

# Propuesta de Proyecto Divisional

## Interfaces Planta-Computadora 2022

### Línea de investigación del Cuerpo Académico:

Optimización, Sistemas Complejos e Interfaces Cerebro Computadora

### Responsables y colaboradores del proyecto

#### Responsables:

- Dr. Antonio López Jaimes. Participación: Desarrollo de algoritmos de optimización para resolver problemas de los procesos moleculares de las plantas, como por ejemplo, la construcción de redes de regulación genética.
- Dra. Alicia Montserrat Alvarado González: Desarrollo de la Interfaz Planta-Computadora, desarrollo de prototipos y algoritmos de extracción de características y clasificación de patrones de la señal eléctrica de la planta.

Profesores Asociados, Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas, División de Ciencias Naturales e Ingeniería, UAM Cuajimalpa.

#### Colaboradores:

- Dra. Elizabeth Ortiz Gutiérrez, Investigadora por México, Coordinación de Repositorios, Investigación y Prospectiva (CRIP) - CONACyT. Participación: Análisis de datos moleculares y construcción de redes de regulación genética.
- Mtro. Alejandro Rodea Chávez, Profesor Asociado, Departamento de Teoría y Procesos del Diseño, División de Ciencias de la Comunicación y Diseño, UAM Cuajimalpa. Participación: Diseño e implementación de los prototipos para la transferencia del conocimiento.

# Orientación

- Investigación básica
- Investigación aplicada
- Desarrollo o adaptación

## Fecha de inicio y duración

Octubre 2022 - Octubre 2024

## 1. Propuesta

### Resumen

En este proyecto estudiaremos el campo eléctrico relacionado con las plantas enfocándonos fundamentalmente en dos aspectos. En el primer aspecto estudiaremos las señales eléctrica de las plantas que se obtienen después de ser perturbadas con diferentes estímulos como como la luz, la presión, el tacto, temperatura, humedad, contaminantes, por mencionar algunos. Debido a que la respuesta eléctrica de las plantas es diferente para cada estímulo, en esta parte del proyecto se caracterizarán dichas señales y posteriormente se buscará construir dispositivos que usen a las plantas como sensores de diversos factores ambientales. Adicionalmente, por lo general una planta no es un ente aislado, si no que forma parte de un sistema conformado por la planta y sus factores ambientales, dentro de estos factores dos de los más importantes son el suelo y las bacterias que viven cerca de las raíces de las plantas. En el sistema planta-suelo-bacterias hay intercambio de diferentes moléculas, las cuales tiene carga eléctrica. Algunas de estas cargas eléctricas se desechan por el sistema y se pueden obtener mediante electrodos para generar corrientes eléctricas que se pueden almacenar u ocupar en aparatos de bajo consumo. Así, como segundo aspecto a desarrollar en este proyecto, se estudiarán los factores importantes para que el sistema planta-tierra-bacterias de la mejor eficiencia en la obtención de voltaje y corriente eléctrica. En este segundo aspecto también se contruirán dispositivos para la obtención óptima de dicha energía eléctrica. Como resultado de este proyecto se espera que al final se publique un artículo en una revista JCR, la dirección de un Proyecto Terminal, la dirección de un Servicio Social, obtención de una patente, la presentación de los resultados del proyecto en un congreso especializado, una presentación de los dispositivos desarrollados en un evento destinado al público en general.

## 2. Antecedentes

La fisiología de las plantas les permite responder a diversos estímulos como el cambio de iluminación [1], temperatura, humedad, estrés osmótico, irrigación, gravitstimulación

[2], heridas causadas por herbívoros, estimulación mecánica y disponibilidad de nutrientes, por mencionar algunos [3, 4, 5, 6, 7].

