



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE  
DURANGO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL  
VALLE DEL GUADIANA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**“Desarrollo de sustrato nanoestructurado para la detección  
de glifosato en muestras agrícolas por medio de  
espectroscopia Raman.”**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Maestría en Ingeniería**

**Presenta:**

Ing. Alejandro Daniel Ramírez Flores

**Director de tesis:**

Dr. Josué Ortiz Medina

**Co-Director:**

Dr. Francisco Javier Godínez García

Durango, Dgo. México, noviembre, 2025





**“Desarrollo de sustrato nanoestructurado para la detección de glifosato en muestras agrícolas por medio de espectroscopia Raman.”**

**Presenta:**

Ing. Alejandro Daniel Ramírez Flores

**COMITÉ TUTORIAL**

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| Dr. Josué Ortiz Medina<br>Director                | <br>Firma |
| Dr. Francisco Javier Godínez García<br>Codirector | <br>Firma |
| Dr. Darío Cisneros Arreola<br>Asesor 1            | <br>Firma |
| Dr. José Antonio Martínez Rivera<br>Asesor 2      | <br>Firma |

Dra. Norma Alicia García Vidaña

Dra. Tania Montoya García

Coordinadora del programa de la Maestría  
en Ingeniería.

Jefa de la División de Estudios de Posgrado e  
Investigación

Durango, Dgo. México

NOVIEMBRE DE 2025



# Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Durango  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **05 / Noviembre / 2025**.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 475 / 2025.

**ASUNTO:** Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

**C. ALEJANDRO DANIEL RAMÍREZ FLORES**  
No. DE CONTROL G14041174  
**P R E S E N T E .**

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

**“Desarrollo de sustrato nanoestructurado para la detección de glifosato en muestras agrícolas por medio de espectroscopia Raman”**

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

**A T E N T A M E N T E .**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*“La Técnica al Servicio de la Patria”*

**C. TANIA MONTOYA GARCÍA**  
ENCARGADA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



TMG'ammc.



**2025**  
Año de  
La Mujer  
Indígena

Bvld. Felipe Pescador No. 1830 Ote.,  
Durango, Dgo., C.P. 34080 Tels. 618-818-69-  
36  
e-mail: depposgrado@itdurango.edu.mx  
tecmm.mx | itdurango.edu.mx





# Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



## Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Durango  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a 05 / Noviembre / 2025.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 474 / 2025.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. ALEJANDRO DANIEL RAMÍREZ FLORES  
No. DE CONTROL G14041174  
P R E S E N T E.

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería** cuyo título es:

**"Desarrollo de sustrato nanoestructurado para la detección de glifosato en muestras agrícolas por medio de espectroscopia Raman"**

**CONTENIDO:**

|              |                                |
|--------------|--------------------------------|
|              | RESUMEN                        |
| CAPÍTULO I   | INTRODUCCIÓN                   |
| CAPÍTULO II  | MARCO TEÓRICO                  |
| CAPÍTULO III | METODOLOGÍA                    |
| CAPÍTULO IV  | RESULTADOS Y DISCUSIÓN         |
| CAPÍTULO V   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES |
|              | ANEXOS                         |

**ATENTAMENTE.**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*"La Técnica al Servicio de la Patria"*

C. TANIA MONTOYA GARCÍA  
ENCARGADA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



TMG/ammc.



**2025**  
Año de  
La Mujer  
Indígena

Blvd. Felipe Pescador No. 1830 Ote.,  
Durango, Dgo., C.P. 34080 Tels. 618-818-69-  
36  
e-mail: depposgrado@itdurango.edu.mx  
tecna.mx | itdurango.edu.mx





## Agradecimientos

Este proyecto de tesis fue desarrollado en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Durango, en el área de Maestría en Ingeniería. Durante la realización de la presente investigación de posgrado, el autor recibió una beca académica por parte del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología CONAHCYT pasando a llamarse Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación SECIHTI (850020).

