

Propuesta de Proyecto Divisional

Interfaces Planta-Computadora

15 de junio de 2020

Resumen

1. Responsables y colaboradores del proyecto

Responsables:

- Dr. Juan Manuel Romero Sanpedro, Profesor Asociado, Tiempo Completo.
Participación: Modelación de señal eléctrica, diseño experimental y búsqueda de información.
- Dra. Alicia Montserrat Alvarado González, Profesor Asociado, Medio Tiempo.
Participación: Desarrollo de la Interfaz Planta-Computadora y algoritmos de extracción de características y clasificación de patrones de la señal eléctrica de la planta.

Ambos del Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas.

Colaboradores:

- Dr. Antonio López Jaimes, Profesor Asociado, Tiempo Completo, Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas.
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. Elizabeth Ortiz Gutiérrez, Profesor Titular A, Tiempo Completo, Departamento de Ciencias Naturales.
Participación: Análisis de datos moleculares y construcción de redes de regulación genética.
- Dr. León Martínez Castilla, Profesor Asociado, Tiempo Completo, Departamento de Ciencias Naturales.
Participación: Análisis de datos moleculares y construcción de redes de regulación genética.

2. Orientación

- Investigación básica
- Investigación aplicada
- Desarrollo o adaptación

Fecha de inicio y duración: Abril 2020- Abril 2021

3. Antecedentes

Las plantas son seres vivos capaces de manifestar funciones de cómputo complejas, como el metabolismo, el crecimiento, la autorreproducción y la adaptación a la estimulación externa (ambiental) e interna (fisiológica) [1].

Las plantas responden a alteraciones en el ambiente, particularmente con respecto a la disponibilidad de nutrientes [2, 3], así como a diversos estímulos, incluyendo luz, temperatura, humedad, estrés osmótico, irrigación, gravistimulación, heridas causadas por herbívoros y estimulación mecánica [4, 5, 6, 7, 8].

Internamente la planta realiza mecanismos a nivel molecular para procesar estímulos de entrada y producir la respuesta adecuada. Cabe destacar que estos estímulos están coordinados con la regulación molecular a través de las señales eléctricas, entre otros.

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 [9, 10]. 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 [9]. 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 [11]. 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 [12].

De cara a este panorama, estamos interesados en explorar dos líneas de investigación entrelazadas. Por un lado, el uso de los patrones de comportamiento de las plantas para desarrollar sensores biológicos o para controlar dispositivos electrónicos. En particular, a partir de las señales eléctricas de las plantas, se pueden generar interfaces electrónicas para utilizar sus capacidades intrínsecas como dispositivos de sensado, es decir *biosensores*. Estos biosensores pueden detectar, por ejemplo, cambios en un sistema biológico para el monitoreo de electroquímica atmosférica, lluvia ácida, pesticidas, luz y contaminantes [13]. En la misma dirección, las interfaces electrónicas pueden servir para disparar o controlar actuadores [14]. A este tipo de mecanismo le llamamos *interfaz planta-computadora*.

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 [15, 16, 17]. 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.

Estas dos líneas de investigación están estrechamente ligadas. Por un lado, para inferir la red de regulación es necesario usar información disponible en bases de datos de genomas y transcriptomas de plantas (e.g. bases de datos *Genome* y *Gene Expression Omnibus*, de NCBI), y sobre todo, necesitamos datos obtenidos al estimular las plantas con las que experimentemos.

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.

4. Trabajos Previos

Se han desarrollado distintas aplicaciones que permiten que una planta obtenga beneficios de tener dispositivos que reaccionen ante las señales que emiten. Por ejemplo, en [18] desarrollaron un robot que traslada a la planta a una fuente de abastecimiento de agua al detectar que le falta humedad. En 2015, en [19] desarrollaron un robot, llamado iPlant, que podría cuidar su propio jardín, invernadero, interactuando con el entorno que lo rodea. iPlant es un empleador de sistema robótico fácil de usar, sin esfuerzo y que ahorra tiempo. iPlant tiene la capacidad de monitorear y transmitir el estado de las plantas, el nivel de agua y los nutrientes. Por lo tanto, iPlant proporcionará una gran reducción en los recursos financieros y físicos. Más recientemente, Sun Tianqi [20] construyó un robot que traslada a la planta a sitios con sol o sombra según lo requiera.

En cuanto a los aspectos moleculares involucrados en las señales eléctricas de las plantas, podemos identificar dos áreas de desarrollo, la primera de ellas tiene que ver con el tipo de señales eléctricas que se presentan ante diferentes estímulos ambientales, bióticos o abióticos, y que inducen una respuesta sistémica en la planta acorde al estímulo.

lo ambiental sensado (e.g. [21, 10]). La segunda área corresponde al análisis de los cambios en la expresión genética que ocurren cuando la planta percibe el estímulo ambiental y produce una respuesta sistémica.