Para responder a diferentes estímulos, internamente las plantas tienen mecanismos a nivel molecular para producir su respuesta, la cual es diferente para cada estímulo. Debido a que la mayoría de las moléculas involucradas en este proceso de respuesta tienen carga eléctrica, una manera indirecta de estudiar las respuestas de una planta bajo diferentes estímulos es medir las corrientes eléctricas presentes en las plantas después de ser estimuladas. Cabe señalar que el estímulo también puede ser una corriente eléctrica aplicada a la planta.

Por ejemplo, en organismos vegetales como *Arabidopsis thaliana* se ha observado que ante daño mecánico o por herbívoros, se desencadenan pulsos eléctricos que inducen rápidos cambios en la expresión génica [8, 9]. Las señales eléctricas surgen cerca del sitio del daño y en cuestión de segundos se expanden a los órganos vecinos. Tales cambios son necesarios para que la planta inicie la respuesta sistémica de defensa mediada por jasmonatos, un tipo de hormona vegetal clave en la interacción planta-herbívoro. Además de esta hormona, se han identificado proteínas similares a receptores de glutamato (GLR, por sus siglas en inglés), que son necesarias para iniciar estos pulsos eléctricos [8]. Tales proteínas GLR parecen tener homólogos en vertebrados, en donde participan en la transmisión sináptica excitatoria, lo cual sugiere que el ancestro de las plantas y los animales ya presentaba moléculas que les permitían responder ante situaciones de alerta [10]. A pesar de estos fundamentales descubrimientos, aún quedan preguntas abiertas sobre la relación existente entre señales eléctricas y hormonales, con otras señales fisiológicas, como la señalización por calcio o por especies reactivas de oxígeno, por ejemplo. Es por ello que el estudio de la regulación genética como intermediaria entre las señales eléctricas y la respuesta sistémica, es fundamental para comprender como las plantas emiten una respuesta específica ante un determinado estímulo ambiental. Pese a que la información disponible en organismos vegetales es limitada, con los métodos de aprendizaje automático recientemente implementados en datos genómicos, es posible reconstruir un modelo de la regulación genética complementando la información en plantas con datos disponibles en animales [11].

Por otro lado, las señales eléctricas generadas en respuesta a diferentes estímulos, pueden utilizarse para el monitoreo de la electroquímica atmosférica, lluvia ácida, pesticidas, luz y contaminantes [12], o como sensores de iluminación, tacto o proximidad. Es decir, pueden utilizarse como sensores biológicos o biosensores. En la misma dirección, también pueden ser interpretadas como señales que permitan controlar dispositivos electrónicos [13]. A este tipo de mecanismo le llamamos *interfaz planta-computadora*.

De cara a este panorama, estamos interesados en explorar dos líneas de investigación que están entrelazadas. Una está enfocada en analizar, caracterizar e interpretar las señales eléctricas de diferentes plantas bajo diversos estímulos para construir dispositivos electrónicos que interactúen con las plantas. Por ejemplo, existen plantas como la mimosa púdica que, al ser tocadas, lanzan una corriente eléctrica característica que puede ser interpretada como una señal de encendido o apagado. Así que puede indicarla a un actuador se debe encender o apagar un foco o abrir o cerrar una puerta, por mencionar algunos ejemplos de aplicación. Además, buscamos desarrollar distintos biosensores. Por ejemplo, se podrían construir dispositivos que nos alerten que una zona presenta altos

índices de contaminación.

Por otro lado, también queremos descifrar los procesos moleculares que gobiernan los mecanismos de estímulo-respuesta de las plantas. En este caso, conocer la red de regulación genética o parte de ella nos permitirá entender las interacciones que rigen los procesos fisiológicos de las plantas, como por ejemplo, su germinación, floración, regeneración o respuestas al estrés. Actualmente se han reportado varios estudios que construyen redes de regulación [14, 15, 16]. Sin embargo, la mayoría están enfocados en una sola especie de planta (*Arabidopsis thaliana*) o se concentran en alguno de sus procesos específicos (e.g., floración). En contraste, en este proyecto estamos interesados en ciertas especies (e.g., lavanda) y, principalmente, en los mecanismos de respuesta al estrés abiótico.