Quiero expresar mi más grande agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por su apoyo financiero, que hizo posible la realización de este proyecto de investigación. Así como al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango, al Tecnológico del Valle del Guadiana y al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral y Regional (CIIDIR) por proporcionar equipo e infraestructura para llevar a cabo dicha investigación, la cual pretende contribuir al desarrollo científico de la región y del país. Expresar también un gran agradecimiento a las personas que apoyaron y contribuyeron significativamente en la realización del proyecto. A mis padres que han sido fuente de dedicación y fortaleza. A mi director de tesis, por su dedicación, paciencia y experiencia en el área, siendo sus indicaciones y sugerencias fundamentales en la realización de esta investigación. A los catedráticos de la Maestría en ingeniería por sus enseñanzas y su impacto en mi desarrollo académico, a catedráticos del CIIDIR quienes proporcionaron equipo y la infraestructura necesaria. A mis compañeros de posgrado quienes me apoyaron y aportaron ideas colaborando en el proyecto.





# Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

## Resumen

El aumento en la demanda de alimentos, ha llevado a que se opte por utilizar nuevas técnicas que aumenten la producción agrícola, sin embargo el uso excesivo de sustancias químicas, ha provocado la degradación del suelo y afecciones en los humanos, por lo que se buscan alternativas que ayuden a disminuir el uso de este tipo de compuestos; sin embargo, aunque ya existen técnicas que son capaces de identificar contaminantes en los suelos agrícolas, estas suelen ser costosas y requieren de cierta especialización para la obtención de resultados, es por ello, que se propone el desarrollo de un sustrato o superficie nano estructurada empleando nanotubos de carbono (CNT), mediante el acoplamiento de nano partículas de plata (AgNPs), en conjunto con la espectroscopia Raman (RS). Estos sustratos nanoestructurados fueron hechos utilizando CNT y AgNPs para realizar pruebas mediante la espectroscopia Raman mejorada por superficie (SERS), para la detección de glifosato en muestras de suelo, estos sustratos fueron elaborados mediante la deposición de películas delgadas esparcidas en superficies flexibles. Además, los sustratos fueron sometidos a pruebas eléctricas, conectándolos a una fuente de voltaje utilizando concentraciones altas y bajas de muestras diluidas de glifosato (GLY), aplicando diferentes potenciales eléctricos, para poder observar variaciones en las mediciones obtenidas. Los resultados indican una relativa sensibilidad en las señales SERS de los voltajes aplicados, teniendo patrones cercanos a los del espectro característico del glifosato. La sencilla fabricación del sustrato nanoestructurado propuesto hace que sea una plataforma útil para la práctica y accesible en la detección de glifosato, además de la posibilidad de poder emplearse para la identificación de otras sustancias agroindustriales o de interés.

**Palabras clave:** Glifosato, nanosensor, nanopartículas de plata, SERS, nanotubos de carbono.





## Abstract

*The increase in demand for food has led to the use of new techniques that increase existing agricultural production. However the excessive use of substances such as: fertilizers and pesticides, has caused solid degradation and diseases in humans, so alternatives are sought to help reduce type of substances , this project aims to help in the detection of these substances, however, although there are already techniques that to be able of identifying contaminants on soils, these are usually expensive and require come specialization to obtain results, that is why the development of a nanostructured substrate or surface using CNT thought the coupling AgNPs with RS. Electrically active nanostructured substrates made of carbon nanotubes and silver nanoparticles have been studied for surface Raman spectroscopy SERS-based detection of diluted glyphosate samples. The nanostructured substrates are prepared by means of a thin film deposition of dispersed carbon nanotubes and silver nanoparticles composite mixtures on flexibles substrates, which are electrically connected to an electric potential source. SERS measurements are performed for glyphosate detection at two extreme concentrations, at different electric potential applied to the conductive substrate. The results indicate a relevant sensitivity of SERS signals enhancement to applied voltages, observables at Raman features associated with glyphosate. The facile fabrication of the proposed substrate, along with the practicality of simple electrical connections and set-up for SERS based measurement, make this proposal a potentially useful platform for practical and accessible detection of glyphosate, possibly extendable to other critical agrochemical or molecules of interest.*

