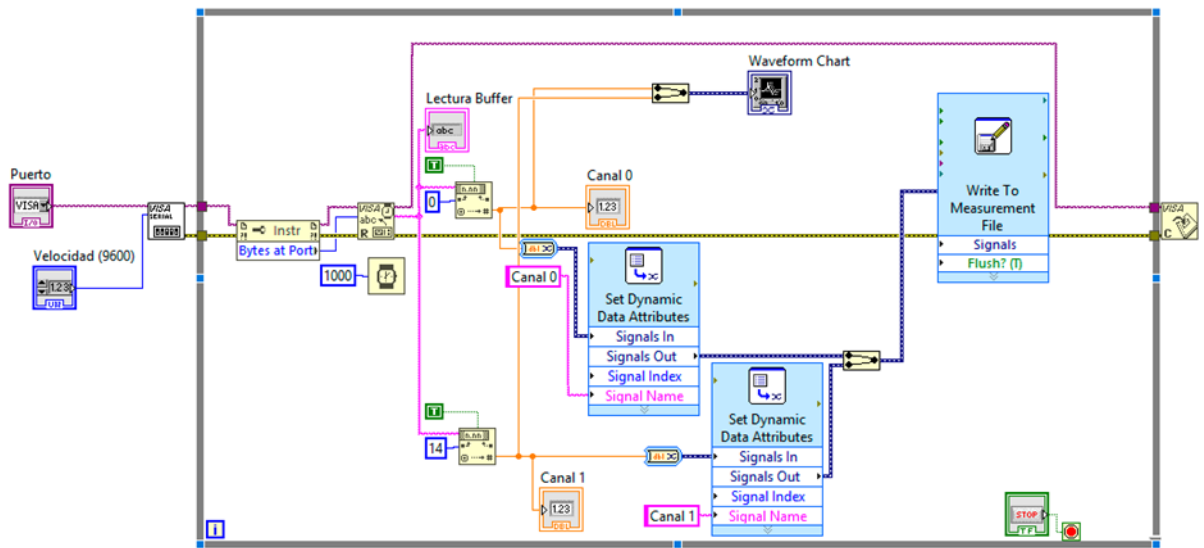


Figura 3.4.3 Diagrama de bloques del sistema de adquisición de señales bioeléctricas en LabVIEW

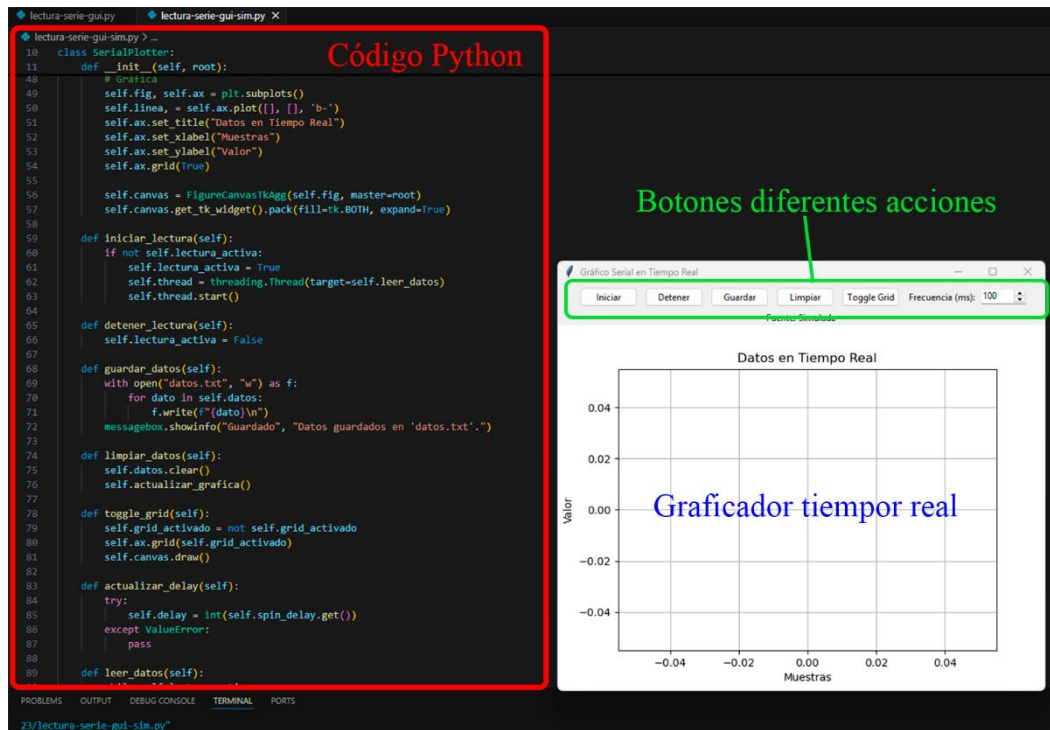


Figura 3.4.4 Interfaz gráfica y código en Python para la adquisición y graficación en tiempo real de señales bioeléctricas.

Se integró además un sensor digital de temperatura de la marca Texas Instruments, modelo DS18B20, conectado mediante el protocolo OneWire, el cual permite la comunicación de datos y alimentación a través de un solo conductor. Este sensor se utilizó con el objetivo de monitorear la

temperatura en la región cercana a la inserción de los electrodos. Este dato fue registrado simultáneamente con el potencial eléctrico, con la intención de explorar la correlación entre temperatura y respuesta eléctrica, como base para el desarrollo de un biosensor vegetal de temperatura., (figura 3.4.5).

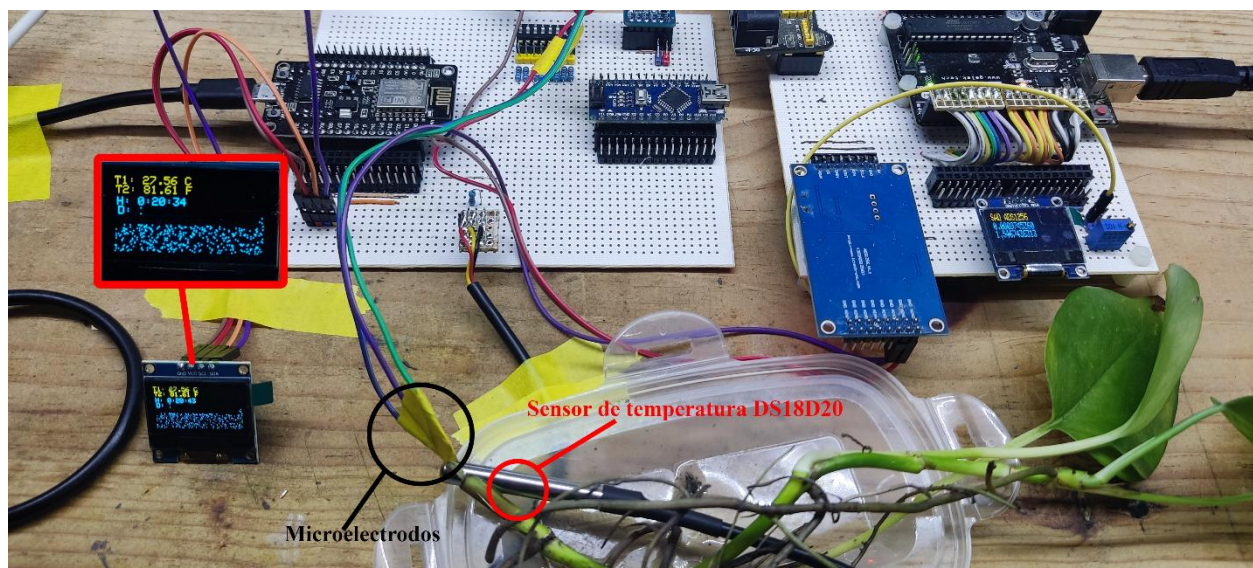


Figura 3.4.5 Montaje experimental con sistema de adquisición, sensor de temperatura y microelectrodos integrados en planta funcionalizada.

Complementariamente, se realizaron análisis electroquímicos activos mediante un potenciostato-galvanostato BioLogic SP-150, con el cual se aplicó un barrido de voltaje de -1.5 V a $+1.5\text{ V}$, utilizando una velocidad de escaneo constante de 15 mV/s . Este procedimiento permitió obtener curvas de corriente versus potencial, útiles para analizar procesos redox en el tejido vegetal funcionalizado y evaluar la presencia de rutas conductoras activas inducidas por el nanomaterial.

Todas las conexiones entre microelectrodos y el sistema de adquisición se realizaron utilizando cables blindados, reduciendo interferencias del entorno. Las sesiones experimentales se realizaron bajo condiciones controladas y duración limitada, y permitieron detectar diferencias reproducibles en el comportamiento eléctrico entre plantas funcionalizadas y controles, confirmando la viabilidad del sistema como herramienta de monitoreo bioeléctrico.

3.5. Caracterización eléctrica de la vía conductora en el xilema

Con el objetivo de verificar la formación de una vía conductora interna inducida por la incorporación de nanopartículas de Ag/AgCl en el sistema vascular de *Epipremnum aureum*, se implementó un protocolo experimental que combinó técnicas de medición eléctrica, validación estadística y análisis electroquímico.

Las muestras correspondientes a distintas zonas de la planta (*Epipremnum aureum*) —raíz, tallo y hojas— fueron ensambladas en una celda electroquímica personalizada, diseñada para establecer un entorno experimental controlado que permitiera la caracterización eléctrica in vivo del sistema vascular funcionalizado. La celda fue modelada digitalmente mediante Autodesk Fusion 360, una plataforma profesional de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) que posibilita la creación precisa de geometrías tridimensionales, optimizadas para aplicaciones experimentales en ingeniería y ciencia de materiales. (figura 3.5.1).

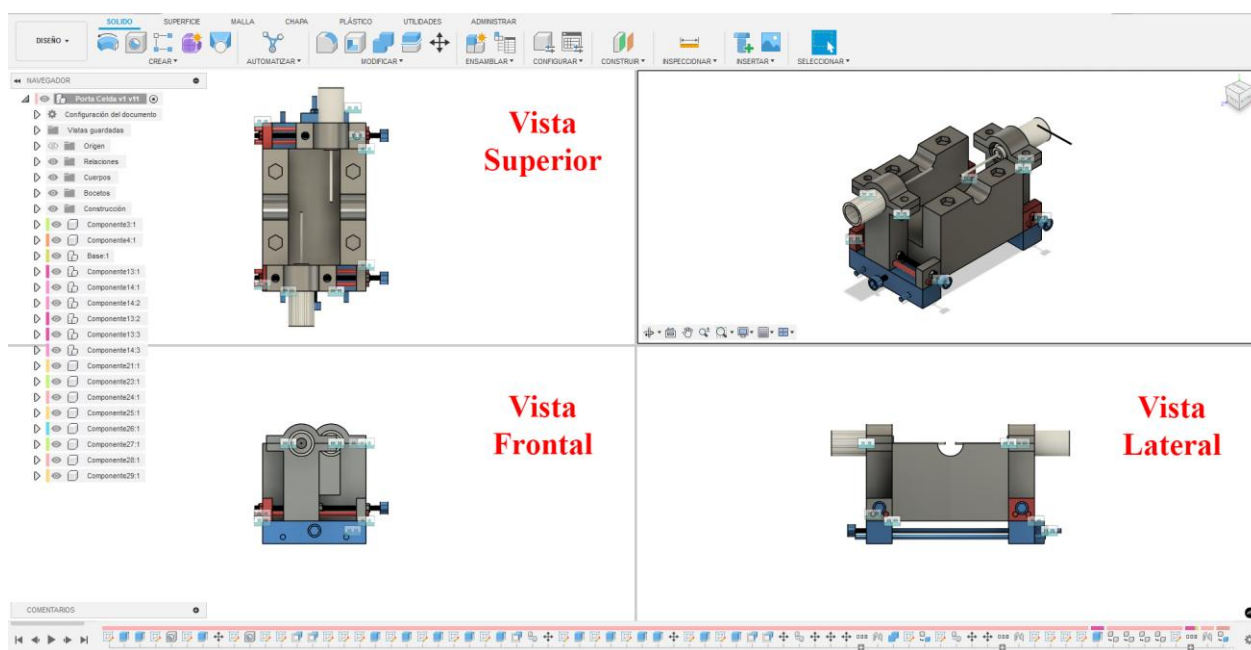


Figura 3.5.1 Modelo tridimensional de la celda electroquímica personalizada diseñada en Autodesk Fusion 360.

El uso de herramientas CAD permitió considerar desde la etapa de diseño aspectos clave para la operación experimental, tales como la alineación exacta de las sondas, la fijación estable de las muestras vegetales y la compatibilidad con los sistemas de adquisición de datos. El modelo final se construyó como un sistema modular, de fácil ensamblaje y desmontaje, con tolerancias

mecánicas ajustadas que aseguraron una manipulación precisa sin comprometer la integridad del tejido vegetal ni la continuidad eléctrica durante los ensayos (*figura 3.5.2*).

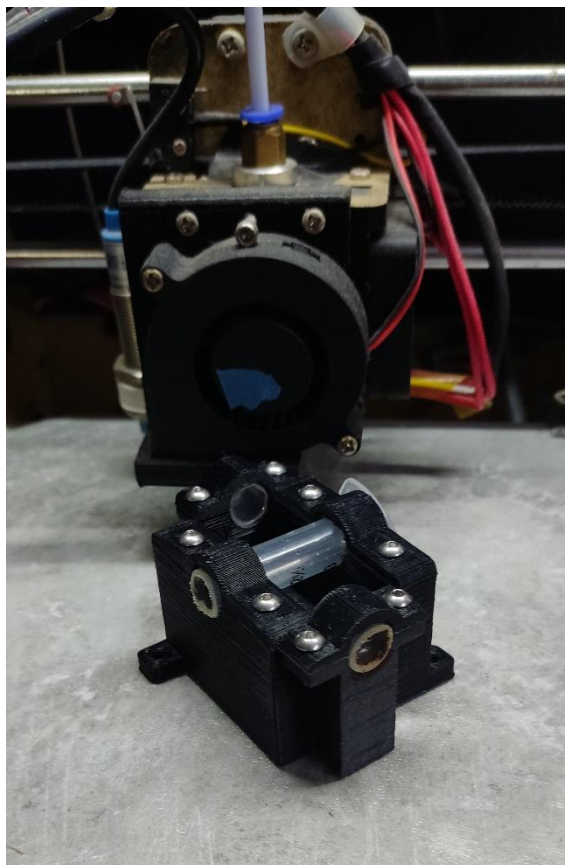


Figura 3.5.2 Fabricación de la celda electroquímica personalizada mediante impresión 3D.

La celda fue equipada con soportes ajustables que facilitaron el posicionamiento milimétrico de sondas de acero inoxidable de grado quirúrgico ($\varnothing = 0.30$ mm), las cuales fueron cuidadosamente insertadas hasta una profundidad de 2 mm en las estructuras conductoras del vegetal (*figura 3.5.3*). La orientación de las sondas fue diseñada para penetrar transversalmente el tejido hasta contactar directamente con las traqueidas y vasos del xilema, en las cuales, de acuerdo con observaciones estructurales previas, se presumía la formación de rutas conductoras continuas inducidas por la distribución de nanopartículas de plata (Ag/AgCl).

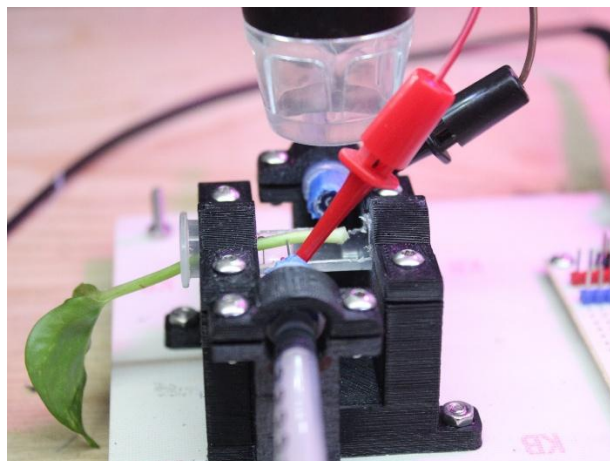


Figura 3.5.3 *Montaje experimental para caracterización eléctrica in vivo del sistema vascular vegetal.*

Esta configuración permitió establecer puntos de medición eléctrica estables y reproducibles, bajo condiciones que preservaban tanto la estructura física del organismo vegetal como la fidelidad de los registros de voltaje y corriente. La implementación del diseño CAD en esta etapa experimental resultó fundamental para garantizar la exactitud geométrica y funcional del sistema, elevando el rigor metodológico de la caracterización de la vía conductora en el tejido vascular funcionalizado. Las mediciones se llevaron a cabo en tres puntos estratégicos a lo largo del eje longitudinal del organismo vegetal, denominados D1 (raíz-tallo) y D2 (tallo-hojas), separados por una distancia fija de 5 cm entre zonas. Las sondas E1, E2 y E3 fueron dispuestas con un intervalo de 1 cm entre sí (Figura 3.5.4), lo que permitió realizar comparaciones espaciales de la señal eléctrica generada por el sistema conductor vegetal. Esta configuración permitió evaluar no solo la existencia de conducción, sino su continuidad y estabilidad en diferentes tramos de la planta.

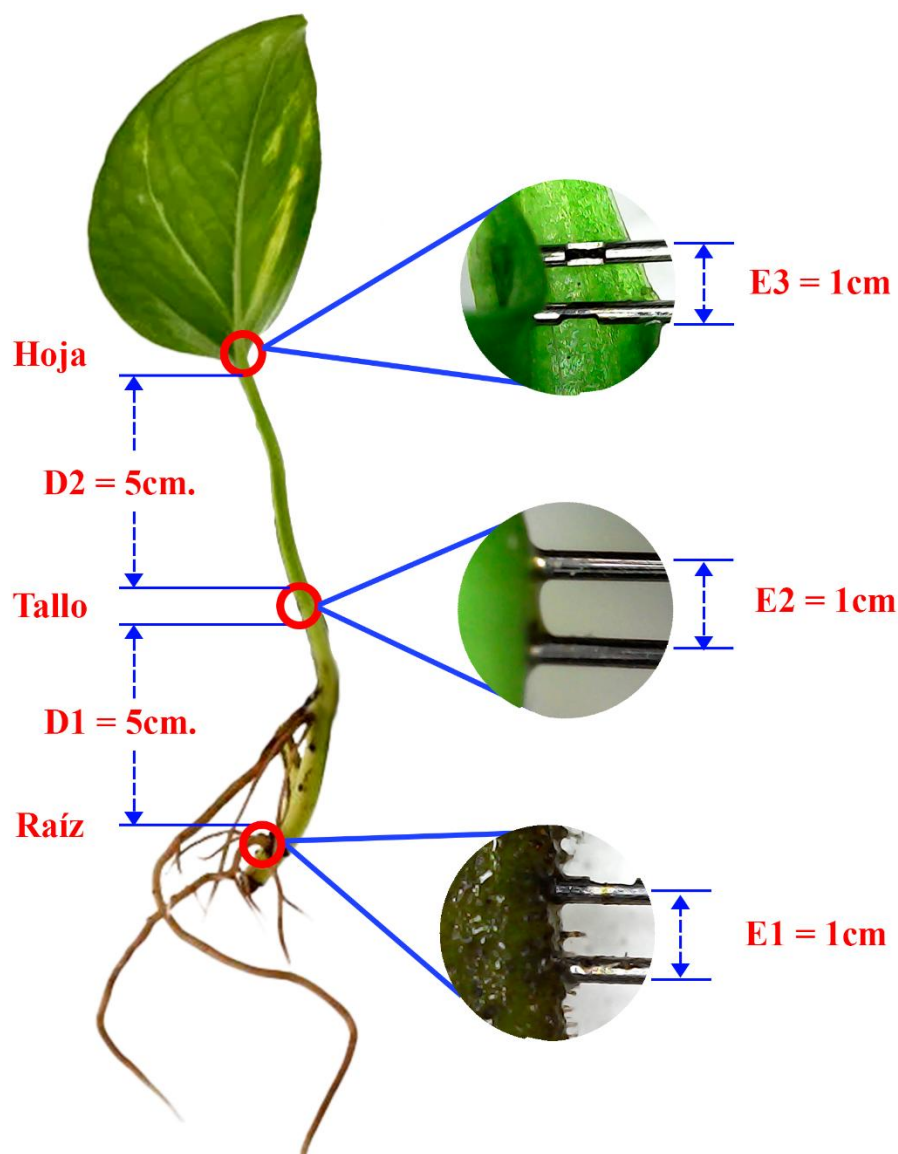


Figura 3.5.4 Distribución de microelectrodos y zonas de medición en *Epipremnum aureum*.

El sistema experimental se conectó a la tarjeta de adquisición de datos desarrollada en este proyecto, compuesta por un microcontrolador Mega2560 y un convertidor analógico-digital ADS1256 de 24 bits, configurado en modo diferencial. La adquisición de señales se realizó a una frecuencia de 10 muestras por segundo, permitiendo capturar el potencial eléctrico generado entre las zonas de medición D1 (raíz-tallo) y D2 (tallo-hoja). Los datos obtenidos fueron procesados posteriormente mediante algoritmos de análisis digital y estadístico implementados en Python y MATLAB, a fin de identificar patrones de respuesta eléctrica consistentes en las muestras funcionalizadas.

De manera complementaria, se implementó una validación electroquímica utilizando un potenciostato/galvanostato BioLogic SP-150, con el cual se aplicaron barridos de voltaje en el rango de -1.5 V a $+1.5\text{ V}$, a una velocidad de escaneo constante de 15 mV/s . Estas pruebas se realizaron siguiendo las prácticas estandarizadas en caracterización electroquímica, apoyadas en las directrices metodológicas descritas por Bard y Faulkner (2001) (Bard & Faulkner, 2001), ampliamente reconocidas como referencia internacional en el área de electroquímica moderna. En particular, se consideraron aspectos como:

- a selección adecuada de la celda electroquímica, priorizando materiales inertes y resistentes a la corrosión, y la correcta geometría de los compartimientos experimentales para asegurar una distribución uniforme del campo eléctrico.
- La limpieza y preparación de electrodos, incluyendo procedimientos de pulido y lavado electroquímico, con el objetivo de eliminar contaminantes y lograr reproducibilidad en las respuestas redox.
- La definición de la velocidad de barrido y el rango de potenciales, ajustados experimentalmente a 15 mV/s y -1.5 V a $+1.5\text{ V}$ respectivamente, para equilibrar la resolución temporal y la estabilidad del sistema.
- El control de la temperatura de trabajo y las condiciones ambientales, manteniendo el sistema bajo condiciones controladas de laboratorio para minimizar las fuentes de variación experimental.
- El tratamiento de los datos obtenidos, incluyendo el análisis de curvas voltamétricas, la identificación de picos redox y la interpretación de la respuesta eléctrica considerando correcciones de base y desplazamientos de potencial.

Este enfoque metodológico aseguró la reproducibilidad y la comparabilidad de los datos obtenidos, permitiendo contrastar la respuesta eléctrica del sistema funcionalizado con la de las muestras testigo, y así determinar la presencia de rutas de conducción activa.

Para evaluar la significancia estadística de las variaciones de potencial eléctrico entre los puntos D1 y D2, se aplicó la prueba no paramétrica de rango con signo de Wilcoxon, utilizando un nivel de significancia del 5 %. Esta prueba fue seleccionada debido a la naturaleza no normal de los datos obtenidos, asegurando así una interpretación robusta y confiable de las diferencias detectadas.