En correspondencia, las redes de regulación genética que generemos las podemos aprovechar para desarrollar interfaces planta-computadora de la siguiente manera. Además del comportamiento adquirido de manera empírica, contaremos con indicios de mecanismos estímulo-respuesta equivalentes o incluso nuevos de las plantas. Asimismo, tendremos fundamentos sólidos que expliquen los mecanismos estímulo-respuesta de la planta, lo cual permitirá diseñar interfaces planta-computadora más confiables.

## 3. Objetivos

### 3.1. Objetivo General

Estudiar y explicar los patrones de comportamiento de las plantas en cuanto a los sistemas de procesamiento de información para desarrollar Interfaces Planta-Computadora.

### 3.2. Objetivos Específicos

1. Desarrollar dispositivos para estimular a las plantas con el objetivo de disparar sus comportamientos inherentes.
2. Desarrollar sistemas para utilizar a las plantas como sensores.
3. Desarrollar sistemas para adquirir, analizar y detectar los potenciales bioeléctricos generados por una planta.
4. Inferir una red de regulación genética con los perfiles de expresión, para entender el mecanismo molecular que permite coordinar un pulso eléctrico con una respuesta sistémica en la planta.
5. Con ayuda de la red de regulación genética, determinar el tipo de señal eléctrica requerido para que la planta emita una respuesta específica.
6. Inferir redes de regulación genética a través de estos datos de expresión donde se evalúe la respuesta a estímulos mediada por señales eléctricas.
7. Inferir redes de regulación en plantas a partir de la comparación con la regulación en sistemas animales empleando métodos de genómica comparativa, topología y dinámica de redes.
8. Definir posibles respuestas fisiológicas en plantas, derivadas de la regulación genética inferida.



9. Reconstruir una red de regulación genética que explique el mecanismo que permiten a las plantas responder a diferentes estímulos mediante señales eléctricas.

## 4. Descripción

### Hipótesis

1. La respuesta a diferentes estímulos de la planta se manifiesta mediante señales eléctricas.
2. La señal eléctrica obtenida de la planta a partir de ciertos estímulos se puede ocupar para controlar dispositivos.
3. Se pueden identificar y clasificar patrones característicos de cada estímulo.
4. Es posible identificar y aislar ciertas plagas en un cultivo mediante información obtenida por las propias plantas.

### Metodología

1. Para extraer e interpretar la señales eléctricas de las plantas se seguirá la siguiente metodología:
  - Propondremos protocolos que permitan aislar el comportamiento de las plantas ante cierto tipo de estímulos, por ejemplo, que las plantas estén dentro de cajas de Faraday.
  - Mediremos las señales eléctricas extracelulares en las plantas utilizando electrodos de contacto [17, 18, 19].
  - Construiremos varios dispositivos de adquisición electrónicos de bajo costo para digitalizar las señales eléctricas de distintas plantas.
  - Construiremos varios sensores electrónicos para medir distintas condiciones ambientales. Estos sensores nos permitirán validar su sustitución con la información obtenida de las plantas.
  - Validaremos que las respuestas obtenidas por los dispositivos de adquisición eléctrica y de sensado ambiental sean adecuadas para la experimentación formal, comparando los dispositivos de adquisición con equipos más sofisticados.
  - Las señales digitalizadas se filtrarán con hardware y software para minimizar ruido.
  - Se identificarán características particulares de las señales filtradas en el dominio temporal, morfológico y de frecuencias.
  - Propondremos algoritmos de clasificación para identificar automáticamente la respuesta eléctrica de la planta ante distintos estímulos para traducirlas en instrucciones que permitan controlar algún dispositivo.
  - Desarrollaremos distintos dispositivos que serán controlados con las señales eléctricas de las plantas.
  - Analizaremos el funcionamiento de las plantas detrás de ciertos comportamientos (p. ej., liberación de olor de la lavanda) para estudiar cómo estimularlas con la intención de controlarlas.