**Index terms:** Glyphosate, Nano sensor, silver nanoparticles, SERS, carbon nanotubes.





# Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

## Tabla de Contenido

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Capítulo 1 Introducción</b>                                                   | 1  |
| Planteamiento del problema                                                       | 2  |
| Objetivos                                                                        | 2  |
| <i>Objetivo general</i>                                                          | 2  |
| <i>Objetivos específicos</i>                                                     | 2  |
| Justificación                                                                    | 3  |
| Hipótesis                                                                        | 3  |
| Delimitación del problema                                                        | 4  |
| Estado del arte                                                                  | 4  |
| <i>Técnicas utilizadas para captar glifosato en fuentes hídricas</i>             | 4  |
| <b>Capítulo 2 Marco teórico</b>                                                  | 7  |
| Herbicidas, clasificación y manejo                                               | 7  |
| <i>El uso de herbicidas en México</i>                                            | 12 |
| <i>Glifosato</i>                                                                 | 13 |
| Nanomateriales y nanopartículas                                                  | 14 |
| Nanomateriales a base de carbono                                                 | 15 |
| <i>Nanotubos de Carbono de Pared Simple (SWNT)</i>                               | 16 |
| <i>Métodos para la funcionalización de nanotubos de carbono</i>                  | 16 |
| Nanopartículas metálicas                                                         | 18 |
| <i>Nanopartículas de plata</i>                                                   | 18 |
| <i>Síntesis de nanopartículas de plata</i>                                       | 19 |
| Espectroscopia Raman Mejorada por superficie (SERS)                              | 19 |
| Resumen de capítulo                                                              | 22 |
| <b>Capítulo 3 Materiales y métodos</b>                                           | 23 |
| Desarrollo del sustrato nanoestructurado                                         | 23 |
| <i>Dispersión de nanotubos de carbono</i>                                        | 24 |
| <i>Síntesis de nanopartículas de plata</i>                                       | 25 |
| <i>Elaboración de sustrato nanoestructurado</i>                                  | 29 |
| <i>Deposición de nanomateriales en superficies de vidrio y resina de silicio</i> | 30 |
| Realización de pruebas de campo                                                  | 31 |





|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Capítulo 4 Resultados y discusión</b>                                    | 34 |
| <b>Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones</b>                            | 61 |
| <b>Referencias</b>                                                          | 64 |
| <b>Anexos</b>                                                               | 71 |
| <b>Apéndice A: Artículo publicado y Retribuciones</b>                       | 71 |
| <i>Artículo publicado</i>                                                   | 71 |
| <i>Constancia de participación en Simposio en la presentación de cartel</i> | 73 |
| <i>Cartel publicado de avances de proyecto en Simposio</i>                  | 74 |
| <b>Apéndice B: información de soporte</b>                                   | 75 |
| <i>Nomenclaturas utilizadas</i>                                             | 75 |
| <i>Información de soporte</i>                                               | 76 |
| <i>Sustancias analizadas</i>                                                | 76 |
| <i>Clasificación de herbicidas según modo de acción</i>                     | 77 |
| <i>Infraestructura y equipo</i>                                             | 80 |
| <b>Apéndice C: Pruebas y diseños realizados</b>                             | 82 |
| <i>Elaboración de moldes</i>                                                | 82 |
| <i>Variación de amplitud y desfase en sensores nanoestructurados</i>        | 83 |
| <i>Pruebas de resistencia realizadas a los CNT</i>                          | 84 |
| <i>Código diseñado para el cálculo de los Enhancement Factors Ef</i>        | 85 |