Finalmente, se utilizaron las mediciones de las plantas testigo como referencia experimental para establecer la ausencia de rutas conductoras naturales y corroborar que las señales detectadas en las muestras funcionalizadas derivaban de la integración del nanomaterial en la estructura

vascular. Este procedimiento metodológico aseguró la confiabilidad de la evaluación eléctrica y permitió correlacionar experimentalmente la funcionalización con la conectividad eléctrica del sistema vegetal.

3.6. Cálculo de masa depositada y densidad de corriente

La caracterización electroquímica de sistemas bioelectroquímicos y metales depositados es esencial para comprender los procesos de corrosión y deposición en materiales de interés. En el presente estudio, se realizó un análisis detallado de la deposición de plata y de las corrientes de corrosión asociadas en electrodos preparados experimentalmente, aplicando la Ley de Faraday (*Ecuación 3*) y conceptos de electroquímica fundamentales.

La determinación de la masa de plata depositada en la superficie del electrodo permite cuantificar la eficiencia del proceso electroquímico, mientras que el cálculo de la densidad de corriente de corrosión y la resistencia de polarización ofrecen información clave sobre la cinética del proceso y las posibles rutas de degradación de los materiales. Estos cálculos se complementan con la estimación de tasas de corrosión, permitiendo comparar el desempeño de las distintas secciones del sistema experimental.

En esta sección se presenta la metodología de cálculo aplicada a los datos experimentales, detallando los parámetros medidos, las ecuaciones empleadas y los resultados obtenidos. Este análisis es indispensable para correlacionar la actividad electroquímica con la respuesta estructural y funcional de los materiales en estudio, y constituye una base sólida para la discusión de resultados y propuestas de mejora en el rendimiento del sistema.

3.6.1. Cálculo de masa depositada (Ley de Faraday)

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \dots\dots (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

m: masas depositadas (g)

M: masa molar del elemento (107.887 g/mol para Ag)

I: corriente aplicada (A)

t: tiempo de aplicación (s)

n: número de electrones intercambiados (1 para $\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}^0$)

F: constand e Faraday (96485 C/mol)

Parámetros experimentales:

Corriente: $I = 62.7 \mu\text{A} = 0.06277 \text{ A}$

Tiempo: $t = 200 \text{ s}$

Masa molar: $M = 107.87 \text{ g/mol}$

Sustituyendo: en la ecuación 3.

$$m = \frac{(107.87 \text{ g/mol}) \cdot (0.0627 \text{ A}) \cdot (200 \text{ s})}{(1) \cdot (96485)} = 0.0140 \text{ g}$$

3.6.2. Cálculo de la densidad de corriente de corrosión.

La densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) se determina dividiendo la corriente de corrosión por área de electrodo:

$$i_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{corr}}}{A} \dots\dots (\text{Ecuación 4 cálculo de corrosión})$$

Donde:

i_{corr} : corriente de corrosión (A)

A: área expuesta (mm^2)

Para una sección del electrodo de forma rectangular con dimensiones:

Ancho: 1 mm

Alto: 10 mm

Cálculo del área:

$$A = (1\text{mm}) * (10\text{mm}) = 10\text{mm}^2 = 0.1\text{cm}^2$$

Sustituyendo en la ecuación 4

$$i_{corr} = \frac{I_{corr} 0.00017 \text{ A}}{0.1\text{cm}^2} = 0.001742 \text{ A/cm}^2$$

3.6.3. Cálculo de la tasa de corrosión

La tasa de corrosión ($\text{g/cm}^2\cdot\text{h}$) se calcula como:

$$Tasa = (i_{corr}) \left(\frac{3600}{n \cdot F} \right) (M) \dots\dots \text{(Ecuación 5 cálculo de la tasa de corrosión)}$$

Sustituyendo en la ecuación 5.

$$Tasa = (0.001742 \text{ A/cm}^2) \left(\frac{3600}{96485} \right) (107.87) = 0.000065 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2\text{h}}$$

En este apartado se determinaron los parámetros fundamentales de deposición y corrosión de plata, considerando tanto el cálculo teórico con la Ley de Faraday como la estimación práctica de la densidad de corriente y la tasa de corrosión. Los resultados obtenidos permiten establecer una base sólida para el análisis electroquímico de los sistemas estudiados, proporcionando herramientas útiles para comparar el rendimiento de distintos diseños experimentales y para optimizar las condiciones de trabajo de los electrodos. Esta base metodológica será de utilidad en las secciones posteriores para profundizar en el análisis y discusión de los resultados obtenidos.

3.7. Análisis de las plantas *Epipremnum aureum* (Potus) utilizando Microscopia Electrónica de Barrido Ambiental (ESEM)

Se llevó a cabo un análisis detallado de los cambios morfológicos en las plantas de *Epipremnum aureum* (potus) tras su exposición a nanopartículas al 10% en peso, soportadas en nanocelulosa y suspendidas en una solución acuosa, utilizando la técnica de (ESEM). El análisis se realizó

utilizando un microscopio Carl Zeiss, modelo EVO LS10 (Alemania), configurado con un voltaje de aceleración de 30 kV y una presión de trabajo de 80 Pa. (*figura 3.7.1*)

Las muestras vegetales fueron montadas en soportes de aluminio y fijadas con cinta conductiva de carbono de doble cara para asegurar una adecuada conducción eléctrica y evitar acumulación de carga durante el análisis (*figura 3.7.2*). Para la adquisición de imágenes se empleó un detector de electrones retrodispersados (NTS BSD), lo que permitió obtener micrograffías en escala de grises con una resolución de 1024×768 píxeles.

Las imágenes obtenidas revelaron la estructura superficial de las hojas, tallos y raíces, permitiendo observar modificaciones morfológicas asociadas a la exposición de las nanopartículas, como cambios en la textura, presencia de depósitos y alteraciones en la continuidad de la superficie. Este análisis constituye una herramienta fundamental para comparar la respuesta estructural de las muestras y profundizar en el estudio de los efectos inducidos por la interacción con las nanopartículas.



Figura 3.7.1 Microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM) EVO LS10 (Carl Zeiss, Alemania) utilizado para el análisis morfológico de las muestras vegetales.

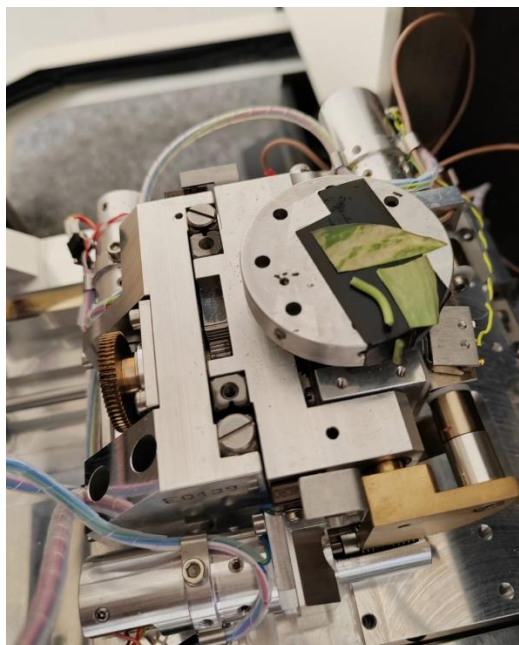


Figura 3.7.2 Muestras vegetales de *Epipremnum aureum* (potus) montadas sobre porta muestras del microscopio ESEM, fijadas con cinta conductiva de carbono para su análisis morfológico.

3.8. Análisis de las plantas *Epipremnum aureum* (Potus) utilizando (ESEM) acoplada con Análisis de Rayos X por Dispersión de Energía (EDX)

Se analizó la morfología y la composición elemental de las plantas de (Potus) empleando (ESEM) acoplada a un sistema de Rayos X por Dispersión de Energía (EDX). Esta combinación de técnicas permitió obtener imágenes de alta resolución de las superficies vegetales y, simultáneamente, determinar la distribución espacial de los elementos químicos presentes en las muestras.

Para el análisis se utilizó un detector de electrones retrodispersados y un detector de rayos X (Bruker, Quantax 200, Alemania), lo que permitió realizar un microanálisis elemental detallado de los minerales y compuestos. Este procedimiento no invasivo generó mapas de colores sobre las microfotografías obtenidas, facilitando la interpretación de la distribución de los elementos químicos.

El equipo se operó a un voltaje de aceleración de 30 kV y una presión de trabajo de 80 Pa, asegurando la conservación de la estructura natural de las muestras vegetales. Las mediciones EDX se realizaron a una tasa de recuento de entre 1000 y 9000 cuentas por segundo (cps), lo que garantizó resultados confiables y repetibles. Este enfoque metodológico integró de manera efectiva la información morfológica y elemental, constituyendo una herramienta fundamental para el estudio de las interacciones entre las nanopartículas y las estructuras vegetales analizadas.

Con el propósito de establecer una base de comparación sólida, se consideraron tres grupos experimentales de *Epipremnum aureum*:

- (a) plantas testigo sin exposición a nanopartículas,
- (b) plantas tratadas exclusivamente con nanocelulosa, y
- (c) plantas funcionalizadas con nanopartículas de plata soportadas en nanocelulosa.

Estas condiciones se muestran en la (Figura 3.8.1), la cual presenta de manera comparativa los tres tratamientos aplicados, empleados como referencia en los análisis morfológicos y composicionales posteriores.

Todas las muestras fueron examinadas mediante ESEM, con el objetivo de observar las estructuras superficiales de hojas, tallos y raíces. Esta técnica no destructiva permitió identificar modificaciones en la textura, la continuidad de las superficies y la presencia de posibles depósitos asociados a los tratamientos.

Complementariamente, se realizó un análisis elemental mediante ESEM-EDX, que permitió determinar la distribución espacial de los elementos presentes en las superficies de las muestras. La correlación entre las micrografías y los mapas elementales permitió establecer relaciones directas entre los tratamientos aplicados y los cambios estructurales y químicos observados.

El uso de estos tres grupos experimentales y la aplicación combinada de ESEM y ESEM-EDX aportaron evidencia robusta sobre la influencia de las nanopartículas y de la nanocelulosa en la estructura vegetal, sentando las bases para un análisis comparativo riguroso en las secciones posteriores.

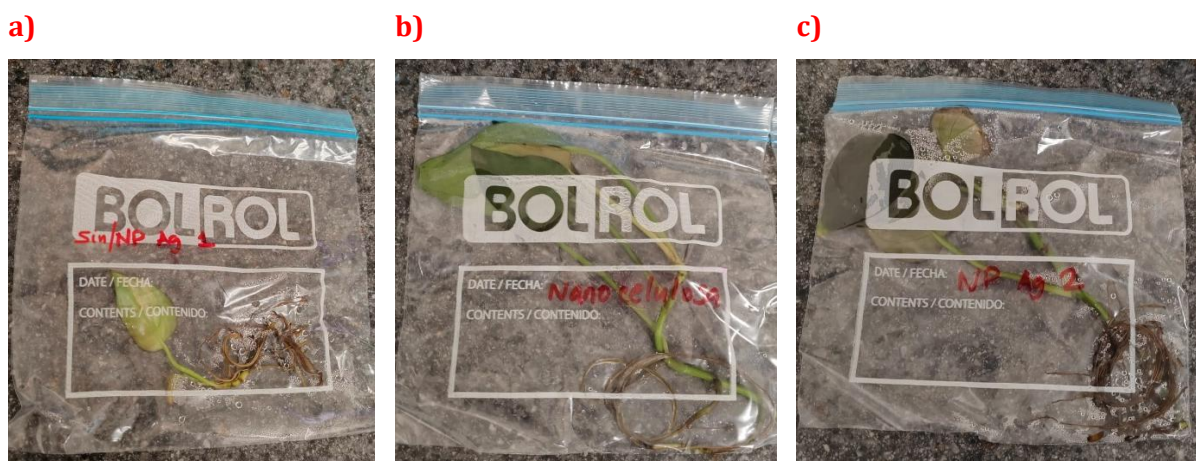


Figura 3.8.1 Muestras de *Epipremnum aureum* (Potus) empleadas para el análisis morfológico y elemental mediante ESEM-EDX.

(a) Muestra testigo sin exposición a nanopartículas.

(b) Muestra tratada únicamente con nanocelulosa.

(c) Muestra tratada con nanopartículas de plata soportadas en nanocelulosa.

3.9. Caracterización estructural por difracción de rayos x (DRX)

Con el objetivo de analizar la estructura cristalina de las nanopartículas de plata y cloruro de plata (Ag/AgCl) soportadas sobre la matriz de nanocelulosa, se llevó a cabo un análisis por (DRX). Esta técnica se emplea para identificar las fases cristalinas presentes en materiales sólidos y estimar parámetros como el tamaño de cristal y la cristalinidad de las muestras.

El análisis se realizó utilizando un difractómetro marca **Bruker**, modelo **D8 Advance**, (figura 3.9.1) equipado con una fuente de radiación Cu K α con una longitud de onda de $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, la cual es ampliamente utilizada debido a su capacidad para producir difracciones intensas y de alta resolución en la mayoría de los materiales cristalinos. Para minimizar las interferencias de la radiación K β (longitud de onda más corta que la K α), se utilizó un monocromador de grafito que filtró eficazmente dicha radiación y permitió obtener patrones de difracción con bajo nivel de ruido y alta precisión.



Figura 3.9.1 Difractómetro Bruker D8 Advance utilizado para el análisis de difracción de rayos X (DRX).

El equipo cuenta con un detector tipo LYNXEYE, un detector de tipo semiconductor con sistema de conteo de pulsos que ofrece alta sensibilidad y resolución angular, ideal para analizar muestras de

nanopartículas en polvos o películas. Las muestras fueron preparadas en estado sólido, esparcidas homogéneamente sobre un porta muestras de vidrio para asegurar una superficie plana y uniforme que permitiera obtener difractogramas de buena calidad. Las condiciones experimentales incluyeron un rango de barrido de 5° a 100° en 2θ , con un paso angular de 0.02° y un tiempo de adquisición de 1 segundo por paso. Se empleó un voltaje de operación de 40 kV y una corriente de 30 mA, condiciones recomendadas para maximizar la intensidad de las difracciones y garantizar la estabilidad de la señal. El equipo generó archivos de salida en formato. RAW, cuyo acrónimo proviene de la expresión en inglés Raw Data y que contiene los datos brutos de cuentas por segundo (cps) en función del ángulo 2θ , sin preprocesamiento. Además, se generaron archivos complementarios en formato. UXD, cuyo significado es Universal X-ray Diffraction Data, que almacenan datos refinados de intensidad junto con metadatos experimentales como la configuración instrumental y parámetros de medición. El formato. XY, por su parte, representa archivos de coordenadas X-Y (ángulo-intensidad), en texto simple, que facilitan la exportación e importación de datos para su análisis en diferentes programas de procesamiento de gráficos. Los archivos. RAW fueron procesados en DIFFRAC.SUITE EVA (software de Bruker), el cual permitió realizar correcciones de fondo, normalizar la intensidad de la señal y realizar la identificación de fases mediante la base de datos JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards). Para el cálculo del tamaño de cristal promedio se utilizó la ecuación de Scherrer, (*Ecuación 2*).

Finalmente, los resultados de DRX fueron complementados con observaciones morfológicas obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y con análisis elemental por espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDX). Esta caracterización estructural integral permitió correlacionar la cristalinidad y el tamaño de las nanopartículas con las propiedades eléctricas y electroquímicas discutidas en las secciones posteriores de este trabajo.

Capítulo 4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan de manera cronológica y secuencial los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, abarcando desde la preparación del nanomaterial funcionalizante hasta la validación de las propiedades eléctricas y morfológicas de las plantas funcionalizadas. Cada sección describe los hallazgos relevantes y sus implicaciones para la comprensión de la interacción entre las nanopartículas de plata y cloruro de plata (NPs Ag/AgCl) y el sistema vascular de *Epipremnum aureum*, enfatizando la relación entre la metodología aplicada y las respuestas observada

4.1. Síntesis y caracterización del nanomaterial funcionalizante

El nanocompuesto de Ag/AgCl soportado en nanocelulosa se obtuvo mediante la metodología de “one-step synthesis” descrita en el Capítulo 3. Durante el proceso, se observó un cambio cromático progresivo de blanco lechoso a violeta intenso, considerado un indicador visual de la formación de nanopartículas cúbicas de Ag/AgCl, producto de la reducción in situ de iones Ag^+ y su interacción con los grupos hidroxilo de la nanocelulosa.

La caracterización morfológica, realizada mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y análisis de dispersión de rayos X (EDX), evidenció una distribución homogénea de las partículas sobre la matriz celulósica, confirmando la presencia de plata (Ag) y cloro (Cl) en proporciones coherentes con la formación del compuesto funcionalizante. La morfología cúbica observada y el tamaño nanométrico uniforme son indicativos de una nucleación controlada, favorecida por la estructura porosa y la alta densidad de sitios activos en la nanocelulosa, que actúan como agentes estabilizantes durante la síntesis.

Desde el punto de vista composicional, el análisis EDX corroboró la coexistencia de picos característicos de Ag y Cl, junto con señales asociadas a elementos de la celulosa (C y O), lo que confirma la formación del nanocompuesto Ag/AgCl anclado sobre la red de nanofibras. Este resultado es consistente con lo reportado en sistemas similares, donde la nanocelulosa actúa simultáneamente como soporte estructural y agente reductor, promoviendo la dispersión uniforme del material metálico y la estabilidad coloidal del sistema.

Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que el proceso de síntesis permitió obtener un material funcionalizante con alta estabilidad química y excelente adherencia a las superficies biológicas, propiedades fundamentales para su integración en el sistema vascular de *Epipremnum aureum*. En concordancia con lo reportado en el artículo “Plants with silver nanoparticles to improve

electrical conductivity: an innovative approach in biology”, producto de esta investigación, la combinación de Ag/AgCl con nanocelulosa favorece la formación de redes conductoras estables y biocompatibles, capaces de modificar el comportamiento eléctrico y electroquímico de los tejidos vegetales.

En conjunto, la caracterización estructural y composicional del nanomaterial confirma que el método de síntesis empleado fue eficiente, reproduciendo un nanocompuesto homogéneo, estable y funcional, adecuado para su posterior integración en el sistema biológico como material conductor y elemento activo en la formación de vías eléctricas internas.

4.2. Integración del nanomaterial en la planta

El proceso de integración del nanomaterial en las plantas de *Epipremnum aureum* se realizó mediante un protocolo de exposición controlada en condiciones ambientales óptimas. Durante un periodo de 12 semanas, las plantas fueron sometidas a una inmersión radicular en una suspensión acuosa de nanopartículas de Ag/AgCl al 10% en peso, con el objetivo de favorecer la absorción natural de las nanopartículas a través del sistema vascular. Este procedimiento aprovechó la fisiología de la planta para el transporte de nutrientes y permitió la distribución homogénea del nanomaterial en los tejidos vasculares (xilema y floema), como se observa en la *figura 4.2.1*.



Figura 4.2.1 Proceso de inmersión y evolución de la planta Epipremnum aureum en la suspensión de nanopartículas de Ag/AgCl.

Una vez concluido el periodo de exposición, se realizaron análisis de difracción de rayos X (DRX) para confirmar la fase cristalina del nanomaterial incorporado en las distintas zonas de la planta (raíz, tallo y hoja). Los resultados mostraron picos característicos de Ag y AgCl, confirmando que el material conservó su estructura cristalina cúbica estable incluso tras su integración al sistema

biológico. Este comportamiento sugiere que las nanopartículas no sufrieron degradación significativa dentro del medio vegetal, lo que respalda la hipótesis de una biointegración efectiva sin alteración estructural del material funcionalizante.

Estos resultados concuerdan con los estudios previos sobre biointegración de nanometales en tejidos vegetales, donde se ha demostrado que las nanopartículas metálicas pueden incorporarse en el sistema vascular sin alterar los procesos fisiológicos esenciales. En particular, la persistencia de la fase cúbica de Ag y AgCl bajo condiciones acuosas prolongadas confirma la estabilidad química del sistema híbrido Ag/AgCl-nanocelulosa, lo que lo hace idóneo para su uso en ambientes biológicos.

La evidencia obtenida mediante ESEM y EDX (*figuras 4.2.6 a 4.2.31*) mostró que las nanopartículas se distribuyen homogéneamente a lo largo de los tejidos vasculares, siendo detectadas en raíces, tallos y hojas. Este hallazgo confirma que la integración no se limita a la zona radicular, sino que el nanomaterial logra un transporte longitudinal continuo a través del xilema, generando una vía conductora a lo largo de la planta.

Desde el punto de vista funcional, la presencia de nanopartículas metálicas en los tejidos vasculares contribuye a la formación de una red interna con propiedades eléctricamente conductoras, en la cual las nanopartículas actúan como puentes de transferencia electrónica entre dominios biológicos y regiones de alta densidad de iones. Este fenómeno favorece la movilización de carga eléctrica y constituye la base para los ensayos eléctricos y electroquímicos desarrollados en las siguientes secciones del estudio.

Estos hallazgos coinciden con los resultados publicados en el artículo ***“Plants with silver nanoparticles to improve electrical conductivity: an innovative approach in biology”***, derivado de esta investigación, donde se describe cómo la incorporación de nanopartículas de plata en el sistema vascular vegetal potencia la conductividad eléctrica interna y genera una vía de transporte electrónico estable y reproducible. En conjunto, los resultados obtenidos en esta etapa confirman la integración exitosa y funcional del material nanométrico en la planta, consolidando la hipótesis de que *Epipremnum aureum* puede actuar como un biohospedero activo para materiales conductores, con potencial para el desarrollo de plataformas bioelectrónicas vegetales.