2. Para reconstruir las redes de regulación genética que nos permitirán determinar el tipo de señal eléctrica con el que podríamos estimular específicamente a la planta:
  - Realizar una búsqueda bibliográfica para determinar la relación entre los estímulos ambientales y las señales eléctricas, así como entre tales estímulos y las respuestas sistémicas específicas.
  - Recopilar datos publicados de expresión genética (a nivel de transcrito) para asociar cambios en los perfiles de expresión con estímulos ambientales y su respectiva respuesta sistémica.
  - Correlacionar los perfiles de expresión genética con los tipos de señales eléctricas, a partir de la búsqueda bibliográfica y los datos de expresión recopilados.
  - Asociar los perfiles de expresión genética con los tipos de respuesta sistémica.
  - Incorporar componentes moleculares de la señalización por  $\text{Ca}^{2+}$  y las especies reactivas de oxígeno, además de las señales eléctricas, como parte de los mecanismos necesarios para el sensado de señales ambientales.
  - Reconstruir la red de regulación genética de la transducción de señales eléctricas a partir de la información recabada sobre los perfiles de expresión y su integración con las señales eléctricas y las respuestas sistémicas.

## 5. Formación de recursos humanos

- Alumnos de Licenciatura: 1
- Alumnos de Servicio Social: 1
- Iniciación temprana a la investigación: 1

## 6. Productos esperados

### 6.1. Circuitos

1. Dispositivos que reaccionen ante las necesidades de la planta: sistema de riego automático, robot que lleve a la planta a zonas de luz o sombra, con base en la propia información de la planta.
2. Bio-sensores de bajo costo.
3. Dispositivos para estimular comportamientos en las plantas.
4. Prototipo de adquisición de la señal eléctrica de la planta.
5. Prototipo de sensores ambientales: humedad, temperatura, lluvia.
6. Dispositivos para obtener energía del sistema planta-suelo-bacterias con mayor amperaje

### 6.2. Sistema interactivo

Desarrollaremos un sistema que permita:

- Controlar el inventario de las plantas, los circuitos y los componentes de cada circuito

- Enviar información remotamente de los circuitos ambientales y de lectura de voltaje y amperaje a un servidor
- Desarrollar interfaces para la adquisición de información para los biosensores y algoritmos para caracterizar y clasificar las mediciones.
- Desarrollar algoritmos de visualización y minería de datos para analizar las correlaciones entre los datos ambientales, el voltaje y el amperaje.

## 7. Impacto esperado del proyecto

Este proyecto impacta en las siguientes líneas emblemáticas de la Unidad de acuerdo con las Políticas Operativas de Investigación UAM-C, Objetivos de la Investigación de la Unidad, I.1:

- Articular y potenciar las capacidades de las divisiones y departamentos de la Unidad para la generación y aplicación del conocimiento.
- Generar oportunidades e innovaciones de interés y utilidad a comunidades, empresas y, en general, a organismos y entidades de los sectores público, social y empresarial.

Por otro lado, la problemática nacional en la que se pretende incidir de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo, es en el Eje Transversal: Territorio y desarrollo sostenible. Que indica: "Reconoce que toda acción que se toma en el presente incide en las capacidades de las generaciones futuras y de que toda política pública actúa en un espacio con características particulares".

## 8. Recursos del proyecto

### 8.1. Financiamiento e infraestructura actual

#### 8.1.1. Laboratorio de Interfaces Planta-Computadora

Actualmente, se cuenta con un espacio en el cual llevar a cabo los experimentos del proyecto. Está ubicado en las instalaciones de El Encinal. Cuenta con un área de trabajo en donde se almacenan y construyen los circuitos del proyecto (ver Figura 1a) y dos áreas más: un espacio abierto para que las plantas puedan recibir iluminación adecuada (ver Figura 1b) y otro en donde puedan estar bajo la sombra (ver Figura 1c).