## Índice de figuras

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 3.1 Procedimiento para el desarrollo del sustrato nanoestructurado</i>            | 24 |
| <i>Figura 3.2 Dispersión de nanotubos de carbono</i>                                        | 25 |
| <i>Figura 3.3 Síntesis de Nanopartículas de plata</i>                                       | 26 |
| <i>Figura 3.4 Morfología de las nanopartículas de plata</i>                                 | 27 |
| <i>Figura 3.5 Tonalidades obtenidas en la síntesis de nanopartículas</i>                    | 28 |
| <i>Figura 3.6 Deposición de materiales en superficies de vidrio y PDMS</i>                  | 30 |
| <i>Figura 3.7 Proceso de fabricación del sustrato para aplicación de voltaje</i>            | 31 |
| <i>Figura 3.8 Pruebas con muestras de suelo</i>                                             | 32 |
| <i>Figura 3.9 Glifosato en distintas concentraciones</i>                                    | 33 |
| <i>Figura 4.1 Espectrómetro Raman XploRA Plus</i>                                           | 34 |
| <i>Figura 4.2 Mediciones en sustratos nanoestructurados</i>                                 | 35 |
| <i>Figura 4.3 Imágenes SEM de SWNT y CNT+AgNPs</i>                                          | 36 |
| <i>Figura 4.4 Difractogramas XRD de SWNTs y CNT+AgNPs</i>                                   | 37 |
| <i>Figura 4.5 Espectros Raman de sustratos depositados en vidrio y PDMS</i>                 | 38 |
| <i>Figura 4.6 Espectros del azul de metileno en distintos sustratos</i>                     | 39 |
| <i>Figura 4.7 Caracterización de la molécula de glifosato</i>                               | 40 |
| <i>Figura 4.8 Caracterización de glifosato utilizando nanopartículas de plata</i>           | 41 |
| <i>Figura 4.9 Caracterización de glifosato empleando distintos sustratos</i>                | 42 |
| <i>Figura 4.10 Sustrato de nanopartículas de plata dañada</i>                               | 43 |
| <i>Figura 4.11 Glifosato caracterizado en diferentes concentraciones</i>                    | 44 |
| <i>Figura 4.12 Sustratos de plata caracterizando glifosato en distintas concentraciones</i> | 45 |
| <i>Figura 4.13 Nanotubos caracterizando glifosato en distintas concentraciones</i>          | 47 |
| <i>Figura 4.14 Sustratos con CNT+AgNPs caracterizando glifosato</i>                         | 48 |
| <i>Figura 4.15 Sustrato nanoestructurado caracterizando glifosato diluido y concentrado</i> | 49 |
| <i>Figura 4.16 Espectro Raman del glifosato caracterizado aplicando voltaje</i>             | 52 |





# Educación

Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figura 4.17 Enhancement factors de mediciones SERS .....</b>                                   | <b>53</b> |
| <b>Figura 4.18 Caracterización de glifosato en muestras de suelo .....</b>                        | <b>54</b> |
| <b>Figura 4.19 Lecturas SERS en muestras caracterizadas de azul de metileno .....</b>             | <b>56</b> |
| <b>Figura 4.20 Caracterización de la molécula del oxido de fosforo .....</b>                      | <b>57</b> |
| <b>Figura 4.21 Oxido de fosforo caracterizado en distintas concentraciones sobre vidrio .....</b> | <b>58</b> |
| <b>Figura 4.22 Oxido de fosforo caracterizado en distintas concentraciones sobre PDMS .....</b>   | <b>59</b> |





## Índice de tablas

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabla 1.1 Principales parámetros de las técnicas utilizadas para detectar glifosato .....</b> | <b>5</b>  |
| <b>Tabla 2.1 Clasificación de herbicidas según época de aplicación .....</b>                     | <b>8</b>  |
| <b>Tabla 2.2 Clasificación de acuerdo con su selectividad .....</b>                              | <b>9</b>  |
| <b>Tabla 2.3 Clasificación de acuerdo con su factor de acción .....</b>                          | <b>9</b>  |
| <b>Tabla 2.4 Clasificación de herbicidas según su modo de acción .....</b>                       | <b>11</b> |
| <b>Tabla 2.5 Herbicidas de mayor uso y sus efectos .....</b>                                     | <b>12</b> |
| <b>Tabla 2.6 Funcionalización química de los CNT .....</b>                                       | <b>17</b> |
| <b>Tabla 3.1 Composición de suelos para cultivos .....</b>                                       | <b>31</b> |
| <b>Tabla 3.2 Propiedades en la composición de suelos aptos para cultivo . ....</b>               | <b>32</b> |



## Capítulo 1 Introducción

El aumento en la población ha llevado a la necesidad de producir mayor cantidad de alimentos en plazos más cortos, por lo que los agricultores han buscado métodos que aumenten la producción en sus cultivos (Alexandre de Toledo Alves et al., 2024). Sin embargo, para esto, los productores enfrentan desafíos como lo es la presencia de plagas en los cultivos, de las cuales las más comunes es el surgimiento de maleza silvestre lo que afecta en gran medida las cosechas, (Shoman et al., 2024). “Como maleza silvestre se considera a toda planta que crece fuera de su sitio e invade otro perjudicándolo” (González Ruiz et al., 2022).