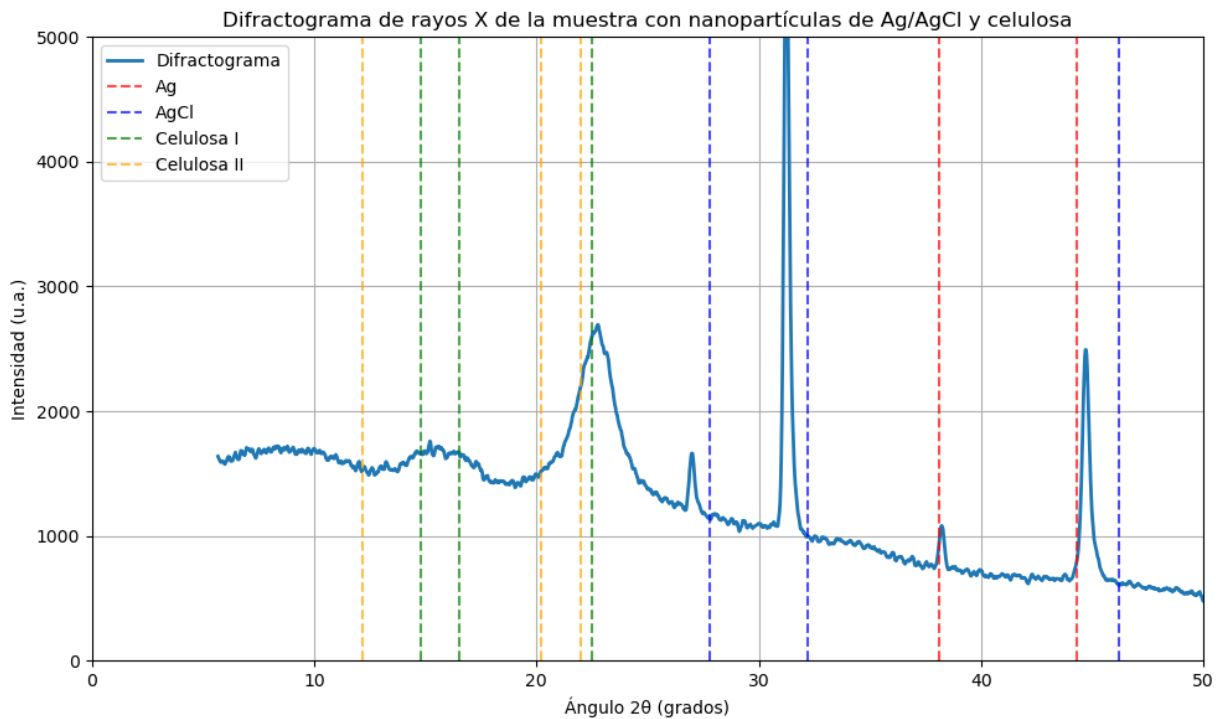


Figura 4.2.2 Difractograma de rayos X de la muestra con nanopartículas de Ag/AgCl y celulosa

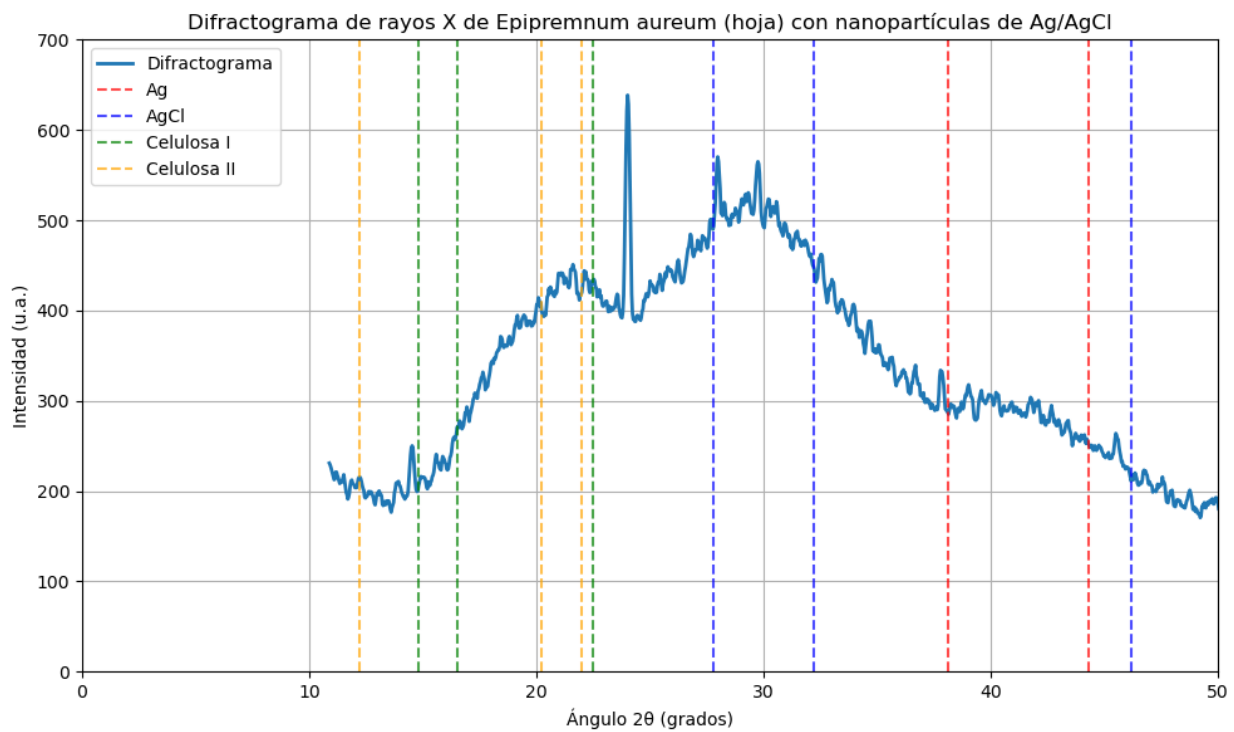


Figura 4.2.3 Difractograma de rayos X de *Epipremnum aureum* (hoja) con nanopartículas de Ag/AgCl

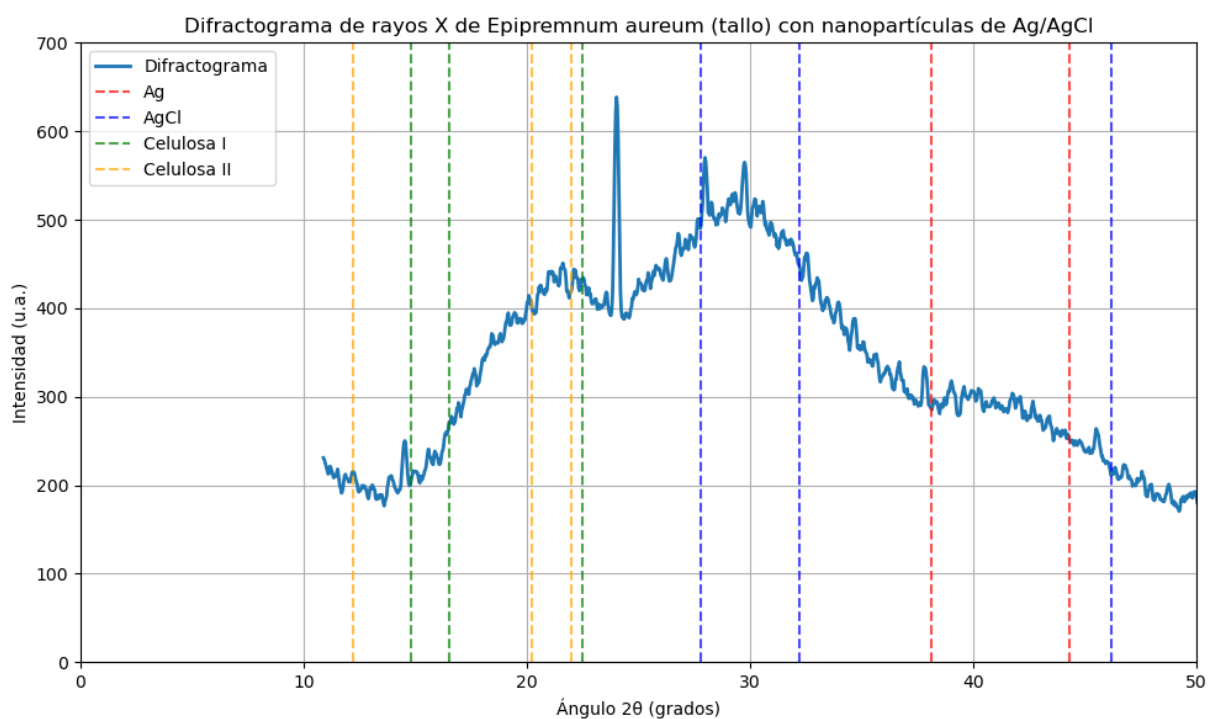


Figura 4.2.4 Difractograma de rayos X de *Epipremnum aureum* (tallo) con nanopartículas de Ag/AgCl

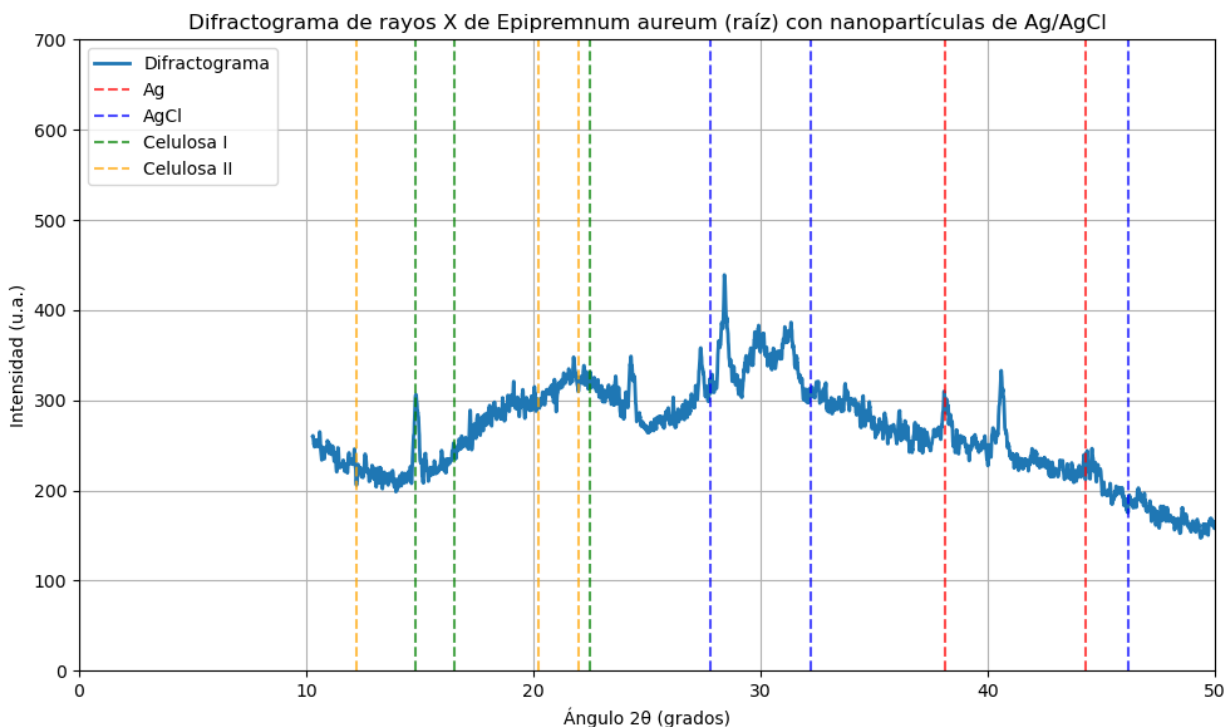


Figura 4.2.5 Difractograma de rayos X de Epipremnum aureum (raíz) con nanopartículas de Ag/AgCl

Posteriormente, se verificó la presencia y la distribución del nanomaterial funcionalizante mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) acoplada a espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDX). Además, se analizó una planta tratada únicamente con nanocelulosa, con el propósito de evaluar su comportamiento morfológico y composicional en comparación con las muestras funcionalizadas con Ag/AgCl.

En la *figura 4.2.6* se presenta una micrografía ESEM de la hoja funcionalizada con nanocelulosa, donde se observa una superficie continua y homogénea con la presencia de estructuras finas que sugieren una adecuada deposición del material sobre la epidermis. No se identifican alteraciones relevantes en la morfología celular, lo que indica una buena compatibilidad del material con el tejido vegetal.

En la *figura 4.2.7*, el mapa elemental obtenido por EDX evidencia la distribución espacial de los principales elementos detectados (**C, O, K, Na, Mg, Si, Ca y P**), asociados tanto a la matriz vegetal como a la nanocelulosa. La presencia simultánea de estos elementos en zonas específicas sugiere

una interacción física entre la nanocelulosa y la pared celular, probablemente facilitada por los grupos hidroxilo del polímero y los componentes lignocelulósicos de la hoja.

La *figura 4.2.8* muestra el espectro EDX correspondiente, donde se identifican los picos característicos de los elementos presentes en la superficie, confirmando la información del mapa elemental. Las señales más intensas corresponden a carbono y oxígeno, coherentes con la naturaleza orgánica del tejido, mientras que los elementos inorgánicos aparecen en proporciones menores.

Finalmente, en la *Tabla 4.2.1* se presenta la composición elemental cuantitativa de la hoja funcionalizada, expresada como porcentaje en peso (wt %), tanto sin normalizar como normalizado. Los resultados muestran una proporción predominante de carbono ($\approx 45\text{--}50\%$) y oxígeno ($\approx 35\text{--}40\%$), acompañados de cantidades menores de Na, Mg, Si, Ca y K. Esta distribución es coherente con la composición típica del tejido vegetal y con la presencia de la nanocelulosa, la cual contribuye al aumento relativo del oxígeno respecto al carbono.

En conjunto, los análisis ESEM-EDX y los datos de la *Tabla 4.2.1* confirman que la incorporación del material funcionalizante se logró de manera homogénea, sin evidenciar acumulaciones puntuales ni alteraciones morfológicas significativas. Estos resultados respaldan la efectividad del proceso de funcionalización y la estabilidad del material durante la exposición, mostrando que el sistema vegetal mantiene su integridad estructural bajo las condiciones de ensayo.

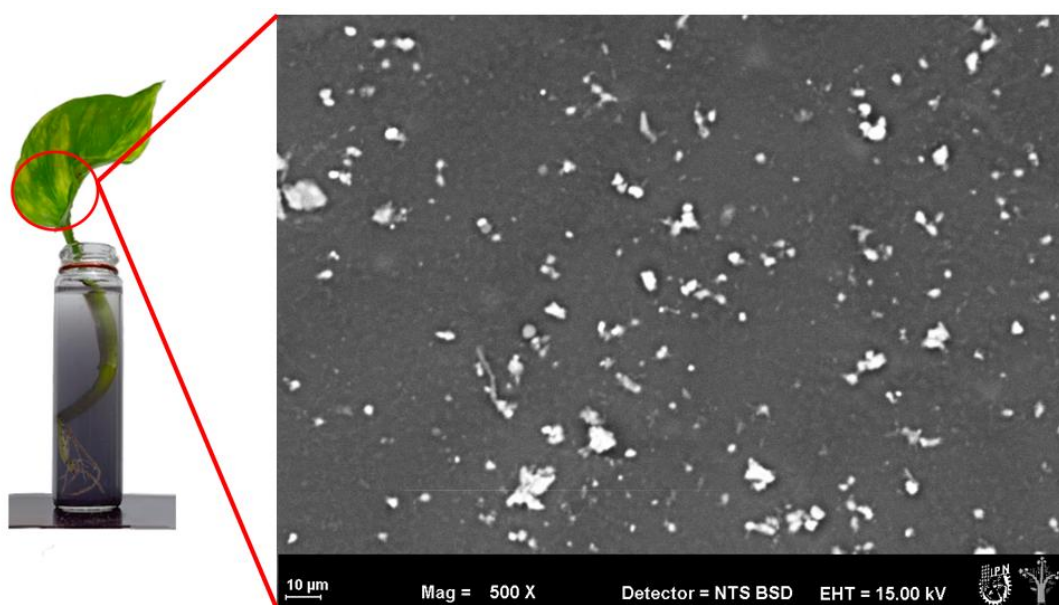


Figura 4.2.6 Micrografía ESEM de la hoja de *Epipremnum aureum* funcionalizada con nanocelulosa, donde se observa la cobertura homogénea del material sobre la epidermis.

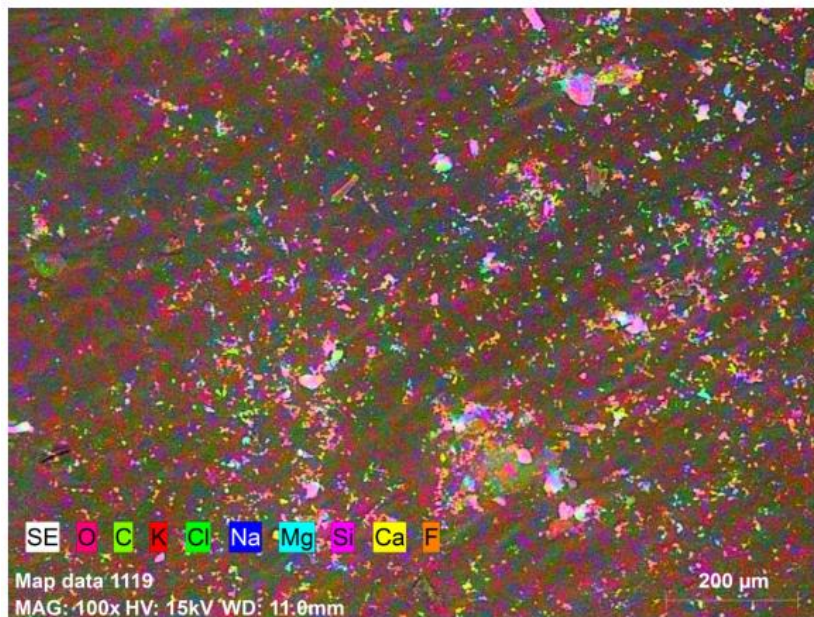


Figura 4.2.7 Distribución elemental (EDX) de la hoja funcionalizada, mostrando los elementos principales detectados en la superficie.

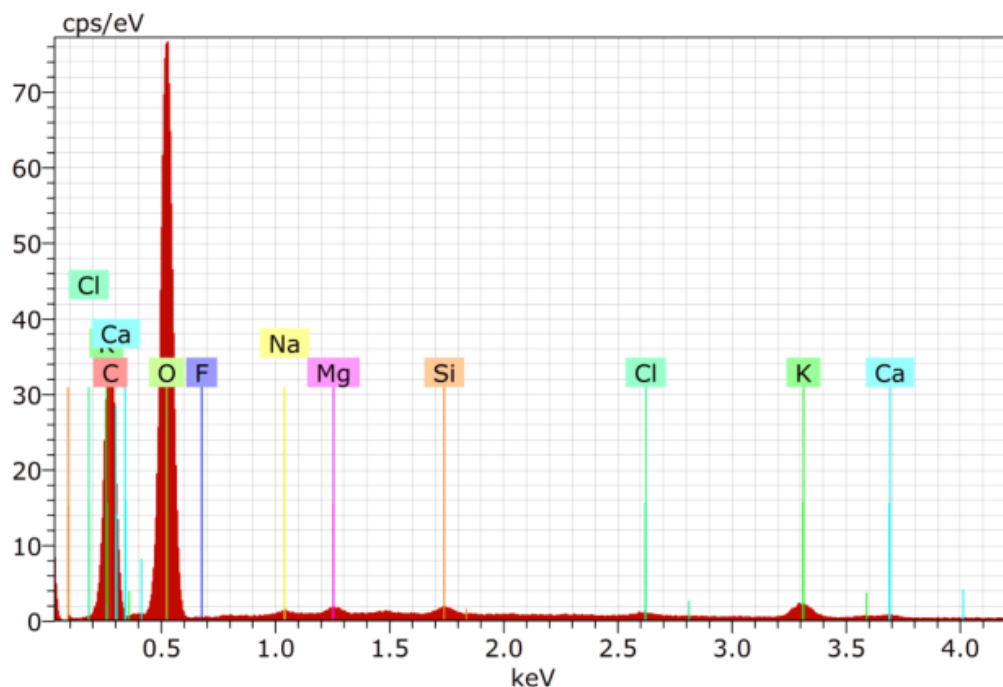


Figura 4.2.8 Espectro EDX de la hoja de *Epipremnum aureum* funcionalizada con nanocelulosa.

Tabla 4.2.1 Espectro EDX correspondiente a la hoja funcionalizada, con los picos característicos de los elementos identificados.

Elemento	Contenido sin normalizar (wt. %)	Contenido normalizado (wt. %)
Oxígeno	67.76	67.76
Carbono	29.54	29.54
Potasio	1.46	1.46
Cloro	0.54	0.54
Sodio	0.28	0.28
Flúor	0.18	0.18
Magnesio	0.17	0.17
Silicio	0.07	0.07
Total	100	100

Para el análisis del tallo funcionalizado con nanocelulosa, se realizaron cortes longitudinales y transversales con el objetivo de examinar la morfología y la distribución del material funcionalizante en el interior del tejido vegetal mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y espectroscopía de dispersión de rayos X (EDX).

En la *figura 4.2.9* se presenta una micrografía ESEM del corte longitudinal del tallo, donde se observa una organización estructural definida de las fibras vegetales y la presencia de una capa superficial continua atribuible a la nanocelulosa. Esta disposición sugiere una correcta adhesión del material sobre la pared celular, sin evidenciar fracturas o alteraciones notorias en la morfología del tejido.

En la *figura 4.2.10*, el corte transversal muestra una vista detallada de la región vascular del tallo, donde se aprecia la distribución homogénea de la celulosa a lo largo de los conductos vasculares y su integración con la matriz biológica. La estructura mantiene la continuidad de las fibras, lo cual indica que el proceso de funcionalización no afectó significativamente la integridad mecánica del tejido vegetal.

La *figura 4.2.11* presenta el mapa elemental (EDX) correspondiente a la región analizada, en el que se identifican los elementos **C, O, K, Ca, Na, Mg, Si, P y S**. La coincidencia de estos elementos con los constituyentes naturales del tallo, junto con la presencia de oxígeno y carbono en mayor proporción, sugiere que la nanocelulosa se distribuye preferentemente en las zonas ricas en compuestos lignocelulósicos, interaccionando con los grupos funcionales del tejido.

En la *figura 4.2.12*, el espectro EDX del corte transversal confirma la presencia de los mismos elementos observados en el mapa elemental, mostrando picos bien definidos para oxígeno, carbono, calcio y potasio. Estas señales reflejan la composición típica de las paredes celulares vegetales y respaldan la hipótesis de que la nanocelulosa se encuentra asociada a las superficies internas del sistema vascular.

Finalmente, la *Tabla 4.2.2* resume la composición elemental obtenida por EDX, expresada en porcentaje en peso (wt. %), tanto sin normalizar como normalizada. Se observa una predominancia de carbono ($\approx 45\text{--}50\%$) y oxígeno ($\approx 35\text{--}40\%$), coherente con la naturaleza orgánica del tejido y la incorporación de nanocelulosa. Los elementos inorgánicos, como Ca, K y Mg, aparecen en proporciones menores, reflejando la presencia natural de minerales transportados por la savia.

En conjunto, los resultados de ESEM-EDX y la composición de la *Tabla 4.2.2* indican que la nanocelulosa se distribuye de manera uniforme en el tallo sin alterar la organización estructural

del tejido, lo que demuestra la compatibilidad del material funcionalizante con la matriz vegetal y su estabilidad bajo las condiciones experimentales de exposición.

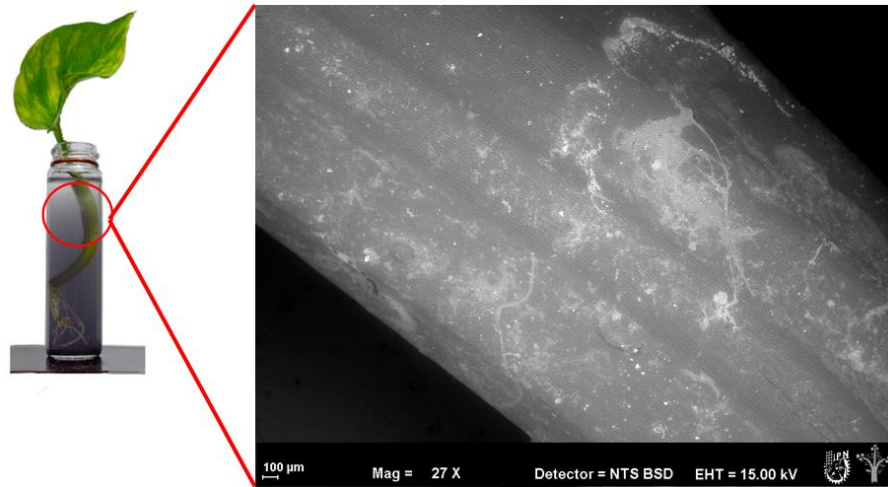


Figura 4.2.9 Micrografía ESEM del corte longitudinal del tallo funcionalizado con nanocelulosa de Epipremnum aureum.