#### 8.1.2. Circuitos implementados

Hasta el momento hemos implementado los siguientes circuitos que nos permiten: estimular eléctricamente a la planta, adquirir las señales de la planta generadas por estimulación (eléctrica o presión, por mencionar algunas), regar las plantas de manera automática, medir las condiciones ambientales en las que se encuentran, sensar la energía generada por las plantas y almacenarla. A continuación se muestran los esquemas de cada circuito.

- Circuito estimulador (ver Figura 2): El objetivo de este circuito es enviar un estímulo de 5 volts durante 5 segundos a través de un par de electrodos conectados a una planta.



(a) Espacio de trabajo



(b) Espacio no techado



(c) Espacio techado

Figura 1: Imágenes del Laboratorio de Interfaces Planta-Computadora.

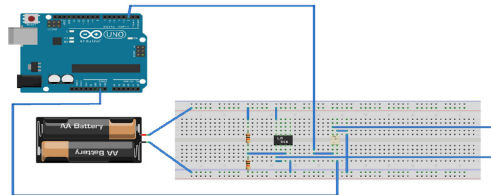


Figura 2: Esquema del circuito estimulador.

- Circuito de adquisición de la señal eléctrica (ver Figura 3): Este circuito tiene como objetivo mostrar la diferencia de potenciales detectada por los electrodos colocados en la planta.

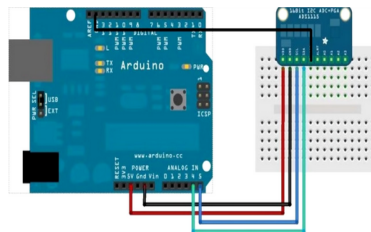


Figura 3: Esquema del circuito de adquisición de la señal eléctrica.

- Circuito del sistema de riego (ver Figura 4): El objetivo de este circuito es sensor

la humedad de la tierra y la disponibilidad de agua para regar automáticamente la planta.

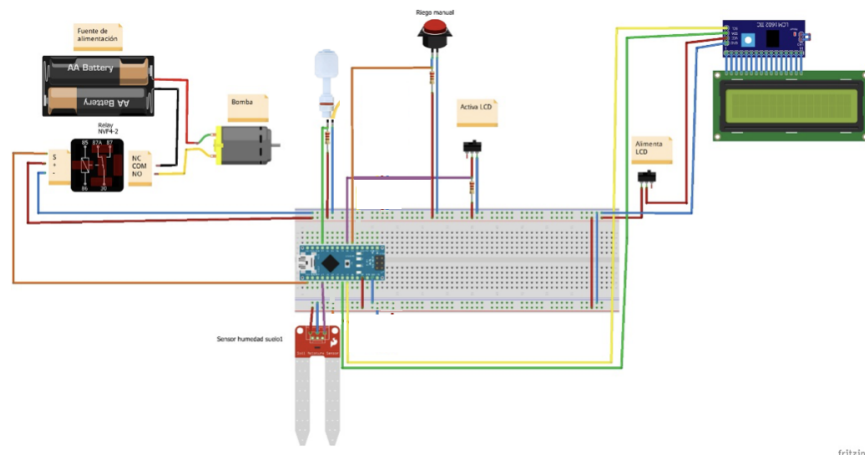


Figura 4: Esquema del circuito del sistema de riego.

- Circuito condiciones ambientales (ver Figura 5): El objetivo de este circuito es sensor temperatura, humedad del ambiente, humedad del suelo e intensidad de luz.

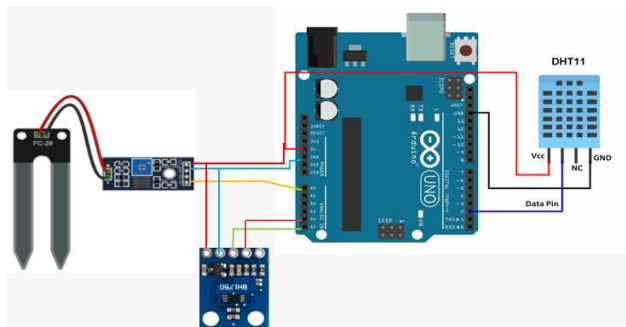


Figura 5: Esquema del circuito que mide las condiciones ambientales: sensor la temperatura y humedad del ambiente, humedad del suelo e intensidad de luz.