El surgimiento de maleza o hierba silvestre tiene un impacto negativo en la producción agrícola y su control es un gran reto para este sector; debido a que las malezas captan rápidamente recursos necesarios para el crecimiento de los cultivos, como son; nutrientes, agua, luz y espacio (Kubiak et al., 2022). Este tipo de plaga es uno de los factores que afectan la producción global, causando aproximadamente un 31% de pérdidas por alrededor de 1800 especies de maleza registradas, resultando en una derrama económica anual de 32 billones de dólares USD (Godwin et al., 2024). De ahí que desde la segunda mitad del siglo XX se optara el uso de sustancias que erradiquen este tipo de plantas. La aplicación de herbicidas en gran medida, deterioran significativamente la biodiversidad y el balance ecológico del medioambiente, ya que afectan insectos que son beneficios para el crecimiento de las plantas, la actividad microbiológica, causan contaminación del aire y mantos acuíferos subterráneos (Kusumavathi et al., 2025).

Por ello, se requiere el desarrollo de técnicas y alternativas que detecten de mejor manera la presencia de este tipo de sustancias nocivas para el ser humano, además que no sean tan complejas de usar, que se requiera algún tipo de especialización o sean costosas de producir; por

lo que llevó a desarrollar un sustrato que sea de fácil uso, flexible, económico, así como el acceso a los materiales para su fabricación sea sencillo, se pretende el uso de la nanotecnología (NT) para la detección de glifosato el cual como ya se mencionó, es uno de los herbicidas más utilizados en el mundo y en conjunto de la RS ayudará a la detección de este compuesto químico en concentraciones relativamente bajas.

## Planteamiento del problema

La presencia de contaminantes y otros residuos en suelos agrícolas puede ser un problema que presenta diferentes niveles de severidad para diferentes áreas de nuestro estado y del país. Aunado a esto, en muchas ocasiones las concentraciones de estas sustancias indeseables pueden ser demasiado bajas, complicando su detección y adecuada remoción. En consecuencia, es necesario contar con técnicas para detectar sustancias contaminantes y residuos en suelos agrícolas, que sean prácticas, rápidas, y que no requieren preparaciones demasiado complejas.

## Objetivos

### *Objetivo general*

Producir una superficie nanoestructurada a base de nanotubos de carbono CNT (*Carbon Nanotubes*) decorados con nanopartículas metálicas (NPs), como sustrato activo para mediciones de espectroscopía Raman mejorada por superficie (SERS), aplicada en la detección de glifosato a diferentes concentraciones en suelos agrícolas.

### *Objetivos específicos*

- Desarrollar un procedimiento eficaz para la dispersión adecuada de nanotubos de carbono de pared simple SWNT (*Single Wall Carbon Nanotubes*).

- Sintetizar nanopartículas de plata (AgNPs) para su acoplamiento a las paredes de los nanotubos SWNT.
- Elaborar películas delgadas con SWNT decorados con AgNPs en diferentes sustratos, para pruebas de espectroscopia Raman.
- Realizar experimentos SERS sobre los sustratos nanoestructurados desarrollados, para la detección de muestras de glifosato en diferentes concentraciones.

## Justificación

El glifosato, es un herbicida ampliamente utilizado en la agricultura desde mediados del siglo pasado para el control de maleza silvestre, sin embargo, según algunos estudios, tiene efectos adversos en suelos agrícolas. Algunos de ellos son que afecta la integridad del suelo como tal, ya que puede tener un impacto negativo en la diversidad y su función, al provocar la disminución de la materia orgánica del suelo, además de causar cambios en la disponibilidad de los nutrientes en los suelos, según algunos estudios realizados (González Ortega & Fuentes Ponce, 2022). De los problemas que enfrentan los suelos, es la contaminación por sustancias o por la concentración de materiales que son nocivos afectando la biodiversidad y la salud de los seres humanos, por ello que existan técnicas para la detección de contaminantes y residuos es de suma importancia.