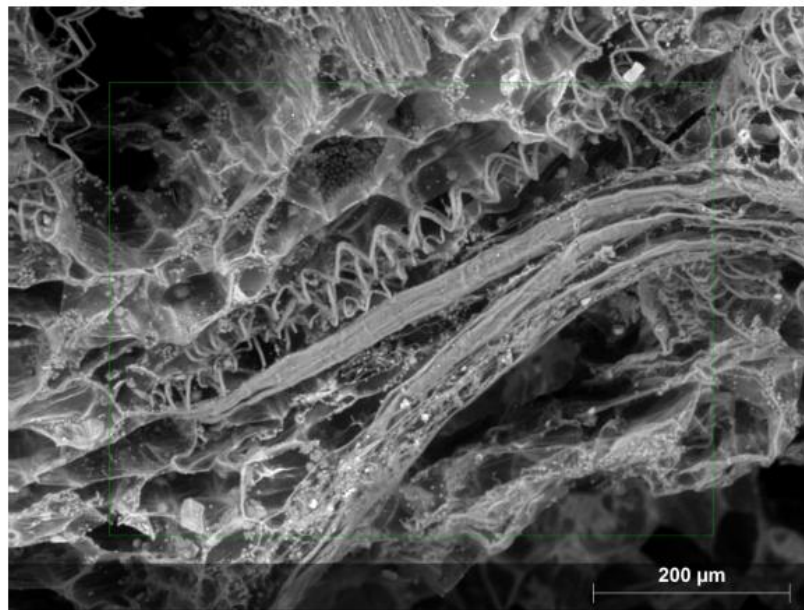


Figura 4.2.10 Micrografía ESEM del corte transversal del tallo funcionalizado con nanocelulosa, mostrando la organización de las fibras y la continuidad de la estructura vegetal.

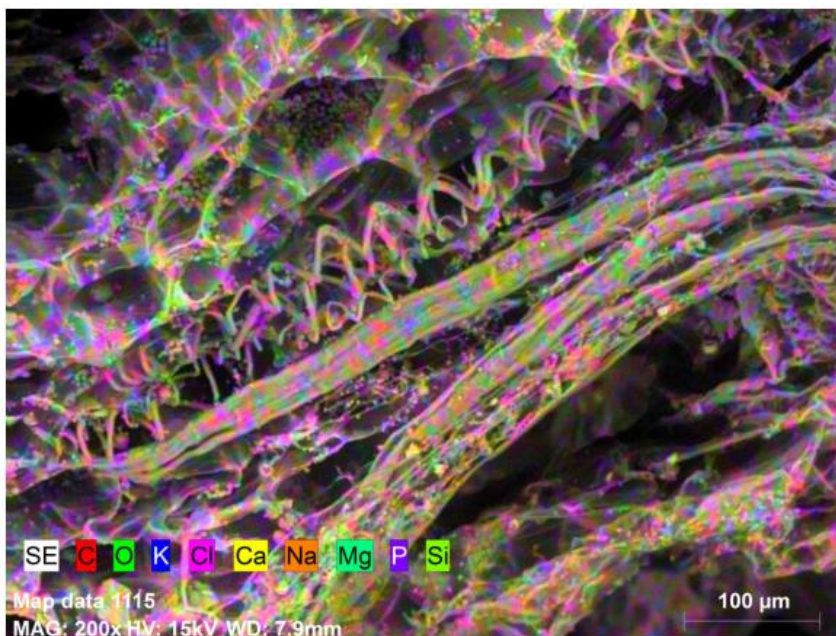


Figura 4.2.11 Distribución elemental (EDX) del corte transversal del tallo funcionalizado con nanocelulosa.

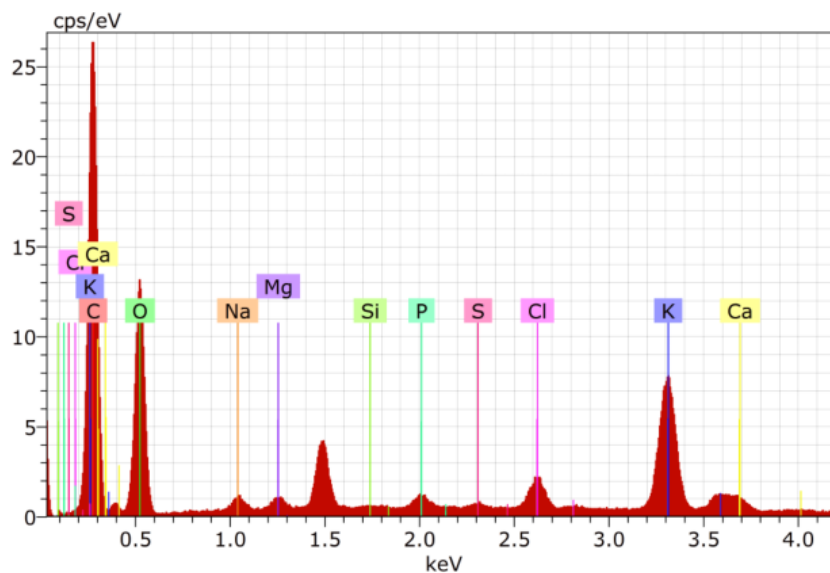


Figura 4.2.12 Espectro EDX correspondiente al corte transversal del tallo funcionalizado con nanocelulosa.

Tabla 4.2.2 Composición elemental del tallo funcionalizado con nanocelulosa obtenida mediante EDX.

Elemento	Contenido sin normalizar (wt. %)	Contenido normalizado (wt. %)
Carbono	22.02	43.43
Oxígeno	21.23	41.87
Potasio	5.75	11.34
Cloro	0.78	1.54
Calcio	0.68	1.34
Sodio	0.12	0.23
Fósforo	0.1	0.2
Magnesio	0	0
Azufre	0	0
Silicio	0.03	0.05
Total	50.7	100

En la *figura 4.2.13* se presenta una micrografía ESEM del corte longitudinal de la raíz funcionalizada con nanocelulosa, donde se observa la disposición ordenada de las fibras y la continuidad estructural del tejido radicular. La superficie muestra una textura compacta y homogénea, sin indicios de colapso o deterioro, lo que indica una adecuada compatibilidad del material con la matriz vegetal. La presencia de una red fibrosa superficial sugiere la formación de una capa de nanocelulosa adherida a la pared celular, posiblemente favorecida por la interacción entre los grupos hidroxilo del polímero y los componentes lignocelulósicos del tejido.

En la *figura 4.2.14*, se muestra un acercamiento del corte transversal de la raíz, donde se aprecia con mayor detalle la red interna de fibras y la distribución de la nanocelulosa entre las estructuras vasculares, reforzando la arquitectura celular. Esta disposición tridimensional evidencia que la nanocelulosa no solo se deposita en la superficie, sino que también penetra parcialmente en las capas internas del tejido, lo que podría contribuir a mejorar la estabilidad mecánica y la capacidad de transporte del sistema.

La *figura 4.2.15* muestra el mapa elemental (EDX) correspondiente a la región analizada del corte transversal, en el que se identifican los elementos **C, O, K, Ca, Na, Mg, Si, P, S y Cl**. La presencia predominante de carbono y oxígeno confirma el carácter orgánico del tejido, mientras que los

elementos inorgánicos —particularmente calcio, sodio y silicio— se asocian a la composición natural del sistema radicular. La detección de cloro podría deberse a residuos del medio de exposición o a la propia composición del sustrato, sin representar una alteración química significativa.

En la *figura 4.2.16*, el espectro EDX del corte transversal muestra picos bien definidos correspondientes a los elementos detectados en el mapa elemental, lo que corrobora la uniformidad de la distribución y la estabilidad del material funcionalizante dentro de la raíz. La intensidad relativa de los picos de oxígeno y carbono refuerza la presencia de nanocelulosa en la matriz biológica, manteniendo la proporción esperada para materiales de naturaleza orgánica.

Finalmente, la *Tabla 4.2.3* presenta la composición elemental cuantitativa obtenida a partir del análisis EDX, expresada en porcentaje en peso (wt.%) tanto sin normalizar como normalizada. Se observa una alta proporción de carbono ($\approx 45\text{--}55\%$) y oxígeno ($\approx 35\text{--}40\%$), coherente con la estructura lignocelulósica de la raíz y la incorporación de nanocelulosa. Los elementos minerales detectados en menores proporciones (Ca, Na, Mg, Si, P, S) reflejan la composición fisiológica del sistema radicular y su capacidad para retener iones durante el proceso de inmersión.

En conjunto, los resultados obtenidos por ESEM-EDX y los datos de la *Tabla 4.2.3* confirman que la nanocelulosa se integró de forma estable en la estructura interna de la raíz, manteniendo la organización del tejido vegetal y sin evidencias de daño morfológico. Este comportamiento sugiere una interacción controlada y compatible entre el material funcionalizante y la matriz biológica, lo que respalda la viabilidad del procedimiento de funcionalización para aplicaciones bioelectrónicas.

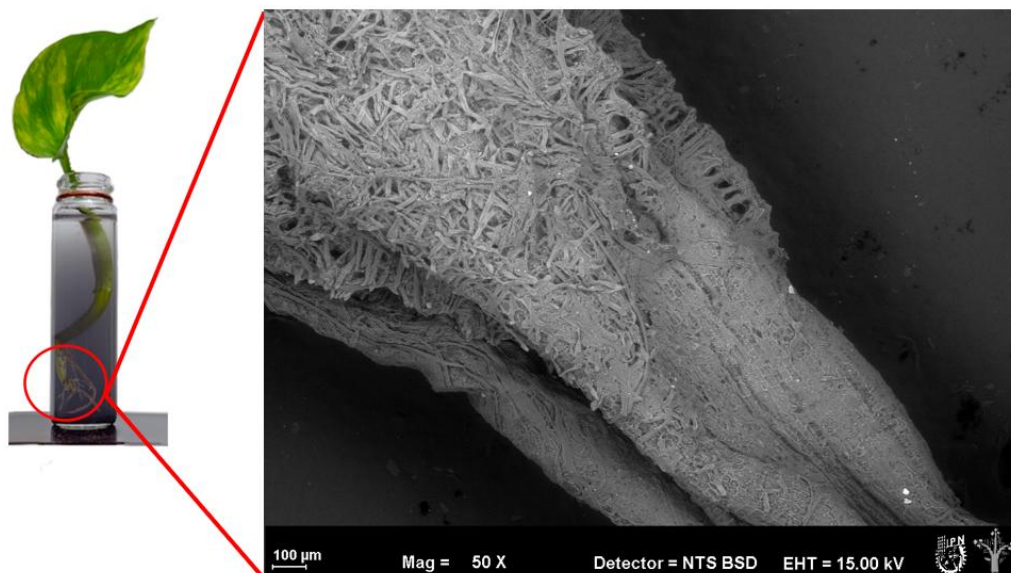


Figura 4.2.13 Micrografía ESEM del corte longitudinal de la raíz funcionalizada con nanocelulosa de *Epipremnum aureum*.

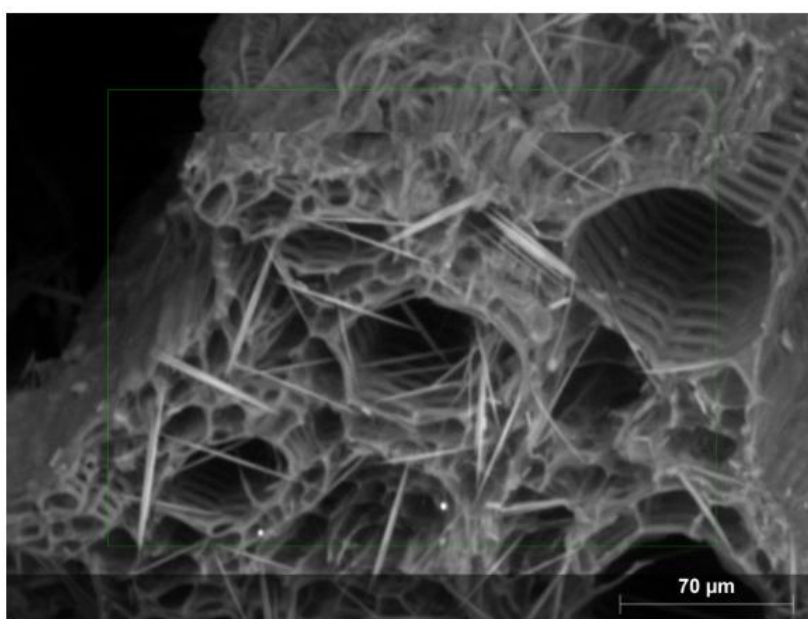


Figura 4.2.14 Micrografía ESEM del corte transversal de la raíz funcionalizada, mostrando la estructura interna de fibras y la red formada por la nanocelulosa.

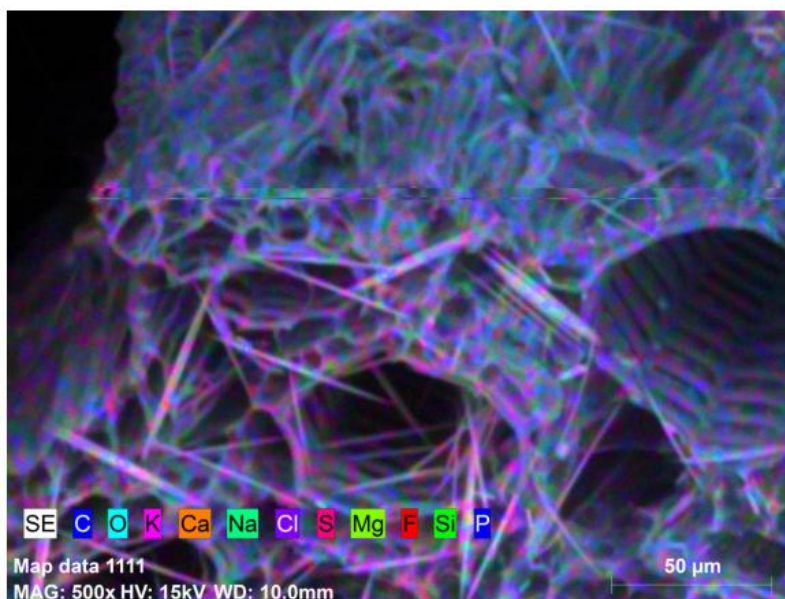


Figura 4.2.15 Distribución elemental (EDX) del corte transversal de la raíz funcionalizada con nanocelulosa.

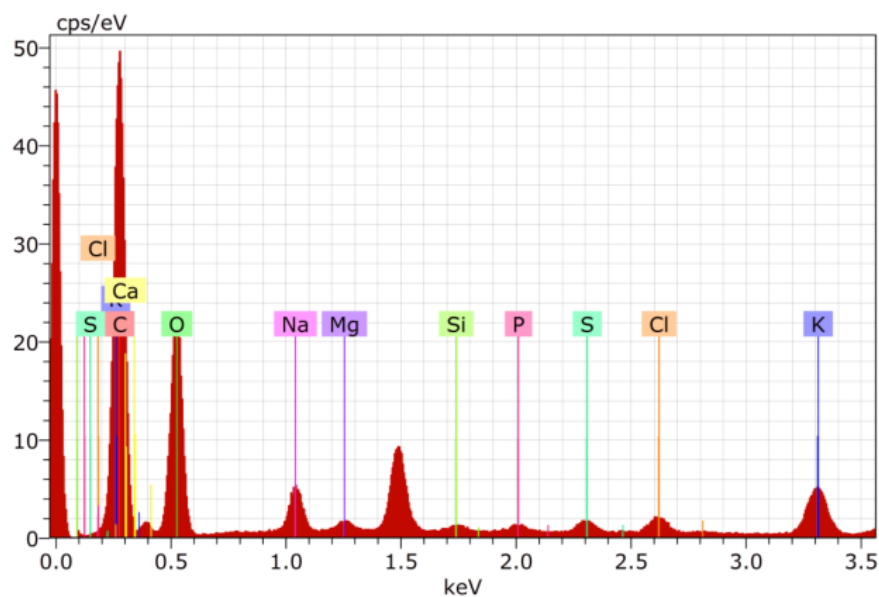


Figura 4.2.16 Espectro EDX correspondiente al corte transversal de la raíz funcionalizada con nanocelulosa.

Tabla 4.2.3 Composición elemental (EDX) del corte transversal de la raíz funcionalizada con nanocelulosa de *Epipremnum aureum*.

Elemento	Contenido sin normalizar (wt. %)	Contenido normalizado (wt. %)
Carbono	26.79	50.12
Oxígeno	21.11	39.48
Potasio	1.96	3.67
Calcio	1.45	2.72
Silicio	0.76	1.42
Sodio	0.45	0.84
Cloro	0.34	0.64
Hierro	0.51	0.95
Azufre	0.08	0.15
Magnesio	0	0
Fósforo	0	0
Total	53.46	100

Una vez concluidos los análisis de la planta funcionalizada únicamente con nanocelulosa, se procedió al estudio de las muestras funcionalizadas con nanopartículas de Ag/AgCl, con el propósito de evaluar la incorporación del material metálico y su distribución dentro de los tejidos vegetales. Para ello, se realizaron cortes longitudinales y transversales de la hoja, el tallo y la raíz, que fueron examinados mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y espectroscopía de dispersión de rayos X (EDX).

En la *figura 4.2.17*, se observa la micrografía ESEM del corte longitudinal de la hoja funcionalizada, donde se aprecia una distribución heterogénea de las nanopartículas de Ag/AgCl sobre la superficie epidérmica. Las partículas presentan tamaños micrométricos y una dispersión no uniforme, lo que sugiere un proceso de adsorción preferencial en regiones de alta rugosidad superficial. Esta disposición es coherente con la naturaleza coloidal del sistema y con la capacidad de la hoja para retener iones metálicos en la cutícula y las capas externas.

En la *figura 4.2.18*, correspondiente al corte transversal del tejido foliar, se distingue la organización interna de las capas celulares y la localización de las nanopartículas en zonas próximas al sistema vascular. Esta observación indica que parte del material metálico fue transportado a través del flujo transpiratorio, alcanzando regiones subepidérmicas. La presencia

de partículas incrustadas en la pared celular sugiere una interacción física entre las nanopartículas y los componentes lignocelulósicos del tejido.

Las *figuras 4.2.19 y 4.2.20* presentan los resultados del análisis elemental (EDX) de la hoja funcionalizada. En la Figura 4.2.19 se muestra la distribución global de los elementos detectados (**C, O, K, Na, Mg, Ca, Cl, P, Ag**, entre otros), revelando una composición mixta característica de la matriz vegetal con zonas enriquecidas en plata. La Figura 4.2.20 resalta de manera específica la distribución del elemento Ag, donde se observa una concentración localizada en regiones puntuales, principalmente sobre la epidermis y las capas vasculares, lo que confirma la presencia efectiva del material funcionalizante dentro del tejido.

En la *figura 4.2.21*, el espectro EDX de la muestra funcionalizada evidencia los picos característicos de Ag y Cl, junto con señales correspondientes a Ca, Na, Mg, Si y F. La coincidencia entre las señales de plata y cloro confirma la preservación de la fase Ag/AgCl después del proceso de exposición, lo cual indica que las nanopartículas mantuvieron su composición química y estabilidad estructural dentro del entorno biológico.

Finalmente, la *Tabla 4.2.4* presenta la composición elemental cuantitativa obtenida a partir del análisis EDX, expresada como porcentaje en peso (wt.%) tanto sin normalizar como normalizada. Se observa una proporción notable de plata ($\approx 2-3\%$) y cloro ($\approx 8\%$), coherente con la presencia del compuesto Ag/AgCl, acompañada de elementos inorgánicos naturales del tejido vegetal (Ca, Na, Mg, K, Si). Esta distribución confirma la incorporación del material funcionalizante en la superficie y regiones internas del tejido sin alterar significativamente la composición global del sistema.

En conjunto, los resultados de ESEM y EDX confirman la adsorción y retención estable de nanopartículas de Ag/AgCl en los tejidos vegetales de *Epipremnum aureum*. La morfología observada y la distribución elemental evidencian un proceso de biointegración superficial y subcelular controlado, donde la planta actúa como una matriz de soporte adecuada para el material conductor sin evidenciar daños estructurales apreciables.

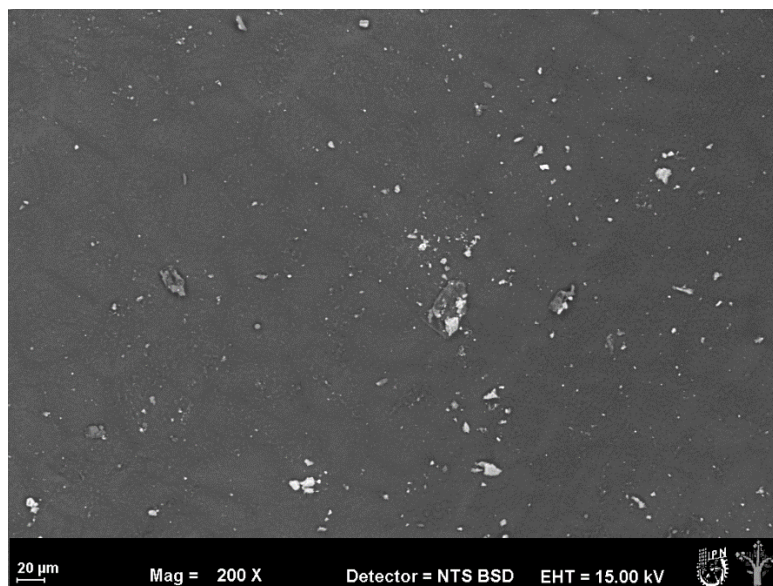


Figura 4.2.17 Micrografía ESEM del corte longitudinal de la hoja funcionalizada con nanopartículas de Ag/AgCl de *Epipremnum aureum*.

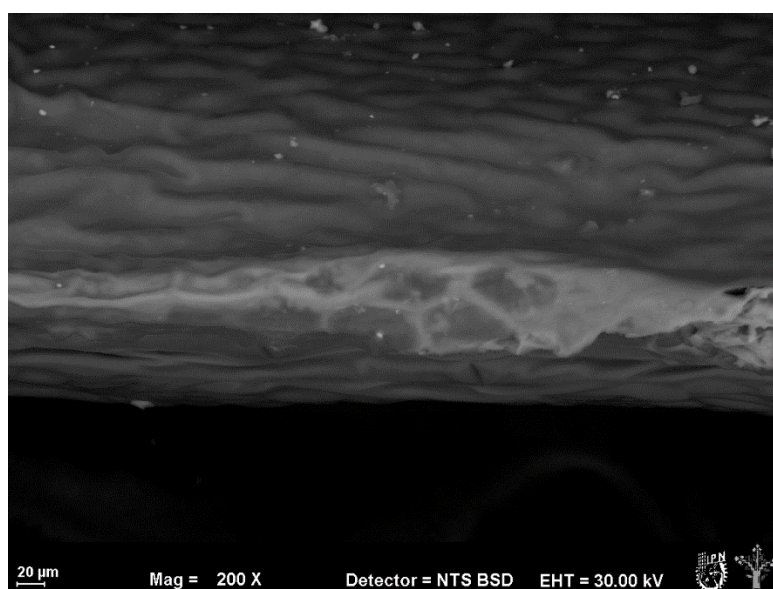


Figura 4.2.18 Micrografía ESEM del corte transversal de la hoja funcionalizada con nanopartículas de Ag/AgCl.