- Circuito para sensor voltaje y amperaje de una planta (ver Figura 6): El objetivo de este circuito es registrar el voltaje y amperaje sin necesidad de utilizar un multímetro.

### 8.1.3. Base de datos

Hemos desarrollado una base de datos relacional con *MySQL Workbench* que nos ayudará a manejar el sistema que controle el inventario de los circuitos, los prototipos, los componentes y las mediciones. En la Figura 7 se muestra el modelo entidad relación del sistema.



#### 8.1.4. Recursos de cómputo y electrónicos

Para alcanzar los objetivos planteados en este proyecto, contamos con el equipo de cómputo y los electrónicos que detallamos a continuación:

- Cluster de computadoras del DMAS para ejecutar programas en paralelo.
- Una estación de trabajo con 16 núcleos.
- Equipo de cómputo de 7 núcleos.
- Espacio en un disco duro con IP externa.
- 1 osciloscopio
- 5 Multímetros
- 6 Cautines
- Soldadura de estaño
- 5 Pinzas eléctricas
- 10 Palas de jardinería
- Tornillos de acero galvanizado de 1/4
- 10 pares Guantes de jardinero
- 3 Sensor de humedad y temperatura DHT11
- 33 Sensor de intensidad de luz digital BH1750
- 11 Arduino UNO
- 16 YL-69 Sensor de humedad de tierra
- 14 Protoboard
- 16 INA219 I2C Fuente de alimentación de Corriente bidireccional Módulo de ruptura del Sensor
- 26 Bluetooth HC05
- 38 MicroSD 32 GB
- 16 Modulo Ads1115 Amplificador De Ganancia
- 20 Electrodo de copa de oro
- 36 Lector MicroSD
- 33 Relay
- 35 bombas sumergibles
- 3 MH-Z16 Sensor de CO2
- 10 COVS grove air
- 10 WiFi Esp8266
- 50 Placas Fenólica Perforadas Tipo Protoboard 7x14.5cm
- 100 Dupont Jumper + Crimp Terminal Pin Hembra Y Macho
- 50 Tiras de 40 Pines Hembra y Macho 2.54mm
- Manguera Pvc 5/16 5 Mts Para Bomba Sumergible Peceras

- Thermofit de 3/16"
- Cable estañado para conexiones de 22 AWG
- 2 Pinzas de corte adecuadas para el calibre 22
- Pasta conductiva Ten20
- 1 nodo sensor para la detección de COVs, CO y CO<sub>2</sub>

## 8.2. Recursos requeridos

- Lijas para metal
- 2m Tubo de cobre de calibre 1" cortado en trozos de 5cm
- Cable calibre 22 con recubrimiento
- Thermofit de 3/16"
- 8 Sensor de humedad y temperatura DHT11 con convertidor
- 8 MH-Z16 Sensor de CO<sub>2</sub> con convertidor
- 1 Módulo DF player mini
- 1 Alta voz (máximo de 3W y 4ohms)
- Resistencias de 1Kohm
- 4 Sensores de nivel de agua para Arduino
- 5 Raspberry Pi 3
- 11 Cargadores para Arduino 5v
- 10 pilas alcalinas de 9v
- 4 Cutter
- 4 Pinzas para cortar adecuadas para el calibre 22
- Pasta conductiva Ten 20
- 16 Electrodo de copa de oro con terminación de header hembra
- 20m Manguera PVC 5/16" para bomba sumergible para peceras
- 5 Esp32 Wifi + Bluetooth 4.2 Ble Nodemcu
- 5 Display LCD 16 × 2 con convertidor I2C
- 10 SW-005 Switch recto 1P2T grande
- Pantalla LCD ST7920 de 128x64 pixeles

## 8.3. Estrategias para obtener recursos

Los recursos económicos necesarios para cubrir las necesidades del proyecto vendrán de tres lugares:

- Presupuesto asignado por parte del Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas.
- Talleres al público general a través de una posible vinculación con una empresa.
- Posible colaboración con la Comisión de Recursos Naturales (CORENA).