## Hipótesis

El desarrollo del sustrato nanoestructurado a base de nanotubos de carbono (CNT) con AgNP's, usados para mediciones por medio de la espectroscopia Raman mejorado por superficie SERS (surface-enhanced Raman spectroscopy), permitirá la detección eficiente de contaminantes y/o residuos químicos en muestras agrícolas.

## Delimitación del problema

El proyecto tiene como propósito principal el desarrollo de una superficie nanoestructurada para la detección de sustancias contaminantes; una vez demostrada su funcionalidad, podría ser utilizada para la caracterización de una gran variedad de materiales y compuestos químicos. Esta flexibilidad va en conjunto con las técnicas de espectroscopia existentes, en este caso, la espectroscopia Raman (RS). Sin embargo, debido a las limitaciones en tiempo y en especial, a las implicaciones que involucran los experimentos con sustancias químicas realizadas en un laboratorio eminentemente dedicado a la investigación en ingeniería electrónica; el proyecto estará acotado a la caracterización de glifosato y posteriormente a alguna otra que será determinada, al fin de evaluar la funcionalidad del sustrato.

## Estado del arte

### *Técnicas utilizadas para captar glifosato en fuentes hídricas*

El glifosato (GLY) es el herbicida más utilizado alrededor del mundo, su presencia se ha detectado en ambientes acuáticos afectándolos. Sin embargo, su mecanismo de toxicidad no se comprende completamente especialmente su acción en animales (Niu et al., 2025). Resultados demuestran que la exposición a esta sustancia altera significativamente el comportamiento de animales acuáticos causando daño histopatológico, análisis posteriores revelaron que la exposición al GLY induce hipoxia y reduce la producción de hemocianina y afectar la capacidad de transportar oxígeno (Gao et al., 2023). Son muchos los métodos que se han desarrollado para identificar materiales que contaminen el suelo mantos acuíferos, la siguiente tabla 1.1 muestra las técnicas existentes más utilizadas para la detección de GLY realizando pruebas en depósitos de agua.

**Tabla 1. 1**

*Principales parámetros de las técnicas utilizadas para detectar glifosato 2021*

| <b>Técnica utilizada</b>                        | <b>Tiempo de tratamiento</b> | <b>Método y complemento</b>                    | <b>Rango de detección (ug / L)</b> | <b>Referencias</b>                      |
|-------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Cromatografía iónica</b>                     | 1-3 h                        | Elución con un tampón alcalino                 | 42                                 | (Carretta et al., 2019)                 |
| <b>Cromatografía de gases</b>                   | 1 h                          | Derivatización con isopropilcloroformiato      | 1*10e•5                            | (H. Kataoka et al., 2016)               |
| <b>Cromatografía líquida de alta resolución</b> | 30 min                       | Derivatización post-columna con OPA-MERC.      | 0,16                               | (Zacharis & Tzanavaras, 2013)           |
| <b>Electroforesis capilar</b>                   | 1-2 h                        | Derivatización preliminar<br>fenilotiocianato  | 5                                  | (Rose et al, 2018)                      |
| <b>Técnica de inmunoensayo</b>                  | 30 min                       | Kit de ensayo en placa de glifosato de Abraxis | 1,42                               | (Rendón-von, Osten & Dzul-Caamal, 2017) |
| <b>Resonancia magnética nuclear</b>             | 1 h                          | Derivatización con ácido trifluoroacético      | 1,5*10e-5                          | (Kudzin et al, 2002)                    |

Tabla 1.1. Se mencionan características de las técnicas más utilizadas para detectar la presencia de glifosato en mantos acuíferos. Camilo-Haro Cristian (2021).