Figura 4.2.19 Distribución elemental (EDX) de la hoja funcionalizada con Ag/AgCl (análisis global).

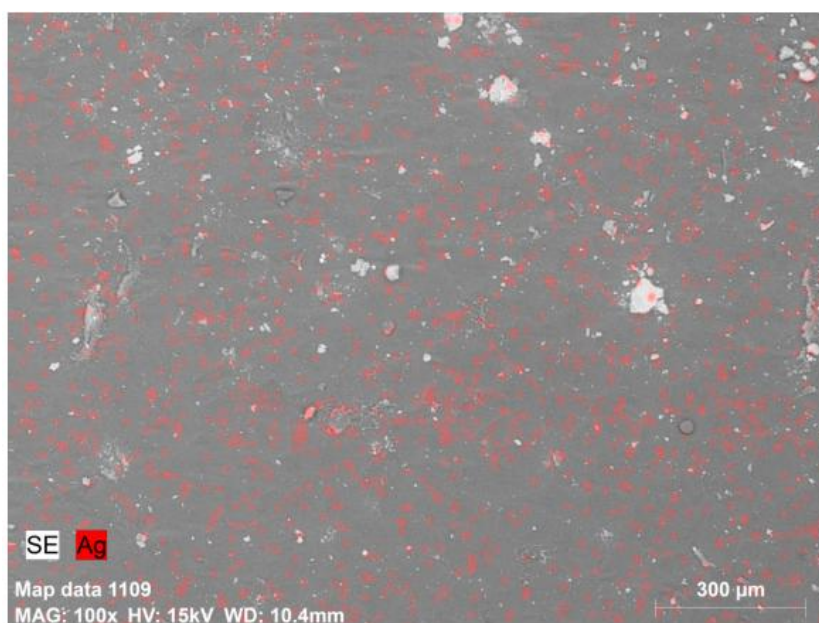


Figura 4.2.20 Distribución específica del elemento Ag en la hoja funcionalizada con Ag/AgCl.

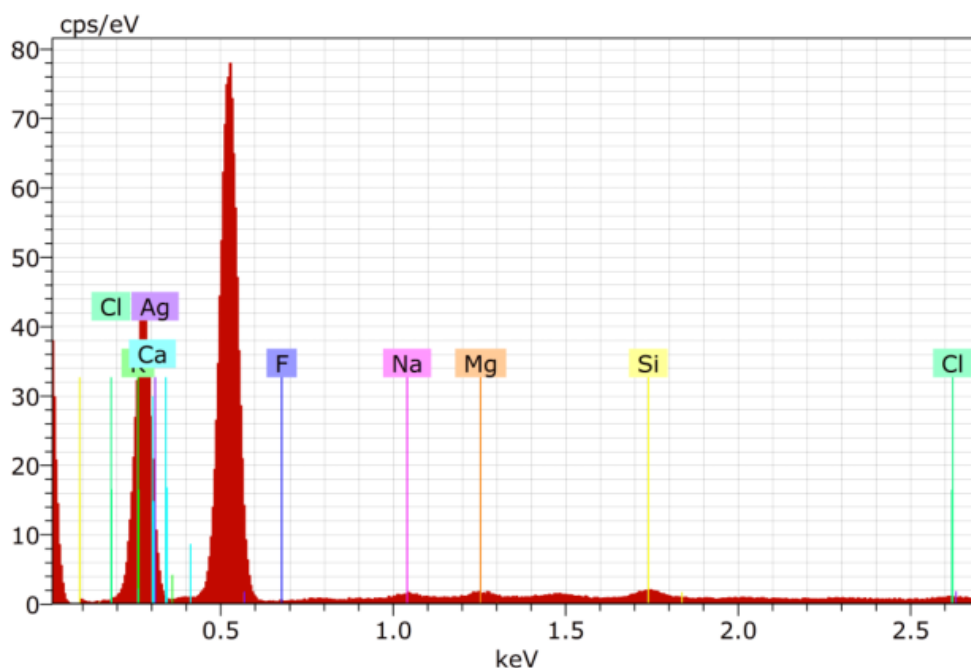


Figura 4.2.21 Espectro EDX de la hoja funcionalizada con Ag/AgCl de *Epipremnum aureum*.

Tabla 4.2.4 Composición elemental (EDX) de la hoja funcionalizada con Ag/AgCl de *Epipremnum aureum*.

Elemento	Contenido sin normalizar (wt. %)	Contenido normalizado (wt. %)
Potasio	2.33	36.35
Flúor	0.28	4.42
Calcio	0.92	14.3
Sodio	0.67	10.4
Silicio	0.92	14.32
Magnesio	0.68	10.63
Cloro	0.49	7.63
Plata	0.12	1.94
Total	6.41	100

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al tallo funcionalizado con nanopartículas de Ag/AgCl, cuyo análisis se realizó mediante cortes longitudinales y transversales

con el fin de evaluar la presencia, distribución y posible integración del nanomaterial en las estructuras internas del tejido vegetal. Las observaciones se obtuvieron empleando microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) acoplada con análisis elemental por dispersión de rayos X (EDX).

En la *figura 4.2.22*, se muestra la micrografía ESEM del corte longitudinal del tallo funcionalizado, donde se observa una distribución superficial de nanopartículas en la epidermis y zonas intercelulares. Los dominios brillantes, característicos de materiales de alta densidad electrónica, son indicativos de la presencia de plata y cloruro de plata. La estructura del tejido permanece compacta y sin deformaciones evidentes, lo que sugiere que el proceso de funcionalización no alteró la morfología natural del tallo.

La *figura 4.2.23* corresponde al corte transversal del mismo tallo, en la que se aprecia la organización interna de los tejidos vasculares y la posible acumulación de nanopartículas en los canales de conducción (xilema y floema). La distribución de los agregados metálicos parece concentrarse en la periferia de los vasos, lo que podría estar asociado a la absorción radicular y al transporte ascendente del nanomaterial a través del sistema vascular.

Las *figuras 4.2.24 y 4.2.25* presentan el análisis elemental obtenido por EDX para la región longitudinal del tallo. En la *figura 4.2.24*, el mapa global de distribución elemental revela la presencia de los elementos K, Ca, Na, Cl, Si, Mg y Ag, que corresponden tanto a los constituyentes naturales del tejido vegetal como a los elementos del nanomaterial. En particular, la *figura 4.2.25* resalta la localización específica del Ag, mostrando una dispersión homogénea con zonas de mayor concentración cerca de las superficies externas del tejido. Este patrón sugiere que las nanopartículas de Ag/AgCl se fijaron de manera preferencial en las capas externas y parcialmente en las regiones vasculares, manteniendo su integridad y sin penetrar en exceso en la matriz celular.

En la *figura 4.2.26*, se presenta el espectro EDX correspondiente al corte longitudinal, donde se observan los picos característicos de los elementos detectados. Destaca la señal intensa de Ag, junto con la de Cl, que confirma la presencia del nanomaterial depositado y su estabilidad estructural en el tejido vegetal. La intensidad relativa de estos picos es coherente con las proporciones registradas en los mapas elementales y refuerza la evidencia de una distribución estable de las nanopartículas.

Finalmente, la *Tabla 4.2.5* resume la composición elemental cuantitativa expresada en porcentaje en peso (wt.%), tanto sin normalizar como normalizada. Los valores muestran una proporción significativa de Ag (~2–3%), acompañada de elementos propios del tejido vegetal (K, Ca, Si, Mg, Na). Esta proporción indica una retención parcial del nanomaterial en el tallo, probablemente favorecida por la interacción electrostática entre las nanopartículas y los componentes lignocelulósicos de la pared celular.

En conjunto, los resultados obtenidos mediante ESEM y EDX confirman que el tallo actúa como vía de transporte y depósito temporal para las nanopartículas de Ag/AgCl. La presencia del material metálico en regiones vasculares y superficiales sugiere un proceso de adsorción selectiva sin disrupción morfológica. Estos hallazgos concuerdan con los resultados observados en hoja y raíz, demostrando la compatibilidad estructural del material funcionalizante con el tejido vegetal y su potencial estabilidad dentro del sistema biológico bajo condiciones controladas.

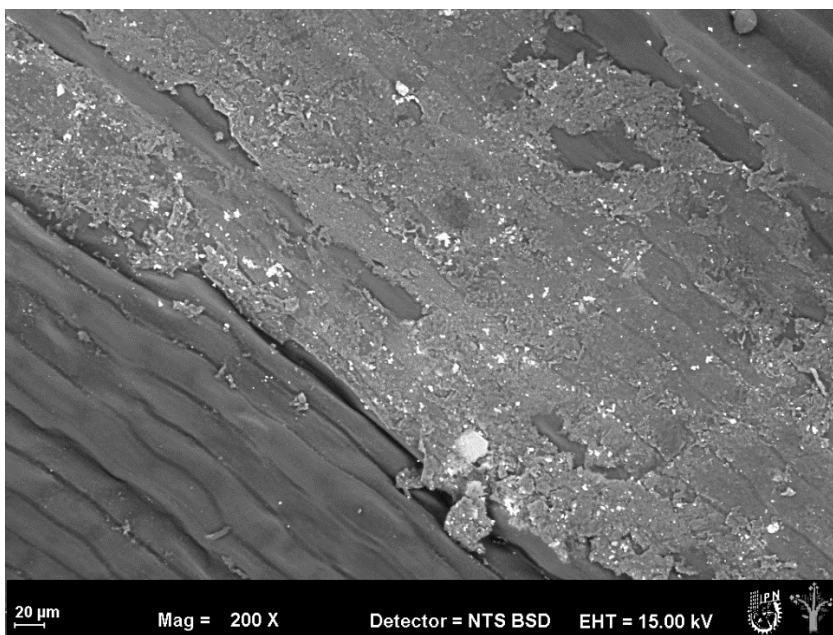


Figura 4.2.22 Micrografía ESEM del corte longitudinal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl de Epipremnum aureum.

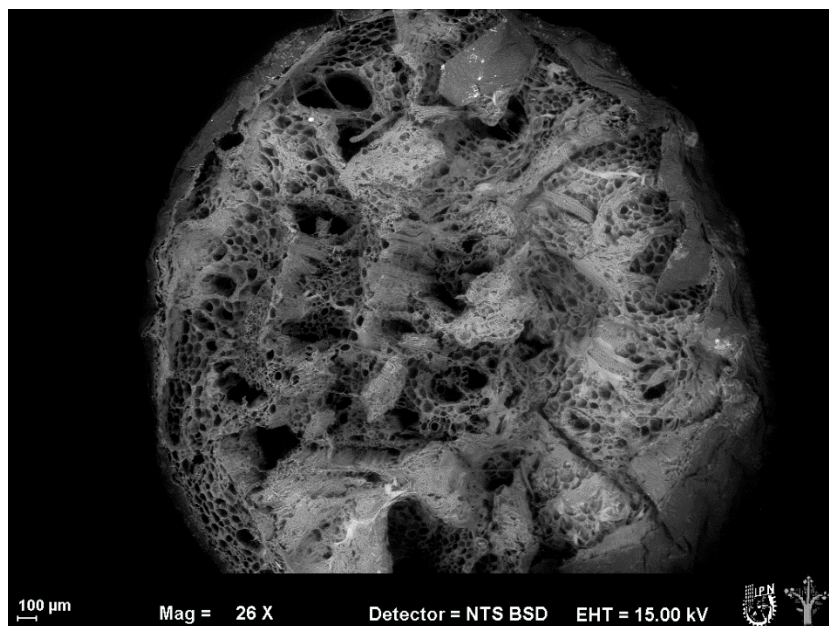


Figura 4.2.23 Micrografía ESEM del corte transversal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl.

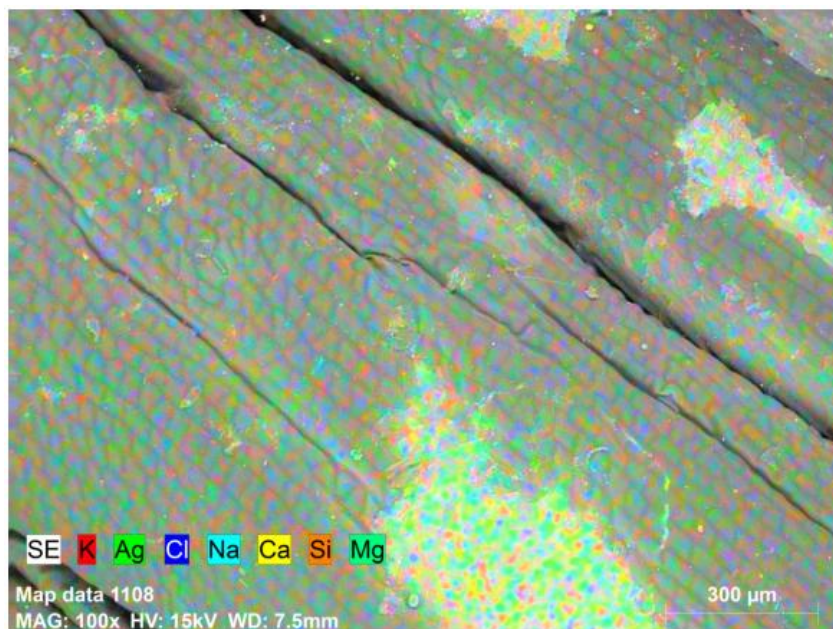


Figura 4.2.24 Distribución elemental (EDX) del corte longitudinal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl (análisis global).

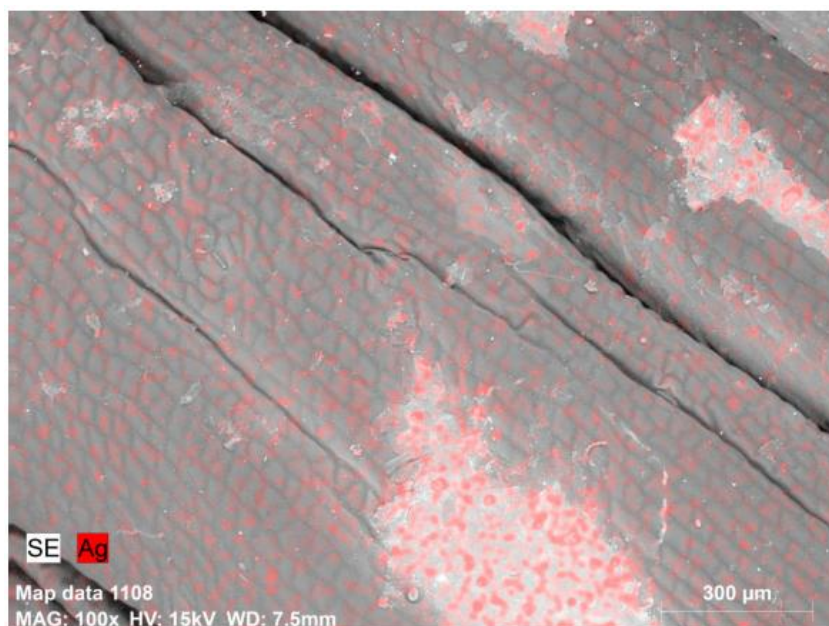


Figura 4.2.25 Distribución elemental (EDX) específica del elemento Ag en el corte longitudinal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl.

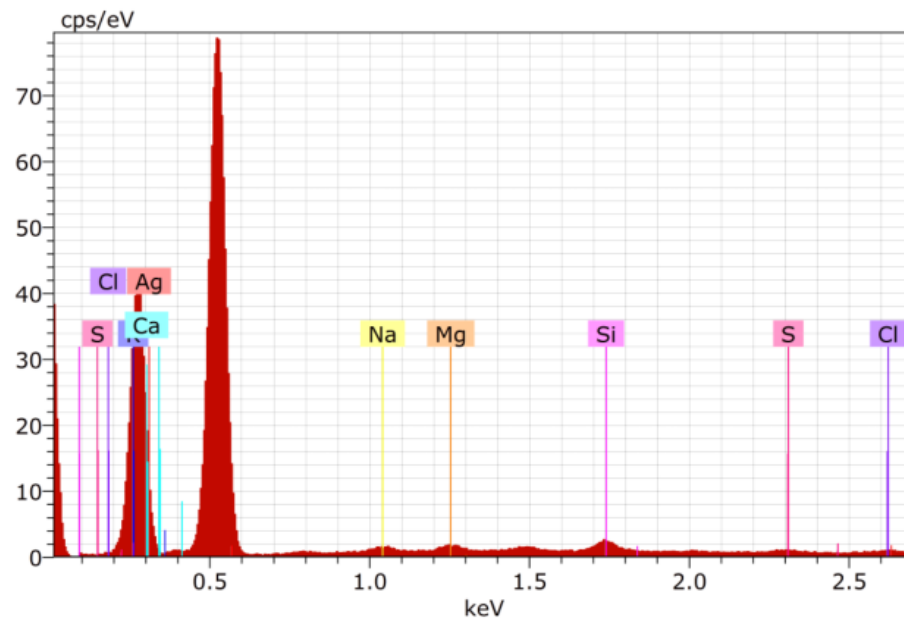


Figura 4.2.26 Espectro EDX del corte longitudinal del tallo funcionalizado con Ag/AgCl.

Tabla 4.2.5 Composición elemental (EDX) del tallo funcionalizado con Ag/AgCl de *Epipremnum aureum*.

Elemento	Contenido sin normalizar (wt. %)	Contenido normalizado (wt. %)
Potasio	2.19	29.23
Calcio	1.2	16.04
Silicio	1.28	17.02
Sodio	0.74	9.82
Magnesio	0.8	10.71
Cloro	0.55	7.32
Azufre	0.45	5.97
Plata	0.29	3.88
Total	7.5	100

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al análisis morfológico y elemental de la raíz funcionalizada con nanopartículas de Ag/AgCl, con el propósito de evaluar la distribución, retención y posible interacción del material metálico dentro del tejido radicular de *Epipremnum aureum*. Los estudios se realizaron mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y análisis por dispersión de rayos X (EDX), en cortes longitudinales y transversales de la muestra.

En la *figura 4.2.27*, se observa la micrografía ESEM correspondiente al corte longitudinal de la raíz funcionalizada. Se distinguen regiones con acumulación superficial de nanopartículas en la epidermis y en las capas externas del tejido, evidenciadas por zonas brillantes de alta densidad electrónica. Estas áreas se asocian con la deposición del nanomaterial sobre la pared celular externa, lo que indica un proceso de adsorción preferencial más que una penetración profunda en la matriz radicular. La morfología general del tejido se mantiene estable, sin indicios de daño o colapso estructural, lo que sugiere una buena compatibilidad físico-química entre la superficie vegetal y las nanopartículas de Ag/AgCl.

La *figura 4.2.28*, correspondiente al corte transversal, muestra con mayor detalle la estructura interna porosa y la disposición de los vasos radiculares, en los cuales también se detectan señales localizadas de material metálico. Esta distribución indica que, además de la fijación superficial, el nanomaterial alcanzó parcialmente las zonas internas del sistema vascular, posiblemente a través del flujo capilar durante la exposición en medio acuoso. Este comportamiento confirma que la raíz actúa como principal punto de ingreso y retención de las nanopartículas dentro de la planta.

En la *figura 4.2.29*, se presenta el mapa elemental global (EDX) del corte transversal, donde se identifican los elementos N, K, Ca, Na, Cl, Ag, Mg, Si, P y S. La distribución homogénea de los elementos mayoritarios (C, O, N, Ca, K) corresponde a la composición natural del tejido, mientras que las señales discretas de Ag y Cl confirman la presencia localizada del material funcionalizante.

La *figura 4.2.30* muestra el mapa elemental específico del Ag, en el cual se evidencia una distribución no uniforme pero bien definida del metal, concentrándose principalmente en las regiones periféricas y en torno a los canales vasculares. Esta localización sugiere que las nanopartículas se retuvieron preferentemente en las zonas de transporte activo, reforzando la hipótesis de un movimiento ascendente limitado del material metálico a través del xilema.

El espectro EDX correspondiente (*figura 4.2.31*) presenta los picos característicos de Ag (~3 keV) junto con los de Ca, K, Cl, y otros elementos traza propios del tejido vegetal. La señal de plata confirma la presencia estable del material funcionalizante en la raíz y concuerda con los resultados obtenidos en las distribuciones elementales.

Finalmente, la *Tabla 4.2.6* muestra la composición elemental cuantitativa de la muestra expresada en porcentaje en peso (wt.%), tanto sin normalizar como normalizada. Se observa una proporción significativa de Ag (≈ 4 % normalizado) acompañada de niveles apreciables de K, Ca, Na y Cl, elementos esenciales de la matriz biológica. La presencia conjunta de Ag y Cl confirma la estabilidad química del sistema Ag/AgCl dentro del tejido radicular, mientras que el equilibrio de los elementos mayoritarios refleja que no se produjeron alteraciones sustanciales en la composición natural del tejido tras la exposición.

En conjunto, los resultados obtenidos mediante ESEM-EDX demuestran que las nanopartículas de Ag/AgCl se adsorbieron y distribuyeron de forma controlada en la raíz, actuando este órgano como un filtro natural capaz de retener y estabilizar el material funcionalizante. Esta observación, coherente con lo visto en hoja y tallo, evidencia la capacidad de *Epipremnum aureum* para interactuar con materiales metálicos sin pérdida estructural ni alteración morfológica significativa, lo que refuerza su potencial como sistema biohospedero funcional para aplicaciones de biotecnología y materiales híbridos conductores.

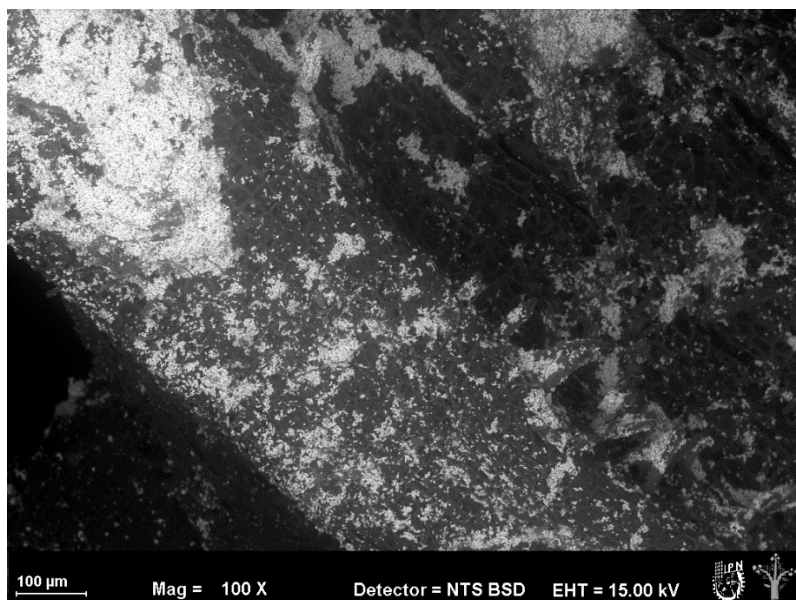


Figura 4.2.27 Micrografía ESEM del corte longitudinal de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl de *Epipremnum aureum*.