## 9. Calendario de actividades

En la siguiente tabla se muestra una lista de actividades a llevar a cabo durante el proyecto en un periodo de dos años. Es importante señalar que la actividad se llevará a cabo por los responsables del proyecto junto con alumnos de licenciatura, posgrado o servicio social.

Actividad	Año 1					Año 2				
	22O	23I	23P	23O	24I	24P	24O	25I		
Prototipo del sistema de riego automático (Montserrat)		x								
Reproducción del sistema de riego automático para el laboratorio (SS Valeria)			x							
Diseño del sistema de riego automático para transferencia (Alejandro)				x	x					
Reporte de prototipos (Montserrat)	x					x				
Reproducción del sistema de sensado ambiental para el laboratorio (SS)		x								
Diseño del sistema de sensado ambiental para transferencia (Alejandro)	x	x	x							
Identificación de la distancia máxima a partir de la fuente del estímulo (Montserrat)		x								
Sistema que transforma la presión de la planta en mensaje en voz (PT)			x							
Sensores para detección de contaminantes en la composta (Montserrat)				x	x					
Diseño del sistema de sensado para detección de contaminantes para transferencia (Alejandro)						x	x	x		
Ábaco para ajustar voltaje y amperaje (SS Anel)	x									
Sensor de adquisición de señal eléctrica para identificar plagas en árboles (Montserrat)	x	x	x							
Interfaces para la adquisición de las señales de biosensores (PT y SS Tania)	x	x	x	x						

Actividad	Año 1				Año 2				
	22O	23I	23P	23O	24I	24P	24O	25I	
Interfaces para mostrar la información adquirida por los sensores (PT y SS Brandon y Alejandro)	x	x	x	x					
Artículo de voltaje y amperaje de las tesinas de Karla y Mayte (Montserrat)			x						
Artículo de biosensores de lavanda (Montserrat)				x					
Taller de construcción de riego automático y sensores (Montserrat)		x	x	x	x	x	x	x	
Caracterización de las bacterias del suelo de El Encinal (PT Leonardo)	x	x							
Caracterización de las bacterias del huerto (SS)			x	x	x	x	x	x	
Análisis del voltaje y amperaje de la composta del huerto (SS)				x	x	x	x	x	
Mantenimiento de las plantas (Montserrat)	x	x	x	x	x	x	x	x	

## 10. Información para el seguimiento del proyecto

### Resultados esperados

- Productividad científica: Al menos un artículo en revista indexada.
- Desarrollo tecnológico: Al menos cuatro prototipos listos para transferencia tecnológica.
- Formación de recursos humanos: Al menos dos servicios sociales y cuatro Proyectos Terminales con sus respectivas tesinas.
- Talleres: Al menos dos talleres relacionados con el proyecto.