Como parte de los estudios que buscan conectar estas dos áreas, se han identificado algunos genes involucrados en la transducción de las señales eléctricas. Entre los mejor estudiados se encuentran los genes similares a receptores de glutamato, GRL [9], y un gen que participa en la señalización de potencial de variación, AHA1 [22]. Cabe mencionar que Mousavi y colaboradores [9], emplearon los primeros microarreglos para estudiar cambios en el transcriptoma de hojas dañadas por acción mecánica en *Arabidopsis thaliana*. En esta misma dirección, actualmente se encuentran disponibles poco más de 60 estudios en bases de datos como Gene Expression Omnibus (de NCBI) que han explorado los cambios en la expresión genética inducidos por alguna señal ambiental en plantas, y que como sabemos desencadena una respuesta sistémica mediada por una señal eléctrica.

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

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

5.2. Objetivos Específicos

1. Desarrollar sistemas 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 y analizar y detectar los potenciales bioeléctricos generados por una planta.
4. Desarrollar herramientas bioinformáticas para identificar perfiles de expresión génica asociados a las señales eléctricas en plantas.
5. 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.

6. Con ayuda de la red de regulación genética, determinar el tipo de señal eléctrica requerido para que la planta emita una respuesta específica.

6. Descripción, hipótesis y metodología

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 como por ejemplo un robot.
3. Se pueden identificar y clasificar patrones característicos de cada estímulo.
4. Es posible reconstruir una red de regulación genética que explique el mecanismo que permiten a las plantas responder a diferentes estímulos mediante señales eléctricas.

Metodología

Para extraer e interpretar las 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 [23, 24, 25] o de aguja [26]. Las mediciones de las señales eléctricas extracelulares en las plantas, pueden ser medidas utilizando electrodos de contacto o de aguja. Los electrodos de contacto tienen la ventaja de no dañar a la planta, son estables cuando hay polarización, erosión y alteraciones en la temperatura [23]. Sin embargo, no pueden usarse por largo tiempo debido a que son electrodos secos [23, 24, 25]. En cambio, los electrodos de aguja insertados en el tejido de la planta se pueden utilizar por más tiempo pero pueden generar daños en la planta [26].

- Desarrollaremos dispositivos de adquisición electrónicos de bajo costo usando un microcontrolador Arduino, con un convertidor analógico - digital que contendrá un amplificador para digitalizar las señales eléctricas de distintas plantas.
- Desarrollaremos sensores electrónicos para medir distintas condiciones ambientales. Estos sensores nos permitan 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 adecuada 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. Las señales eléctricas generadas por fenómenos eléctricos extracelulares que pueden ser medibles en la plantas, se pueden dividir en tres tipos [23]: potencial eléctrico local (LEP), potencial de acción (AP) y potencial de variación (VP). Tanto los VP como los AP permiten una comunicación que se propaga en distancias largas; en contraste, el LEP es responsable de la comunicación en distancias cortas. Los VP se producen por estímulos dañinos, mientras que los AP se producen por estímulos no dañinos. Debido a su importancia, propondremos algoritmos de para identificar automáticamente cada tipo de señal eléctrica.
- 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. Por ejemplo, bombas automáticas de riego o robots que permitan llevar una planta a un lugar de sombra o luz (dependiendo de sus necesidades).
- Analizar el funcionamiento de las plantas detrás de ciertos comportamientos (p. ej., liberación de olor de la lavanda) para estudiar cómo estimularlas para controlarlas.

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 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.

7. Formación de recursos humanos

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

8. Impacto esperado del proyecto

Desarrollaremos Interfaces Planta-Computadora que permitan identificar de forma automática comportamientos en plantas que dispararán acciones en distintos dispositivos. Por ejemplo, un robot que lleve a la planta a una zona con sol o sombra, o hacer que una bomba riegue la planta, dependiendo de las necesidades de ésta. También, desarrollaremos un sistema que estimule a la planta para que genere

comportamientos controlados. Adicionalmente, reemplazaremos la información recibida por los sensores electrónicos por aquella recibida con la información obtenida con la planta.

Con la comprensión de mecanismos moleculares involucrados en la transducción de señales eléctricas podemos influir, o incluso, controlar el comportamiento de una planta sin tener que modificar su código genético, por ejemplo inducir la producción de aceites esenciales u otros metabolitos secundarios en una planta de lavanda.

9. Recursos para el proyecto

Para alcanzar los objetivos planteados en este proyecto, contamos con la infraestructura y equipo necesarios, los cuales detallamos a continuación.

Las instalaciones para desarrollar el proyecto son las siguientes:

- Infraestructura del Laboratorio de Innovación Tecnológica ubicado en el primer piso del estacionamiento de la Unidad.