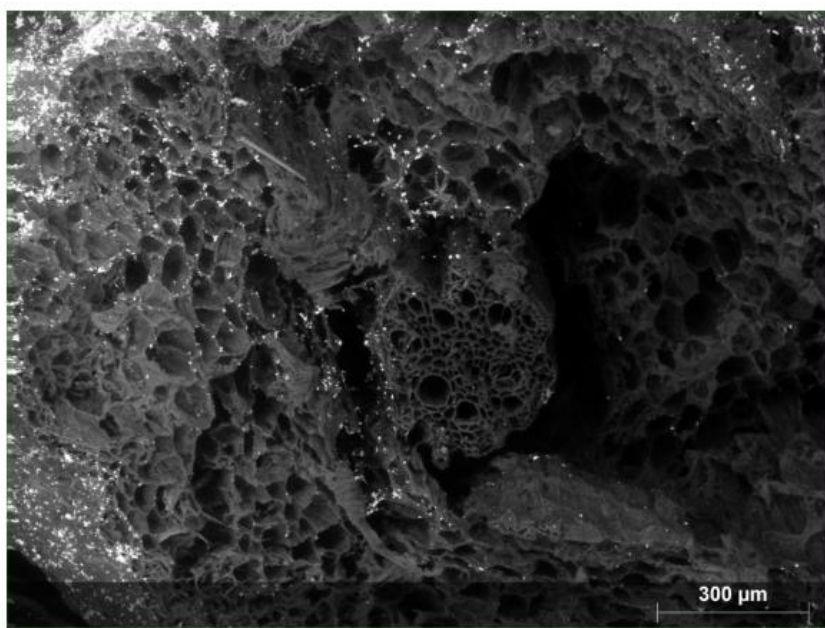


Figura 4.2.28 Micrografía ESEM del corte transversal de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl.

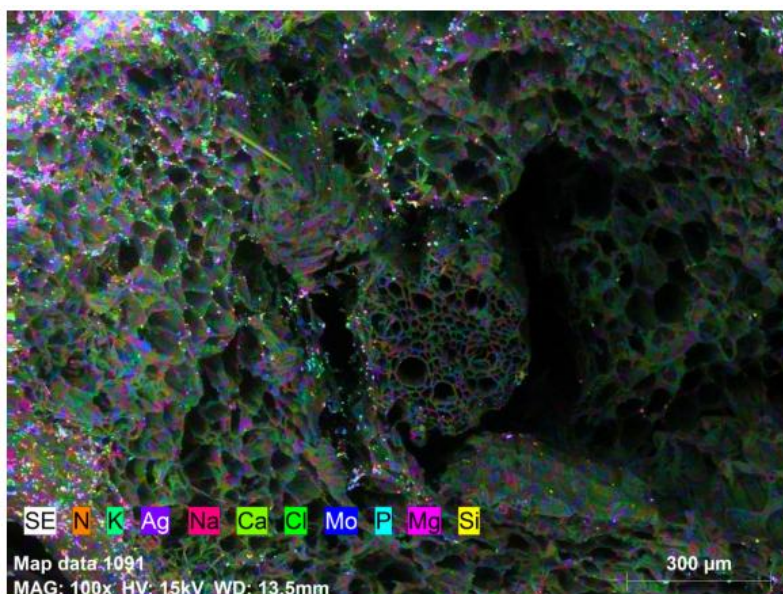


Figura 4.2.29 Mapa elemental EDX del corte transversal de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl, mostrando la distribución global de los elementos.

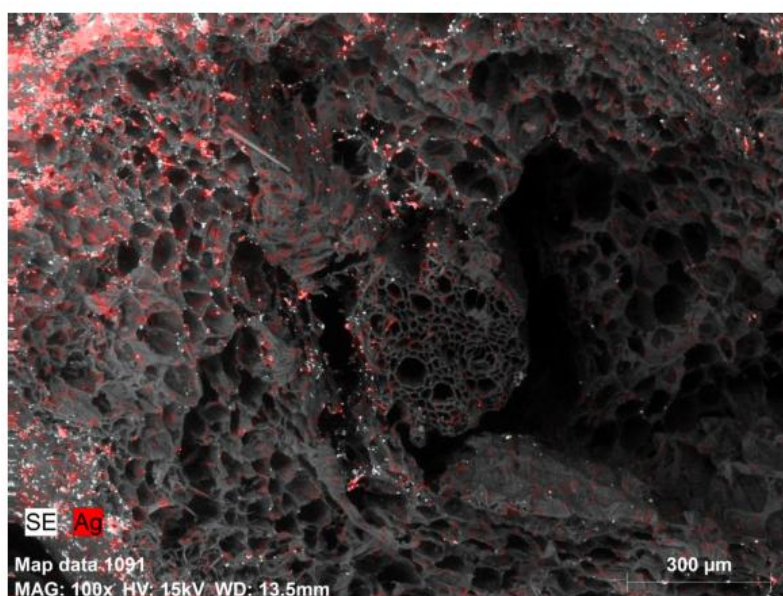


Figura 4.2.30 Mapa elemental EDX de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl resaltando la localización del elemento plata (Ag).

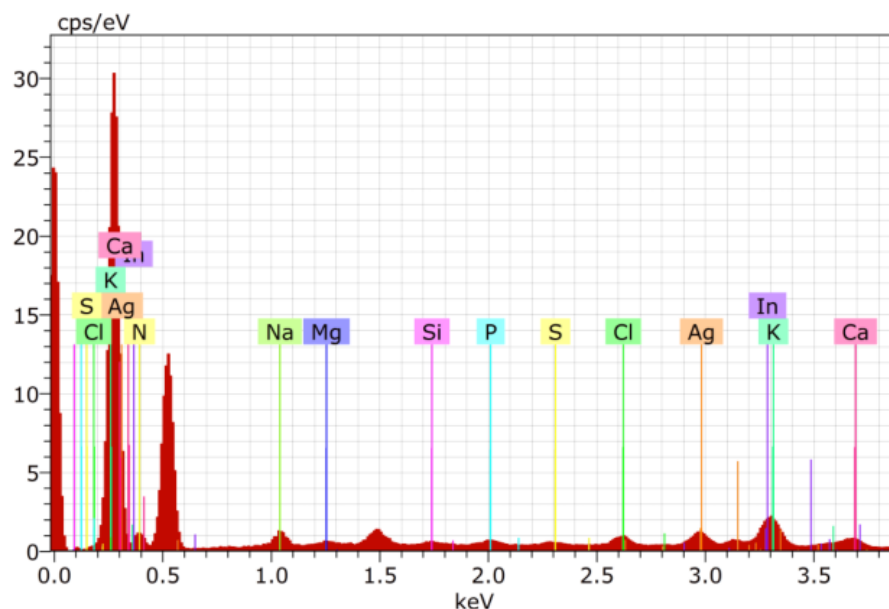


Figura 4.2.31 Espectro EDX correspondiente al corte transversal de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl.

Tabla 4.2.6 Composición elemental cuantitativa de la raíz funcionalizada con Ag/AgCl de *Epipremnum aureum*, expresada en porcentaje en peso (wt.%).

Elemento	Contenido normalizado (wt. %)	Contenido sin normalizar (wt. %)
Nitrógeno	0	0
Plata	4	26.27
Potasio	3.43	22.54
Indio	2.84	18.69
Calcio	1.84	12.09
Sodio	1.71	11.25
Cloro	0.78	5.11
Magnesio	0.27	1.79
Fósforo	0.2	1.3
Silicio	0.05	0.3
Azufre	0.1	0.66
Total	15.21	100

Estas técnicas permitieron evidenciar la formación de vías conductoras internas compuestas por nanopartículas y nanocelulosa, observables tanto desde el punto de vista morfológico como elemental. En conjunto, los resultados sugieren que ambos componentes se integraron de manera efectiva en la arquitectura interna de la planta, generando una estructura funcional con potencial para el transporte de carga eléctrica. Este comportamiento constituye la base para los análisis de caracterización eléctrica y electroquímica desarrollados en las siguientes etapas del estudio.

4.3. Caracterización eléctrica del sistema funcionalizado con material nanométrico y del sistema no funcionalizado

Se realizaron mediciones de voltaje de salida a lo largo de la vía formada por las nanopartículas de plata distribuidas en la planta (raíz–tallo y tallo–hoja). Para ello, se emplearon dos sondas de acero inoxidable de grado quirúrgico, estratégicamente colocadas para garantizar un contacto adecuado con el sistema vascular de la planta.

La *figura 4.3.1(A)* muestra la configuración experimental general utilizada para maximizar la precisión de las mediciones, mientras que la *figura 4.3.1(B)* presenta la conexión directa de los electrodos en el tallo de la planta.

Complementariamente, la *figura 4.3.2* ilustra el esquema de muestreo de conductividad, donde se indican los puntos de medición establecidos en la raíz (verde), el tallo (azul) y la hoja (rojo). Este diagrama resume la disposición experimental implementada para registrar la respuesta eléctrica en cada región del tejido vegetal, asegurando la reproducibilidad de los contactos y la estabilidad de la lectura.

Durante las mediciones, se observó un oscurecimiento progresivo en la vía conductora, asociado al flujo de corriente eléctrica a través de los tejidos funcionalizados. Además, se detectó oxidación en el electrodo que actuó como ánodo, lo que confirma la transferencia activa de electrones desde el ánodo hacia el cátodo, evidenciando la naturaleza conductora del sistema.

Se aplicó un voltaje de polarización de -1.5 a 1.5 V, utilizando resistencias de derivación de 1, 10, 100 y 1000 Ω para estudiar la relación corriente-voltaje (I-V). Los resultados experimentales mostraron un comportamiento lineal en todos los casos, lo que demuestra una conducción predominantemente óhmica a través de las vías internas formadas por las nanopartículas de plata.

Los resultados obtenidos para cada región de la planta se presentan en las *figuras 4.3.3 a 4.3.5*, correspondientes a hoja, tallo y raíz, respectivamente. En la *figura 4.3.3* se observa la respuesta I-V en la hoja, donde la presencia de nanopartículas de plata influye notablemente en la respuesta eléctrica conforme aumenta la resistencia de derivación. En la *figura 4.3.4*, correspondiente al tallo, se evidencia un comportamiento similar, mientras que en la *figura 4.3.5*, asociada a la raíz, se destaca la mejora significativa de la conductividad eléctrica atribuida al material funcionalizante.

Para analizar estadísticamente la presencia de diferencias en los voltajes de salida entre las regiones raíz-tallo (D_1) y tallo-hoja (D_2), se aplicó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, con un nivel de significancia del 5 %. Los resultados obtenidos, presentados en la *Tabla 4.3.1*, muestran valores de p superiores al umbral de significancia (6.50×10^{-1} para raíz-tallo y 6.57×10^{-2} para tallo-hoja). Esto indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las regiones analizadas, lo que sugiere una distribución homogénea de las nanopartículas a lo largo del sistema vascular.

En conjunto, estos resultados evidencian la formación de una red eléctrica continua y funcional dentro del sistema vegetal, caracterizada por un comportamiento lineal, estable y reproducible bajo diferentes condiciones de carga. Las nanopartículas metálicas demostraron una integración efectiva en el tejido vascular, modificando las propiedades eléctricas intrínsecas de la planta y favoreciendo la creación de rutas internas de transporte electrónico. Este comportamiento confirma el potencial del sistema funcionalizado como plataforma bioelectrónica vegetal, capaz de responder a estímulos eléctricos y de servir para el monitoreo y manipulación de variables ambientales y fisiológicas.

Tabla 4.3.1 Resultados del análisis estadístico mediante la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para comparar los voltajes de salida entre las regiones raíz-tallo (D_1) y tallo-hoja (D_2) del sistema vegetal funcionalizado.

Comparación	N. Muestras	Rango promedio	p-valor
-------------	-------------	----------------	---------

Raíz vs Tallo (D1)	Rangos negativos: 358	349.45	6.50E-01
Figura 3.5.4	Rangos positivos: 342	351.6	
	Empates: 0	Total: 700	
Tallo vs Hoja (D2)	Rangos negativos: 371	357.21	6.57E-02
Figura 3.5.4	Rangos positivos: 329	342.93	
	Empates: 0	Total: 700	

Nota: No se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$).

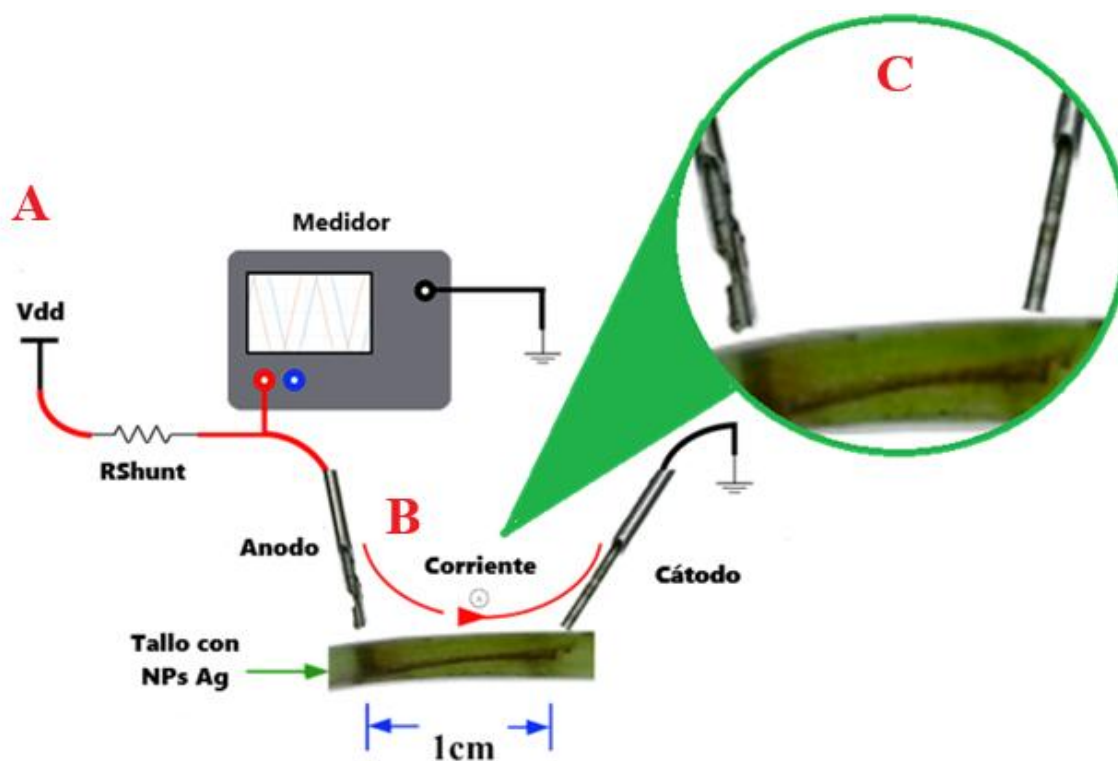


Figura 4.3.1 (A) Configuración experimental empleada para la medición de voltaje y corriente en el sistema vegetal funcionalizado con nanopartículas de Ag/AgCl.

(B) Conexión directa de los electrodos de acero inoxidable en el tallo de *Epipremnum aureum* durante la prueba de conductividad.

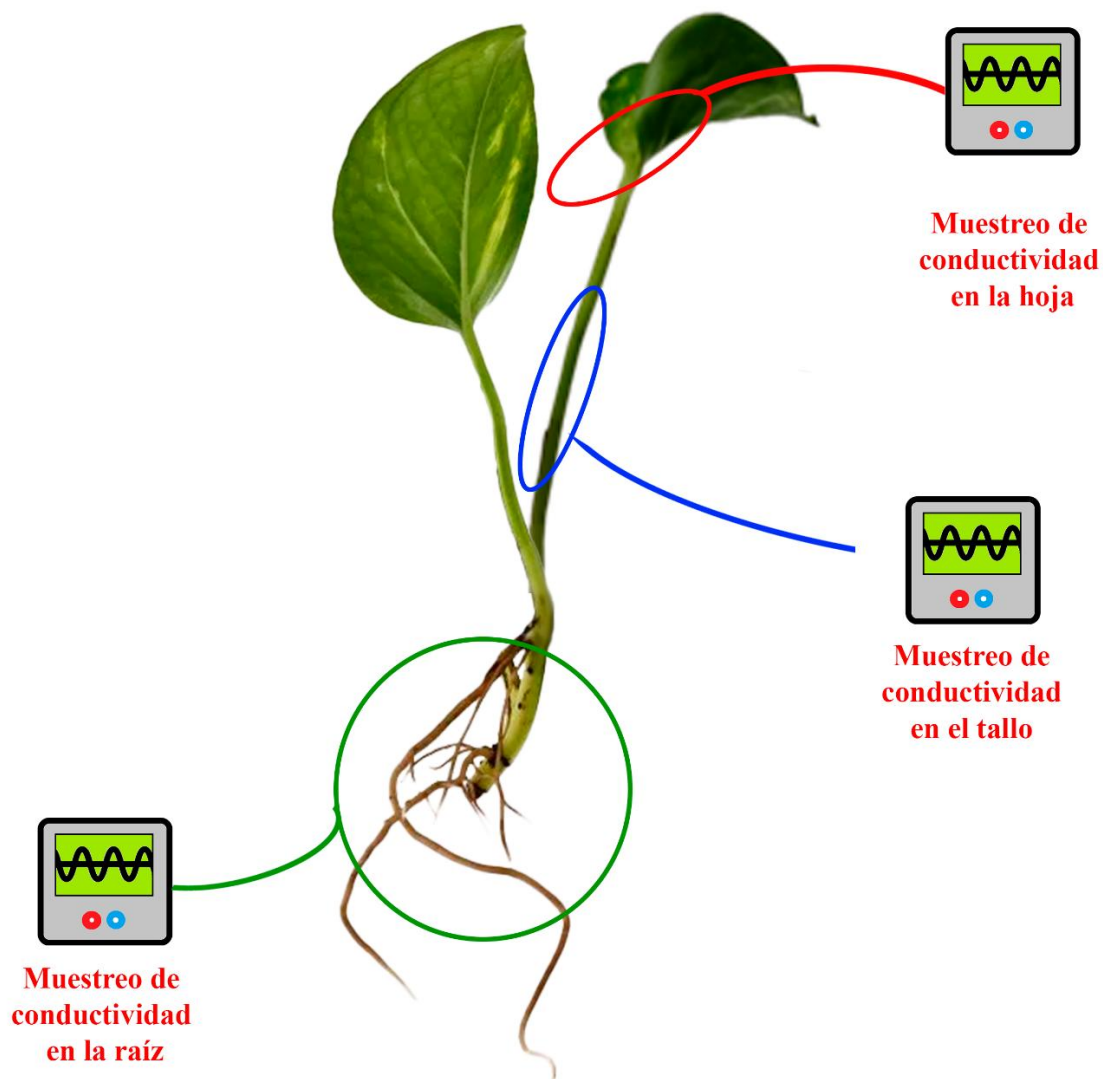


Figura 4.3.2 Esquema de muestreo de conductividad. Puntos de medición en raíz (verde), tallo (azul) y hoja (rojo), con equipo conectado para evaluar el flujo de corriente facilitado por las nanopartículas de plata en el sistema vascular.

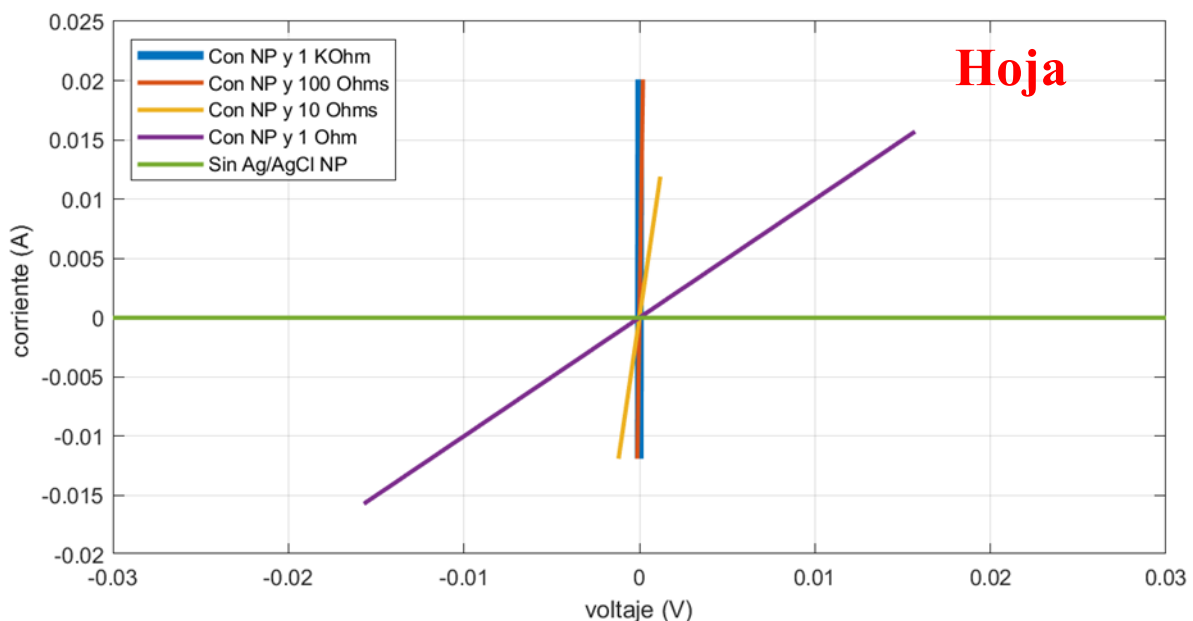


Figura 4.3.3 Curvas corriente-voltaje (I - V) obtenidas en la hoja de *Epipremnum aureum*. Se observa la influencia de las nanopartículas de Ag/AgCl en la respuesta eléctrica al variar la resistencia de derivación (1, 10, 100 y 1000 Ω).

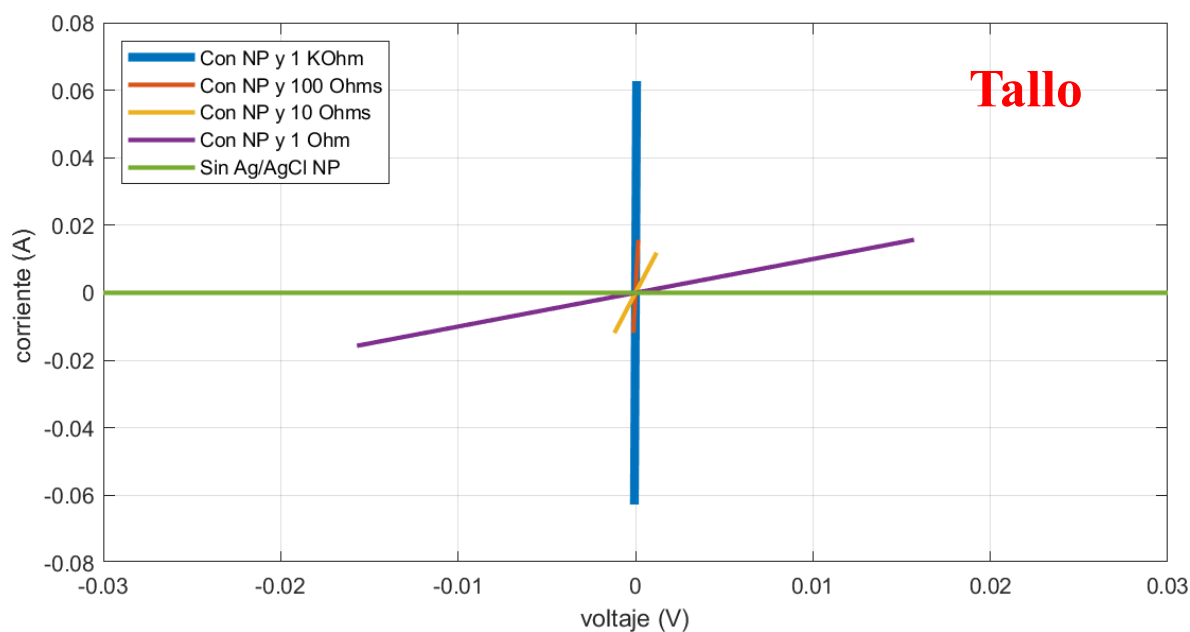


Figura 4.3.4 Curvas corriente-voltaje (I - V) correspondientes al tallo de *Epipremnum aureum* funcionalizado con nanopartículas de Ag/AgCl. Se evidencia un comportamiento lineal característico de conducción óhmica estable.