### Referencias

- [1] E. Hartmann, "Influence of light on the bioelectric potential of the bean (*Phaseolus vulgaris*) hypocotyl hook," *Physiologia Plantarum*, vol. 33, no. 4, pp. 266–275, 1975.
- [2] K. Imagawa, K. Toko, S. Ezaki, K. Hayashi, and K. Yamafuji, "Electrical potentials during gravitropism in bean epicotyls," *Plant physiology*, vol. 97, no. 1, pp. 193–196, 1991.
- [3] B. Stanković and E. Davies, "Intercellular communication in plants: electrical stimulation of proteinase inhibitor gene expression in tomato," *Planta*, vol. 202, no. 4, pp. 402–406, 1997.
- [4] H. Ishikawa, S. Abou, E. Ohta, and M. Sakata, "Effects of periodic-and transient-osmotic stress on electric potentials in bean roots," *Plant and cell physiology*, vol. 24, no. 6, pp. 1129–1135, 1983.
- [5] K. Kalovrektis, C. Lykas, and E. Fountas, "Identification of high salinity stress in ornamental plant by biosignal process," in *4th Balkan Conference in Informatics, Thessaloniki, GREECE, September 17th-19th*, 2009.
- [6] H. Reynolds and C. D'antonio, "The ecological significance of plasticity in root weight ratio in response to nitrogen: opinion," *Plant and soil*, vol. 185, no. 1, pp. 75–97, 1996.
- [7] J. Roy, *Response of plants to multiple stresses*. Academic Press, 2012.
- [8] S. A. Mousavi, A. Chauvin, F. Pascaud, S. Kellenberger, and E. E. Farmer, "Glutamate receptor-like genes mediate leaf-to-leaf wound signalling," *Nature*, vol. 500, no. 7463, pp. 422–426, 2013.
- [9] A. Kurenda, C. T. Nguyen, A. Chételat, S. Stolz, and E. E. Farmer, "Insect-damaged arabidopsis moves like wounded mimosa pudica," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 51, pp. 26066–26071, 2019.
- [10] A. Christmann and E. Grill, "Plant biology: electric defence," *Nature*, vol. 500, no. 7463, pp. 404–405, 2013.
- [11] G. Eraslan, Ž. Avsec, J. Gagneur, and F. J. Theis, "Deep learning: new computational modelling techniques for genomics," *Nature Reviews Genetics*, vol. 20, no. 7, pp. 389–403, 2019.

- [12] A. G. Volkov and D. R. A. Ranatunga, “Plants as environmental biosensors,” *Plant signaling & behavior*, vol. 1, no. 3, pp. 105–115, 2006.
- [13] A. G. Volkov, “Biosensors, memristors and actuators in electrical networks of plants,” *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 44–55, 2017.
- [14] F. Andrés and G. Coupland, “The genetic basis of flowering responses to seasonal cues,” *Nature reviews. Genetics*, vol. 13, pp. 627–39, 08 2012.
- [15] C. R. Wils and K. Kaufmann, “Gene-regulatory networks controlling inflorescence and flower development in arabidopsis thaliana,” *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Gene Regulatory Mechanisms*, vol. 1860, no. 1, pp. 95 – 105, 2017. Plant Gene Regulatory Mechanisms and Networks.
- [16] N. J. Provart, J. Alonso, S. M. Assmann, D. Bergmann, S. M. Brady, J. Brkljacic, J. Browse, C. Chapple, V. Colot, S. Cutler, J. Dangl, D. Ehrhardt, J. D. Friesner, W. B. Frommer, E. Grotewold, E. Meyerowitz, J. Nemhauser, M. Nordborg, C. Pi-kaard, J. Shanklin, C. Somerville, M. Stitt, K. U. Torii, J. Waese, D. Wagner, and P. McCourt, “50 years of arabidopsis research: highlights and future directions,” *New Phytologist*, vol. 209, no. 3, pp. 921–944, 2015.
- [17] K. Kalovrektis, J. Antonopoulos, A. Gotsinas, and N. Shammias, “Development of transducer unit to transmit electrical action potential of plants to a data acquisition system,” *American Journal of Bioinformatics Research*, vol. 3, pp. 21–24, 2013.
- [18] T. Ochiai, S. Tago, M. Hayashi, and A. Fujishima, “Highly sensitive measurement of bio-electric potentials by boron-doped diamond (bdd) electrodes for plant monitoring,” *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 26921–26928, 2015.
- [19] S. Tago, T. Ochiai, S. Suzuki, M. Hayashi, T. Kondo, and A. Fujishima, “Flexible Boron-Doped Diamond (BDD) electrodes for plant monitoring,” *Sensors*, vol. 17, no. 7, p. 1638, 2017.