El equipo con el que se cuenta es el siguiente:

- Clúster de computadoras del DMAS para ejecutar programas en paralelo.
- Una estación de trabajo con 16 núcleos.
- Equipo de cómputo de 7 núcleos.
- Sensor de Humedad YL-69 3.3V
- 2 Módulos YL-38
- 5 Arduino Uno
- 5 ADS1115 Convertidor Analógico/Digital de 4 entradas y 16 bits
- Gel para electrocardiograma
- Sensor FC-37: detector de lluvia
- Bomba de agua de 9v
- Electrodo de oro
- 5 protoboards
- 1 cautín

| | Participantes | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| Desarrollar sistemas para estimular a las plantas con el objetivo de disparar sus comportamientos inherentes. | Juan, Montserrat | | | | | | | | | | | | |
| Desarrollar sistemas para utilizar a las plantas como sensores. | Juan, Montserrat | | | | | | | | | | | | |
| Desarrollar sistemas para adquirir y analizar la señal eléctrica de las plantas. | Juan, Montserrat | | | | | | | | | | | | |
| Desarrollar herramientas bioinformáticas para identificar perfiles de expresión génica asociados a las señales eléctricas en plantas. | Antonio, Elizabeth y León | | | | | | | | | | | | |
| 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 | Antonio, Elizabeth y León | | | | | | | | | | | | |
| Con ayuda de la red de regulación genética, determinar el tipo de señal eléctrica requerido para que la planta emita una respuesta específica. | Antonio, Elizabeth y León | | | | | | | | | | | | |

Figura 1: Calendario de actividades.

- 1 nodo sensor para la detección de COVs, CO y CO₂
- 1 robot mbot
- 1 osciloscopio

10. Calendario de actividades

En la Figura 1 se muestra una lista de actividades a llevar a cabo durante el proyecto en un periodo de un año. Es importante señalar que el nombre que aparece en la columna Participantes indica a los responsables de la actividad. Sin embargo, ésta puede ser llevada a cabo por el participante o por alumnos de licenciatura, posgrado o servicio social.

11. Resultados esperados

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.
2. Bio-sensores de bajo costo.
3. Dispositivos para estimular comportamientos en las plantas.
4. 5 Circuitos de adquisición de la señal eléctrica de la planta.
5. 1 Circuito para detectar niveles de clorofila de la planta.
6. Sensores ambientales: humedad, temperatura, lluvia.
7. 1 Red de la regulación genética involucrada en la transducción de señales eléctricas.

12. Vinculación con los planes y programas de estudio de la División de Ciencias Naturales e Ingeniería

- De la Licenciatura de Ingeniería en Computación, los alumnos de proyecto terminal y servicio social podrán aplicar sus conocimientos de las siguientes UEA y de todas las UEA que las preceden en la seriación:
 - Interfaces de Usuario
 - Análisis y Diseño Orientado a Objetos
 - Sistemas Distribuidos
- De la Licenciatura en Biología Molecular, los alumnos de proyecto terminal y servicio social podrán aplicar sus conocimientos de las siguientes UEA:
 - Introducción a la Biología Molecular
 - Bioinformática Molecular
 - Técnicas de Biología Molecular III
 - Optativas de Orientación como Biología de Plantas o Bioinformática de Ciencias Ómicas.

Referencias

- [1] S. Nichele, S. Risi, G. Tufte, and L. Beloff, “Towards a plant biomachine,” in *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, pp. 1–8, IEEE, 2017.
- [2] 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.
- [3] J. Roy, *Response of plants to multiple stresses*. Academic Press, 2012.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] A. Christmann and E. Grill, “Plant biology: electric defence,” *Nature*, vol. 500, no. 7463, pp. 404–405, 2013.
- [12] 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.

- [13] A. G. Volkov and D. R. A. Ranatunga, “Plants as environmental biosensors,” *Plant signaling & behavior*, vol. 1, no. 3, pp. 105–115, 2006.
- [14] 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.
- [15] F. Andrés and G. Coupland, “The genetic basis of flowering responses to seasonal cues,” *Nature reviews. Genetics*, vol. 13, pp. 627–39, 08 2012.
- [16] 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.
- [17] 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. Grote-wold, E. Meyerowitz, J. Nemhauser, M. Nordborg, C. Pikaard, 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.
- [18] S. C. Singh, “Robot for caring for plants,” 2008. US Patent App. 11/531,689.
- [19] B. Al-Beeshi, B. Al-Mesbah, S. Al-Dosari, and M. El-Abd, “iplant: The greenhouse robot,” in *2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pp. 1489–1494, 2015.
- [20]
- [21] M. R. Zimmermann, H. Maischak, A. Mithöfer, W. Boland, and H. H. Felle, “System potentials, a novel electrical long-distance apoplastic signal in plants, induced by wounding,” *Plant Physiology*, vol. 149, pp. 1593–1600, mar 2009.
- [22] A. Kumari, A. Chételat, C. T. Nguyen, and E. E. Farmer, “Arabidopsis H⁺-ATPase AHA1 controls slow wave potential duration and wound-response jasmonate pathway activation,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 116, pp. 20226–20231, oct 2019.

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] A. G. Volkov, T. Adesina, and E. Jovanov, "Closing of venus fly-trap by electrical stimulation of motor cells," *Plant signaling & behavior*, vol. 2, no. 3, pp. 139–145, 2007.