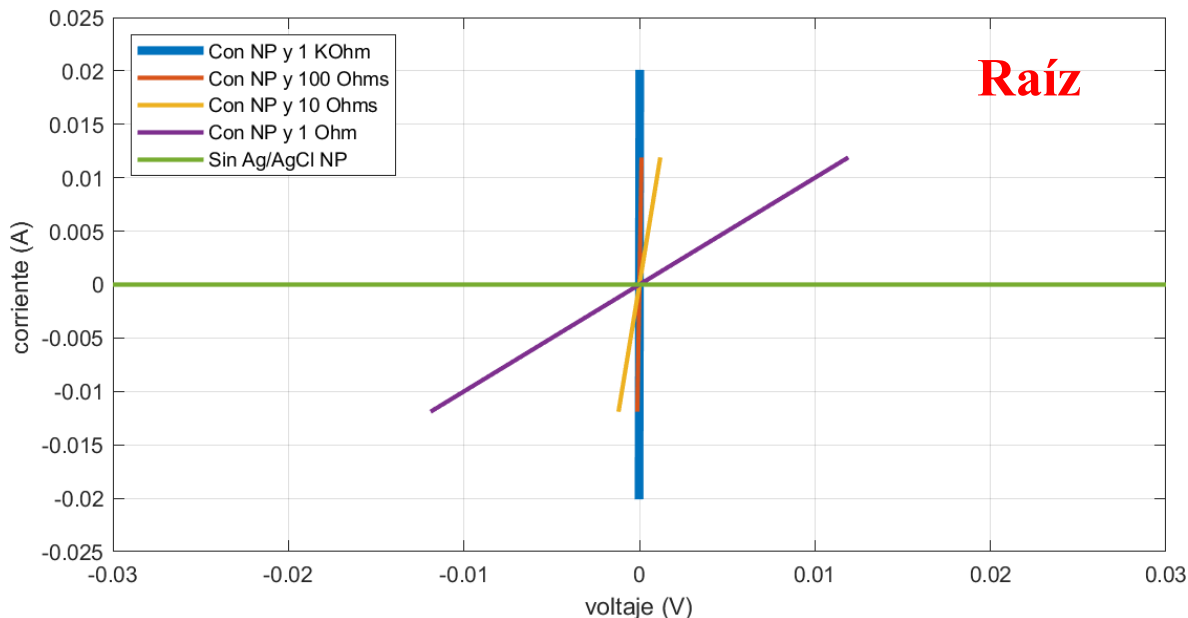


Figura 4.3.5 Curvas corriente-voltaje (I-V) obtenidas en la raíz del sistema vegetal funcionalizado con nanopartículas de Ag/AgCl, mostrando una mejora en la conductividad eléctrica en comparación con la planta no funcionalizada.

Después de analizar las curvas corriente-voltaje obtenidas en las regiones de hoja, tallo y raíz, se realizaron pruebas de resistencia a la polarización con el objetivo de comprender los eventos electroquímicos involucrados y evaluar la eficiencia del sistema en términos de capacidad del electrolito. Estas pruebas permitieron examinar la respuesta del sistema bajo distintas condiciones de resistencia de derivación, brindando información relevante sobre los mecanismos de conducción y las interacciones electroquímicas presentes.

El análisis de estos resultados se fundamentó en la Ley de Faraday de la electrólisis, la cual establece la relación entre la cantidad de masa depositada o recuperada sobre un electrodo y la magnitud de la corriente eléctrica que circula por el sistema. Este principio teórico es esencial para comprender los procesos de transferencia de carga y masa en sistemas bioelectroquímicos.

En este contexto, se cuantificó la densidad de corriente y la cantidad de material recuperado por unidad de área y tiempo, considerando las variaciones de las resistencias de derivación utilizadas en el experimento. Las resistencias seleccionadas (1, 10, 100 y 1000 Ω) no solo regularon el flujo de corriente en el circuito, sino que también permitieron identificar los rangos óptimos de operación que maximizan la eficiencia del sistema.

La *figura 4.3.6* presenta las curvas de polarización obtenidas bajo las distintas resistencias de derivación, donde se observa una respuesta estable y lineal que confirma el comportamiento óhmico del sistema. Este resultado evidencia la adecuada integración de las nanopartículas metálicas en la estructura vascular, que actúan como mediadores en el transporte electrónico.

Por su parte, la *figura 4.3.7* muestra la variación de la densidad de corriente en función del potencial aplicado, permitiendo visualizar cómo el incremento de la resistencia de derivación modifica la pendiente de la curva, asociada con la capacidad de conducción del sistema funcionalizado.

Finalmente, la *Tabla 4.3.2* resume los valores obtenidos de densidad de corriente y masa recuperada por unidad de área y tiempo, calculados con base en la Ley de Faraday. Estos datos permiten estimar la eficiencia de transferencia de carga y cuantificar la respuesta electroquímica del sistema vegetal bajo diferentes condiciones de operación.

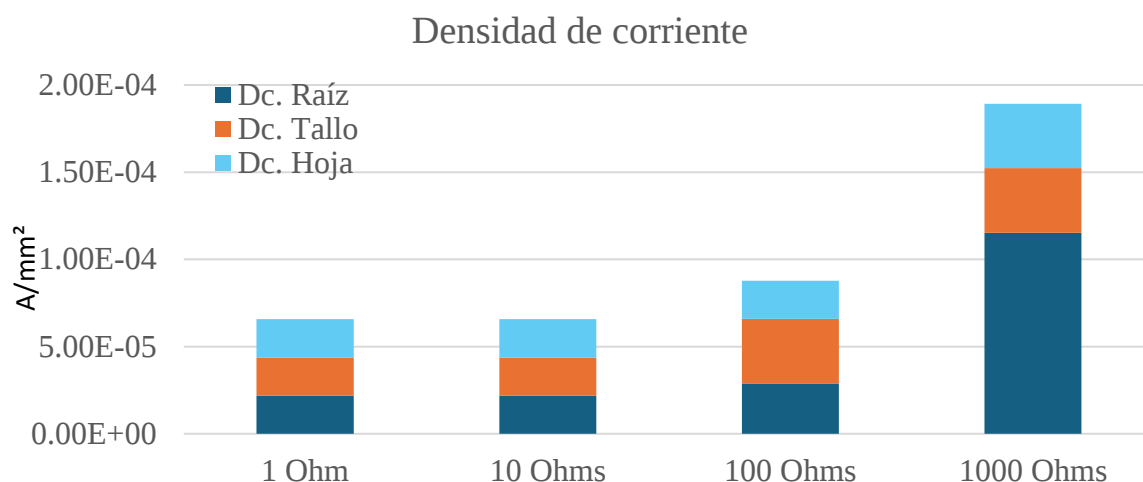


Figura 4.3.6 Densidad de carga obtenida con diferentes resistencias en derivación.

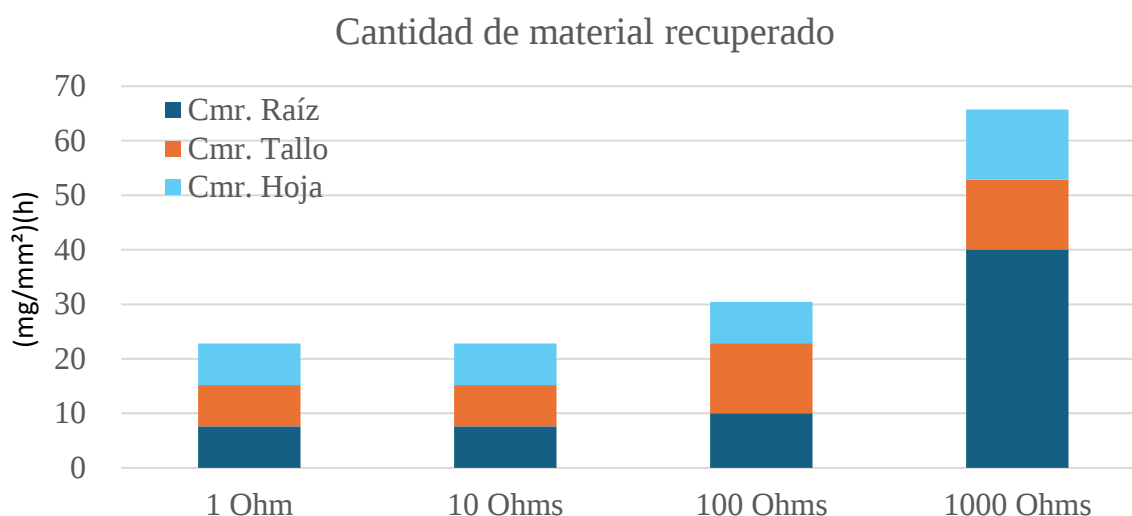


Figura 4.3.7 Cantidad de material recuperado en mg/mm^2 por hora.

Estas gráficas permiten visualizar de manera comparativa el comportamiento del sistema en función de las resistencias de derivación aplicadas y la distribución espacial de la respuesta electroquímica en las regiones de raíz, tallo y hoja. Se observa que las mayores densidades de corriente y las mayores cantidades de material recuperado se registraron con la resistencia de 1000 ohmios, lo que sugiere que bajo estas condiciones el sistema funcionalizado alcanza su máximo rendimiento electroquímico.

4.4. Respuesta eléctrica a variaciones de temperatura

La configuración experimental utilizada para evaluar la respuesta eléctrica del sistema funcionalizado ante estímulos térmicos se muestra en la *figura 4.4.1*. En este montaje se utilizó una tarjeta DAQ USB-6000, la cual se comunicó con la computadora mediante un script (programa automatizado escrito en Python que ejecuta instrucciones de manera secuencial) desarrollado específicamente para realizar la adquisición de datos en tiempo real. Esta plataforma permitió registrar de manera simultánea variables clave como voltaje, corriente, flujo de corriente y temperatura, bajo condiciones de operación controladas. Para regular el flujo de corriente y analizar su relación con la respuesta eléctrica del sistema vascular, se implementaron resistencias de derivación con valores de 1, 10, 100 y 1000 ohmios. El dispositivo experimental incluyó como

elemento central a una planta de *Epipremnum aureum*, cuya señal eléctrica y respuesta térmica fueron evaluadas mediante electrodos colocados estratégicamente en el sistema vascular.

El análisis teórico se fundamentó en la Ley de Faraday de la electrólisis, que permitió correlacionar la masa depositada en los electrodos con la intensidad de corriente generada. Estas mediciones posibilitaron la generación de gráficas de voltaje vs. tiempo, corriente vs. tiempo, flujo de corriente vs. tiempo y temperatura vs. tiempo, aportando información detallada sobre el comportamiento del sistema funcionalizado bajo estímulos térmicos controlados.

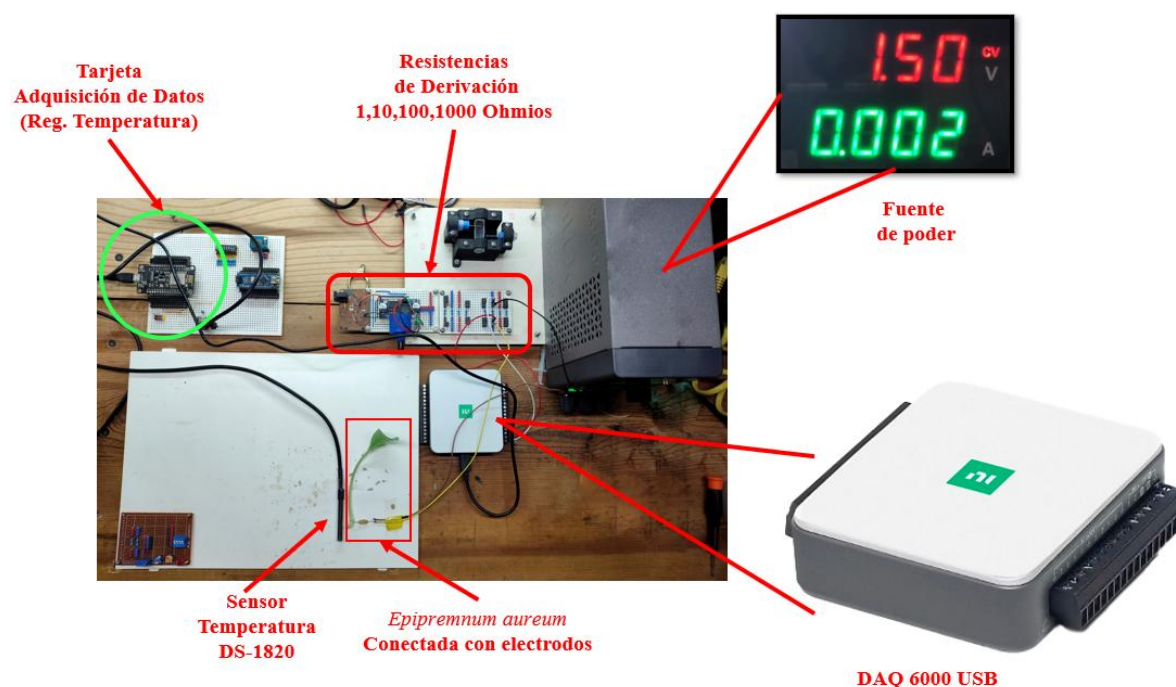


Figura 4.4.1 Configuración experimental para evaluar la respuesta eléctrica y térmica en *Epipremnum aureum*. Incluye la tarjeta DAQ USB-6000, el sensor DS18B20, resistencias de derivación y electrodos conectados al tallo.

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas, clasificadas en cuatro categorías: voltaje vs. tiempo (figuras 4.4.2 a 4.4.5), corriente vs. tiempo (figuras 4.4.6 a 4.4.9), flujo de corriente vs. tiempo (figuras 4.4.10 a 4.4.13) y temperatura vs. tiempo (figuras 4.4.14 a 4.4.17), correspondientes a las resistencias de derivación de 1 Ω , 10 Ω , 100 Ω y 1000 Ω . Cada categoría compara el comportamiento del sistema funcionalizado con nanopartículas de plata (NP) respecto al sistema sin nanopartículas, permitiendo evaluar la influencia de las NP en la respuesta eléctrica y térmica de la planta. Estas mediciones se realizaron bajo condiciones experimentales controladas, lo que

garantiza la confiabilidad de los resultados. Los gráficos obtenidos aportan información valiosa sobre la conductividad eléctrica y la dinámica de transferencia de carga en el sistema vascular funcionalizado, destacando las diferencias atribuibles a la presencia de nanopartículas y su impacto en el comportamiento del sistema.

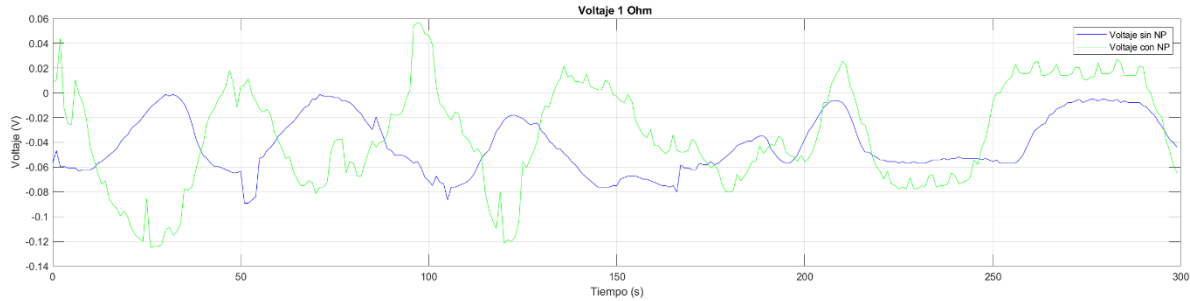


Figura 4.4.2 Voltaje vs. tiempo, 1Ω

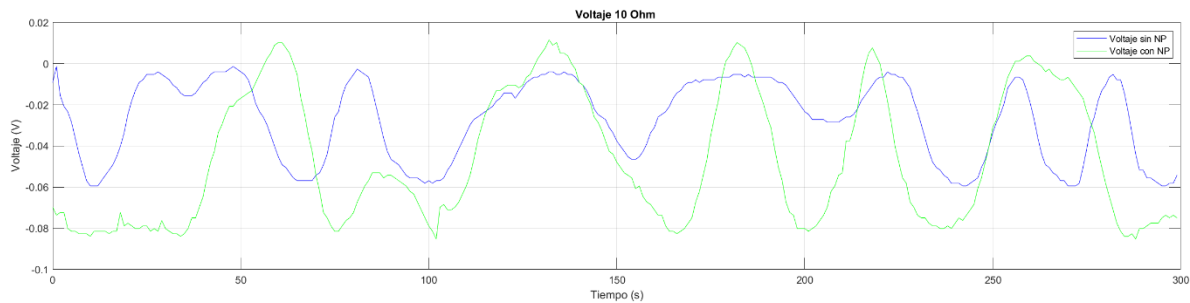


Figura 4.4.3 Voltaje vs. tiempo, 10Ω

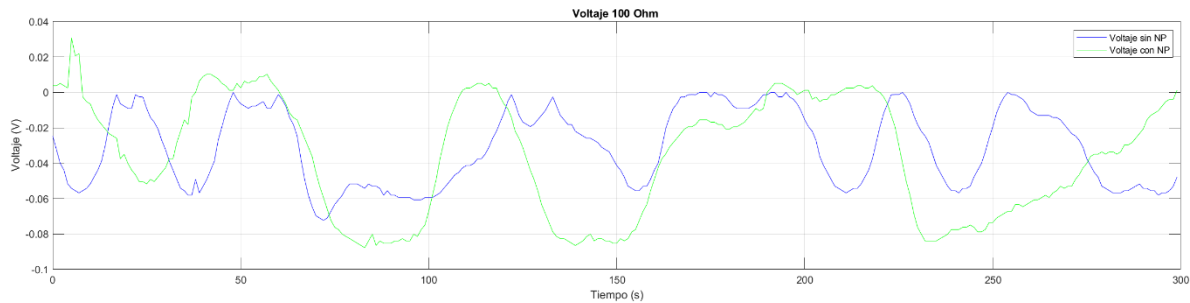


Figura 4.4.4 Voltaje vs. tiempo, 100Ω

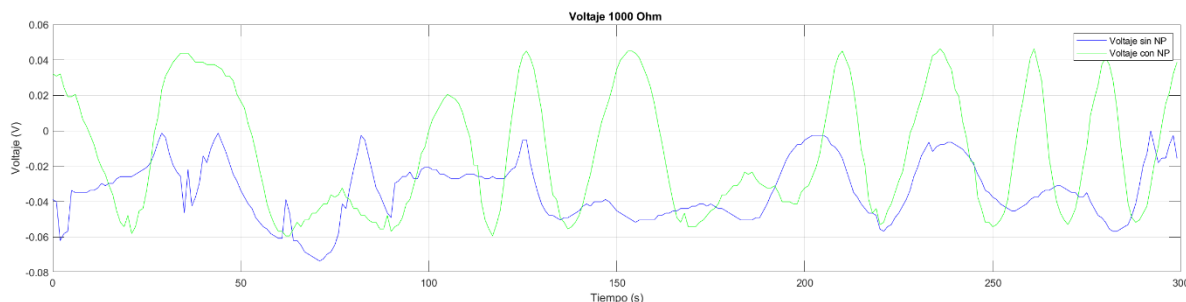


Figura 4.4.5 Voltaje vs. tiempo, 1000 Ω

4.4.1. Análisis de voltaje vs. tiempo (Figuras 4.4.2–4.4.5)

En las figuras 4.4.2 a 4.4.5 se observa la evolución temporal del voltaje registrado bajo diferentes resistencias de derivación. Las señales muestran una variación periódica con estabilidad progresiva a medida que aumenta la resistencia externa. Este comportamiento se asocia con la regulación del flujo de corriente dentro del sistema vascular funcionalizado, donde las nanopartículas de plata actúan como centros de transferencia electrónica.

El incremento en la amplitud de la señal para la resistencia de 1000 Ω indica una acumulación de carga más eficiente y una menor disipación energética, lo que sugiere la presencia de una red conductora interna consolidada. De este modo, el sistema vegetal funcionalizado evidencia un transporte de carga regulado y coherente con el comportamiento óhmico descrito en la Sección 4.3, validando la efectividad del proceso de inmersión radicular para generar continuidad eléctrica en el tejido.



Figura 4.4.6 Corriente vs. tiempo, 1 Ω

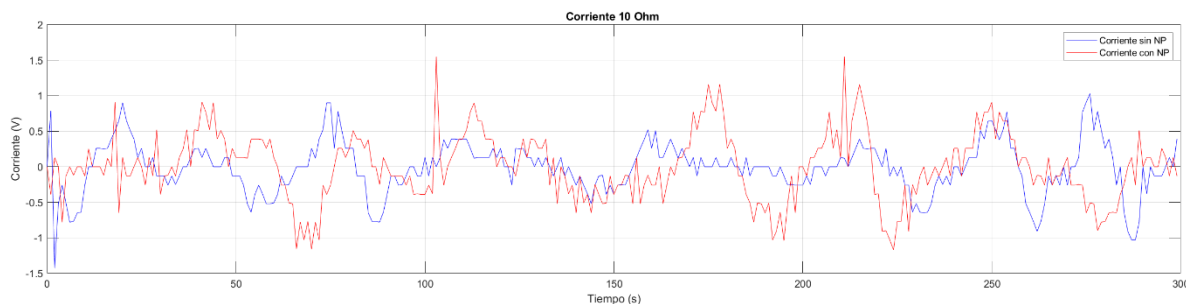


Figura 4.4.7 Corriente vs. tiempo, 10 Ω

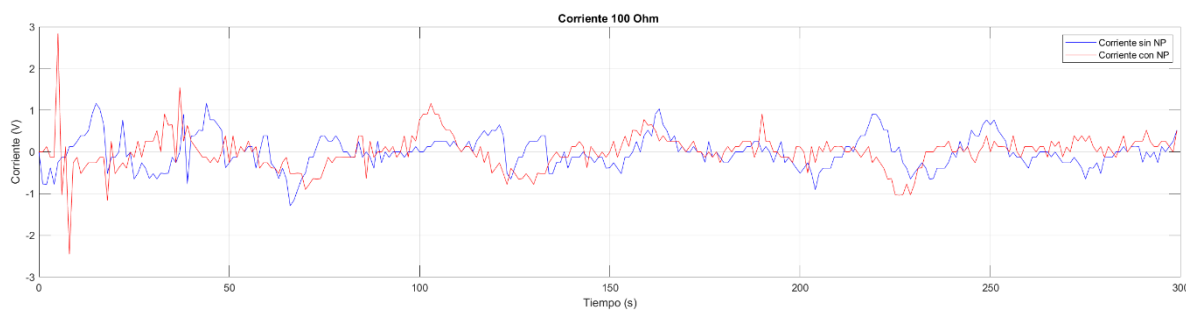


Figura 4.4.8 Corriente vs. tiempo, 100 Ω

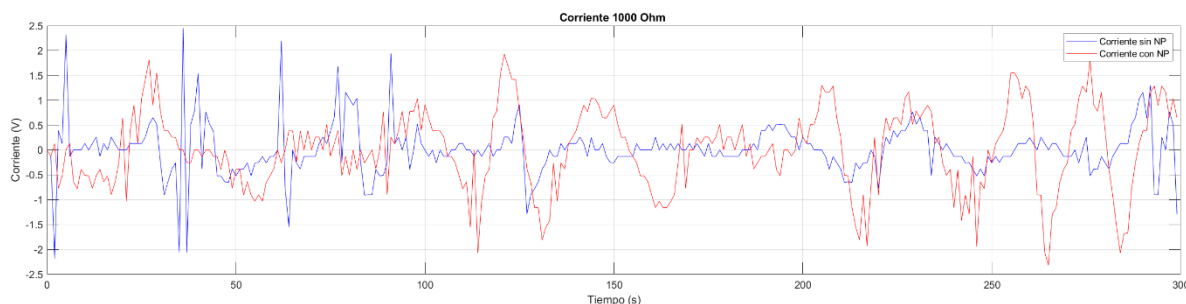


Figura 4.4.9 Corriente vs. tiempo, 1000 Ω

4.4.2. Análisis de corriente vs. tiempo (Figuras 4.4.6–4.4.9)

Las figuras 4.4.6 a 4.4.9 muestran la respuesta dinámica de la corriente en función del tiempo para cada valor de resistencia de derivación. A bajas resistencias (1 y 10 Ω), se observan fluctuaciones intensas en la señal debidas a la rápida transferencia de carga entre las nanopartículas y los electrolitos naturales presentes en los tejidos. A medida que la resistencia aumenta (100 y 1000 Ω), el patrón de corriente se estabiliza, indicando un equilibrio entre la movilidad electrónica y la polarización de los electrodos. Este

comportamiento evidencia un control más eficiente del transporte de electrones dentro del sistema, atribuible a la distribución homogénea de las nanopartículas en el sistema vascular. Así, el material funcionalizante no solo incrementa la conductividad del tejido vegetal, sino que también modula la respuesta eléctrica bajo diferentes condiciones de carga.

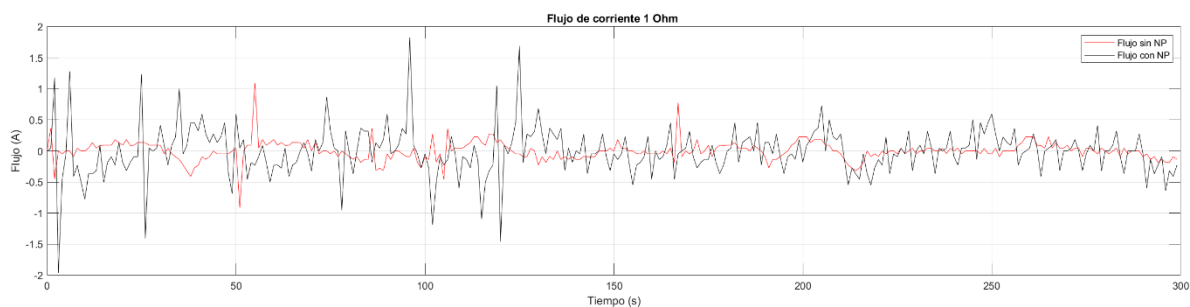


Figura 4.4.10 Flujo de corriente vs. tiempo, 1 Ω

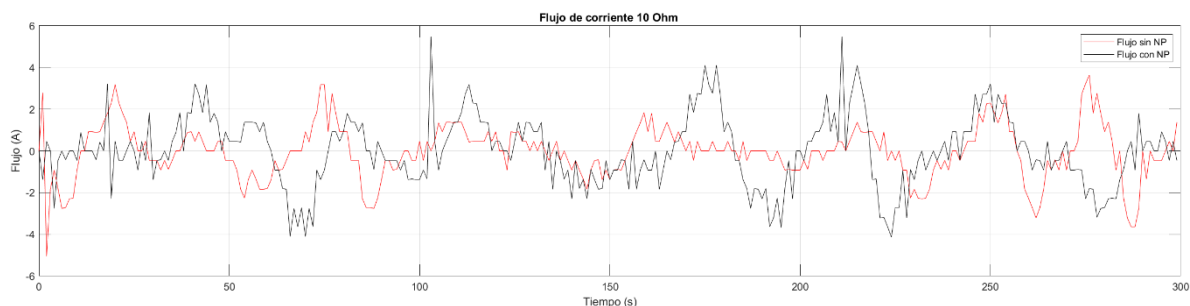


Figura 4.4.11 Flujo de corriente vs. tiempo, 10 Ω

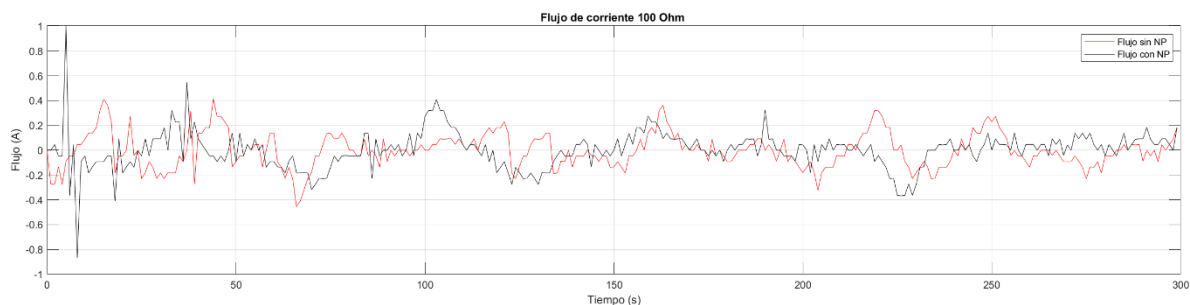


Figura 4.4.12 Flujo de corriente vs. tiempo, 100 Ω

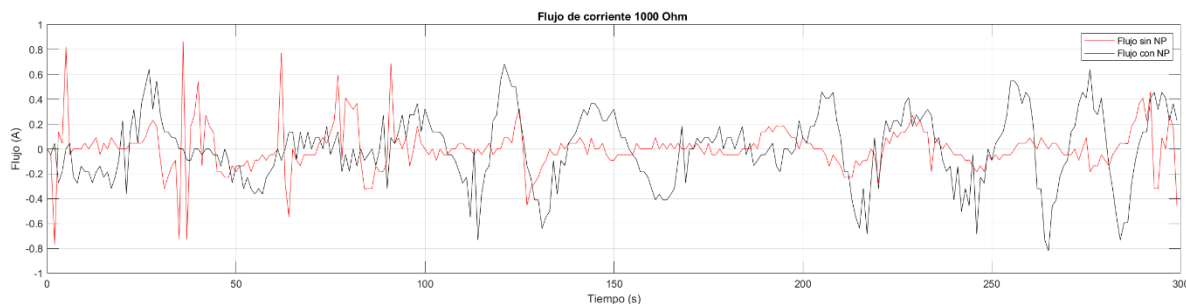


Figura 4.4.13 Flujo de corriente vs. tiempo, 1000 Ω

4.4.3. Análisis de flujo de corriente vs. tiempo (Figuras 4.4.10–4.4.13)

En las Figuras 4.4.10 a 4.4.13 se presenta el comportamiento del flujo de corriente en el tiempo, donde se evidencia una transición de un patrón irregular hacia uno más uniforme conforme se incrementa la resistencia de derivación. A valores bajos de resistencia, el flujo muestra oscilaciones bruscas debido a la rápida descarga de los portadores de carga; sin embargo, al aumentar la resistencia, la señal adquiere un carácter más estable y continuo. Este fenómeno se asocia con la formación de microcapas electroactivas alrededor de las nanopartículas, las cuales permiten un transporte de electrones sostenido y minimizan las pérdidas por dispersión. El comportamiento observado confirma la existencia de una ruta de conducción interna reforzada por la interacción entre la nanocelulosa, las nanopartículas metálicas y los canales del xilema, estableciendo un sistema bioelectrónico coherente y eficiente.

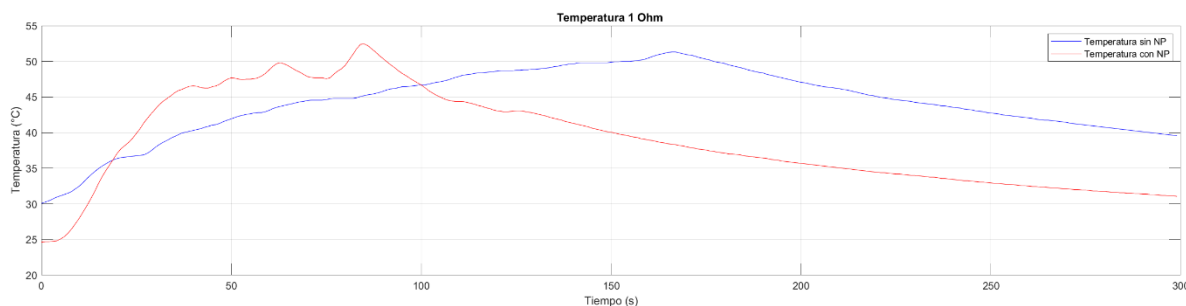


Figura 4.4.14 Temperatura vs. tiempo, 1 Ω

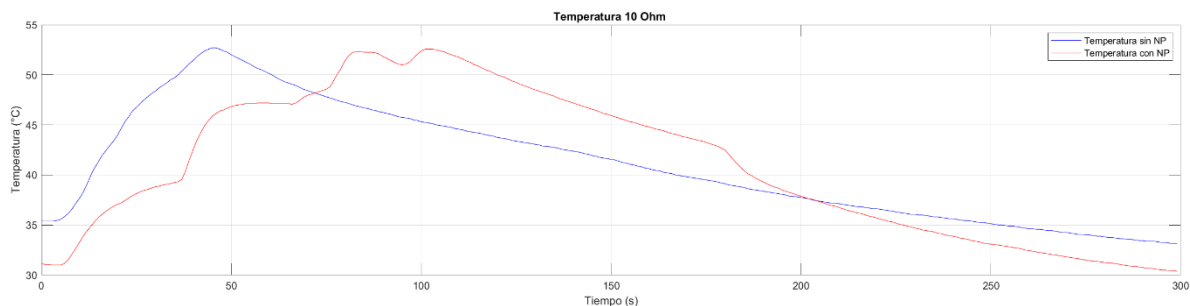


Figura 4.4.15 Temperatura vs. tiempo, 10 Ω

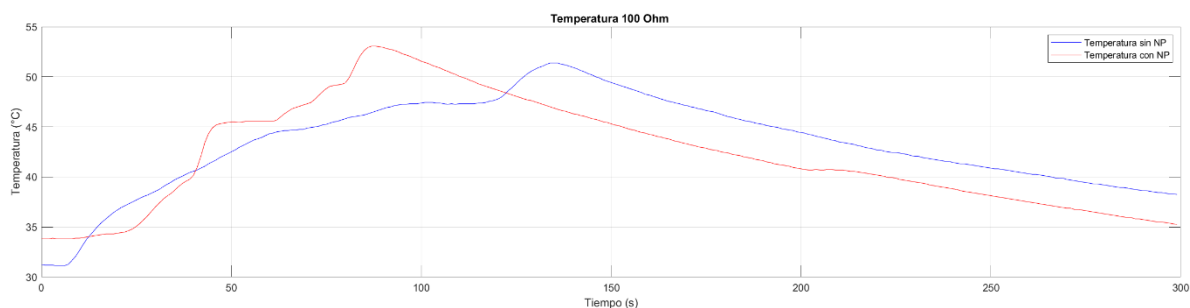


Figura 4.4.16 Temperatura vs. tiempo, 100 Ω

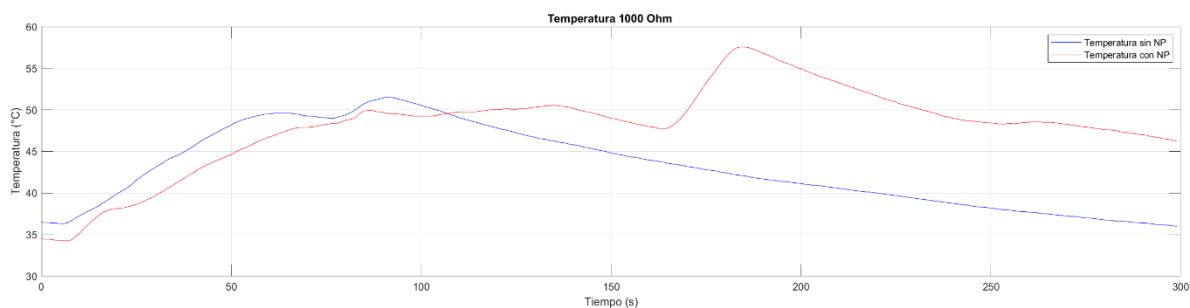


Figura 4.4.17 Temperatura vs. tiempo, 1000 Ω

4.4.4. Análisis de temperatura vs. tiempo (Figuras 4.4.14–4.4.17)

Las figuras 4.4.14 a 4.4.17 muestran la evolución térmica del sistema durante las pruebas eléctricas. Se aprecia un incremento de la temperatura conforme avanza el tiempo y se incrementa la resistencia, fenómeno directamente relacionado con el efecto Joule y la acumulación de carga en los puntos de contacto electroquímico. No obstante, el sistema funcionalizado mantiene un comportamiento térmico estable, sin incrementos abruptos, lo que demuestra la adecuada disipación del calor en la matriz de nanocelulosa. Esta estabilidad térmica indica que el compuesto de Ag/AgCl no compromete la integridad estructural del tejido vegetal, permitiendo mantener la conducción eléctrica de forma

continua y sin degradación observable. En conjunto, estos resultados evidencian la capacidad del sistema funcionalizado para operar de manera estable bajo estímulos eléctricos y térmicos controlados.

Capítulo 5. Conclusiones

La presente investigación permitió demostrar que la funcionalización del sistema vascular de *Epipremnum aureum* mediante nanopartículas de plata y cloruro de plata (Ag/AgCl) soportadas en nanocelulosa mejora de manera significativa las propiedades eléctricas y electroquímicas de la planta, generando una red conductora interna homogénea que facilita el transporte de carga.

El análisis estructural mediante ESEM y EDX confirmó la distribución uniforme de las nanopartículas en el sistema vascular, validando la metodología empleada como un enfoque efectivo y de bajo impacto para la funcionalización vegetal. Este resultado está en completa concordancia con las conclusiones presentadas en el artículo de *"Plants with silver nanoparticles to improve electrical conductivity: an innovative approach in biology"*, producto de esta tesis, que destaca la viabilidad de integrar materiales funcionalizantes en plantas para potenciar su capacidad de conducción eléctrica y su aplicación en plataformas de monitoreo ambiental.

Los experimentos de caracterización eléctrica demostraron un comportamiento óhmico y un incremento sustancial en la densidad de corriente bajo condiciones de alta resistencia de derivación, lo cual corrobora la eficacia de la funcionalización para mejorar el rendimiento del sistema bioelectroquímico. Asimismo, las pruebas de polarización y el análisis estadístico confirmaron la homogeneidad en la distribución de la vía conductora, reforzando su potencial para aplicaciones prácticas.

Estos hallazgos fortalecen la propuesta desarrollada en el artículo de Plants, que plantea la convergencia de nanotecnología, bioelectrónica y fisiología vegetal como base para el desarrollo de sistemas híbridos planta-máquina de alta sensibilidad. A partir de esta base, futuras investigaciones podrán explorar la integración de estos sistemas con plataformas de monitoreo remoto, la escalabilidad de la técnica y su impacto en la agricultura de precisión.

En conclusión, la funcionalización vegetal con nanopartículas de Ag/AgCl soportados en nanocelulosa representa una estrategia innovadora y efectiva para el desarrollo de sistemas bioelectrónicos y de sensado ambiental, consolidando el potencial de las plantas como dispositivos inteligentes de monitoreo y respuesta en entornos agrícolas y ambientales.

Productos

Proyecto Frontera No. CF-2023-I-342

Artículo: *Plants with silver nanoparticles to improve electrical conductivity: an innovative approach in biology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05837-9>

Artículo: *Cyborg Botany: Integración de un sistema híbrido de adquisición de datos basado en plantas y electrónica*. DOI: <https://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/v26n3-07.php>

Bibliografía

Aguilar, M. S., & Rosas, G. (2019). Facile synthesis of Cu₂O particles with different morphologies. *Journal of Solid State Chemistry*, 270, 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.11.019>

Angelini, L., Caon, M., Caparrotta, S., Khaled, O. A., & Mugellini, E. (2016). Multi-sensory emotiplant: Multimodal interaction with augmented plants. *UbiComp 2016 Adjunct - Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 1001–1009. <https://doi.org/10.1145/2968219.2968266>

Bard, A. J. ., & Faulkner, L. R. . (2001). *Electrochemical methods : fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Inc.

Bose, J. (1926). The Nervous Mechanism of Plants. In *Longmans, Green and Co, LTD*. Calcuta: Longmans, Green and Co. LTD. <https://archive.org/details/b29818722/page/n3/mode/2up>

Burdon Sanderson. (1873). burdon-sanderson-1997-i-note-on-the-electrical-phenomena-which-accompany-irritation-of-the-leaf-of-dionæa-muscipula. *Proc. Roy. Soc* 21, 495–496.

Cao, Y., Lim, E., Xu, M., Weng, J. K., & Marelli, B. (2020). Precision Delivery of Multiscale Payloads to Tissue-Specific Targets in Plants. *Advanced Science*, 7(13). <https://doi.org/10.1002/advs.201903551>

Cseresnyés, I., Rajkai, K., & Takács, T. (2016). Indirect monitoring of root activity in soybean cultivars under contrasting moisture regimes by measuring electrical capacitance. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(5). <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2149-z>

Fogašová, K., Manko, P., & Oboňa, J. (2022). The first evidence of microplastics in plant-formed fresh-water micro-ecosystems: *Dipsacus teasel* phytotelmata in Slovakia contaminated with MPs. *BioRisk*, 18, 133–143. <https://doi.org/10.3897/biorisk.18.87433>

Fromm, J., & Lautner, S. (2007). Electrical signals and their physiological significance in plants. In *Plant, Cell and Environment* (Vol. 30, Issue 3, pp. 249–257). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x>

Henning Schmidgen, & Translated by Nils F. Schott. (1851). *The Helmholtz Curves*.

- Herrero-Calvillo, R., Santoveña-Urbe, A., Esparza, R., & Rosas, G. (2019). A photocatalytic and electrochemical study of gold nanoparticles synthesized by a green approach. *Materials Research Express*, 7(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab61bd>
- Ledezma A, Romero J, Hernández M, Moggio I, Arias E, Padrón G, Orozco V, Martínez A, & Martínez C. (2014). Síntesis biomimética de nanopartículas de plata utilizando extracto acuoso de nopal (*Opuntia* sp.) y su electrohilado polimérico. In *Superficies y Vacío* (Vol. 27, Issue 4).
- Leopoldseder, Hannes., & Schopf, Christine. (2017). *Ars Electronica 2016 : Radical Atoms and the Alchemists of Our Time*. Hatje Cantz Publishers.
- Macclesh del Pino Pérez, L. A., Morales Cepeda, A. B., Castro-Guerrero, C. F., & Leon Silva, U. (2021). One step in situ synthesis of Ag/AgCl nanoparticles in a cellulose nanofiber matrix for the development of energy storage paper. *Cellulose*, 28(10), 6339–6351. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03922-7>
- Mares-Briones, F., & Rosas, G. (2017). Structure and Stability of Gold Nanoparticles Synthesized Using *Schinus molle* L. Extract. *Journal of Cluster Science*, 28(4), 1995–2003. <https://doi.org/10.1007/s10876-017-1197-x>
- Masarovicová, E., & Králová, K. (2013). Metal nanoparticles and plants. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 20(1), 9–22. <https://doi.org/10.2478/eces-2013-0001>
- McMullen_Winkler: *SoyBots*. (n.d.). Retrieved May 18, 2025, from <https://gardensandmachines.com/SoyBots/index.html>
- Merino-Treviño, M., Morales-Cepeda, A. B., Peraza-Vázquez, H., & Onofre-Bustamante, E. (2024). Plants with silver nanoparticles to improve electrical conductivity: an innovative approach in biology. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05837-9>
- Ouyang, L., Shaw, C. L., Kuo, C. C., Griffin, A. L., & Martin, D. C. (2014). In vivo polymerization of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) in the living rat hippocampus does not cause a significant loss of performance in a delayed alternation task. *Journal of Neural Engineering*, 11(2). <https://doi.org/10.1088/1741-2560/11/2/026005>
- Overview < Elowan: A plant-robot hybrid — MIT Media Lab. (n.d.). Retrieved May 19, 2025, from <https://www.media.mit.edu/projects/elowan-a-plant-robot-hybrid/overview/>
- 'Parasitic / Symbiotic' Robot Crawls Up Trees, CNC Carves into Bark 'like a parasite' #Arduino « Adafruit Industries – Makers, hackers, artists, designers and engineers! (n.d.). Retrieved May 18, 2025, from <https://blog.adafruit.com/2016/05/25/parasitic-symbiotic-robot-crawls-up-trees-cnc-carves-into-bark-like-a-parasite-arduino/>
- Stavriniidou, E., Gabrielsson, R., Gomez, E., Crispin, X., Nilsson, O., Simon, D. T., & Berggren, M. (2015). Electronic plants. *Science Advances*, 1(10). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501136>

- Stavrinidou, E., Gabrielsson, R., Nilsson, K. P. R., Singh, S. K., Franco-Gonzalez, J. F., Volkov, A. V., Jonsson, M. P., Grimoldi, A., Elgland, M., Zozoulenko, I. V., Simon, D. T., & Berggren, M. (2017). In vivo polymerization and manufacturing of wires and supercapacitors in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(11), 2807–2812. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616456114>
- Tandon, P. N. (2019). Jagdish Chandra Bose and Plant Neurobiology: Part I. *Indian Journal of History of Science*, 54(2). <https://doi.org/10.16943/ijhs/2019/v54i2/49660>
- The Telegarden Website*. (n.d.-a). Retrieved May 18, 2025, from <https://goldberg.berkeley.edu/garden/>
- The Telegarden Website*. (n.d.-b). Retrieved May 18, 2025, from <https://goldberg.berkeley.edu/garden/>
- Volkov, A. G. (2012). Plant electrophysiology: Methods and cell electrophysiology. In *Plant Electrophysiology: Methods and Cell Electrophysiology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29119-7>
- Wiener, N. (2019). Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. In *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/11810.001.0001>
- Wu, R., Zheng, J., Sun, Y., Wang, Q., Deng, C., & Ye, D. (2017). Research on generation of negative air ions by plants and stomatal characteristics under pulsed electrical field stimulation. *International Journal of Agriculture and Biology*, 19(5), 1235–1245. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0431>