La mayoría de estos métodos consisten en técnicas de cromatografía, técnicas espectrofotométricas y técnicas electroquímicas, por mencionar algunas; sin embargo, surgen muchas desventajas con estos métodos analíticos las cuales incluyen: la falta de instrumentación portátil, equipamiento costoso y largos tiempos de análisis; la necesidad de laboriosos pasos de pretratamiento, personal experimentado, reduciendo la capacidad de analizar las muestras en el momento. Como alternativas a estos métodos tradicionales se han reportado otros, por ejemplo;

algunos utilizan la fluorescencia que emiten ciertas nanopartículas metálicas moduladas para detectar GLY (Ekerim et al., 2025).

La fabricación de nanocompuestos magnéticos para la detección y remoción de esta sustancia u otras similares utilizando la síntesis de NPs que son capaces de detectar este material en concentraciones relativamente bajas (Du et al., 2025). Además, se han desarrollado métodos que hacen uso de microscopias, nanopartículas metálicas y SERS, que tienen como propósito hacer sistemas efectivos, que sean portátiles, rápidos y de bajo costo capaces de arrojar resultados sin la necesidad de equipo del laboratorio ostentoso (Fuenzalida et al., 2024). Se han desarrollado sensores capacitivos los cuales están basados en polímeros y microelectrodo que detectan GLY en agua, su principio de funcionamiento se basa en un sensor electroquímico que se encuentra en contacto con el líquido que contiene el analito de interés. Cuando el analito alcanza este electrodo, se produce una reacción electroquímica (E. V. Sierra et al., 2008). Investigaciones hechas de los Nanoclustes metálicos (MNCs) han exhibido tener también excelentes propiedades en fluorescencia y estabilidad lumínica para ser utilizados en la detección del GLY en muestras de suelo además de ser una técnica de bajo costo y no ser invasiva (Wang et al., 2024).

La resonancia plasmónica de superficie localizada (LSRP) es una técnica empleada que permite la detección colorimétrica o espectroscópica, hace uso de las nanopartículas de cobre (CuNPs) que muestran propiedades similares a las AgNPs y las nanopartículas de oro AuNPs, las cuales son de las mayormente utilizadas para este tipo de análisis (Zeebaree et al., 2025). El empleo de las NPs ha demostrado tener propiedades ópticas que mejoran el nivel de detección para este tipo de sustancias, son numerosos los estudios se han centrado en caracterizar el GLY en diversas formas con el propósito de detectarlo de la mejor manera.

## Capítulo 2 Marco teórico

En esta sección se presentarán conceptos básicos y características de los materiales que se emplearon para el desarrollo del sustrato nanoestructurado, que se utilizara para la detección de glifosato presente en muestras de suelo, el cual ha influido y se utiliza comúnmente en la producción agrícola pero, que sin embargo, llegan a afectar la salud del ser humano a largo plazo (Restrepo Guerrero & Rincón Ruiz, 2021), por ello es de importancia que se desarrollen técnicas que sean capaces de detectar este tipo de sustancias en concentraciones bajas.

### Herbicidas, clasificación y manejo

Los herbicidas son un grupo de compuestos químicos órgano-sintéticos utilizados en la agricultura para el control de maleza silvestre, debido a la llamada “Revolución Verde”, este tipo de sustancias fueron introducidas en el país a mediados del siglo XX (Aguilar González et al., 2022). Estos fueron descubiertos por científicos ingleses y estadounidenses durante la década de 1940, los cuales son usados y ampliamente distribuidos para el control de plagas (Ma et al., 2025). Las malezas silvestres son una problemática en las plantaciones dada la competencia que ejercen en los cultivos y la limitada disponibilidad de plaguicidas para su control y remoción, los cuales sean selectivos (Picado-Arroyo & Herrera-Murillo, 2022). El uso continuo de estas sustancias con múltiples aplicaciones en el mismo ciclo agrícola provoca el surgimiento de biotipos de maleza resistente; esta resistencia les provee a las malezas la capacidad hereditaria de crecer y reproduce (Alcántara-de la Cruz, 2022). Los herbicidas pueden ser clasificados de acuerdo con su época de aplicación, selectividad, modo de acción, familia química y modo de acción.

## Época de aplicación

La época de aplicación de los herbicidas depende de la etapa de crecimiento en la que se encuentra la maleza y se clasifican en tres; Presiembra (PS), Preemergencia (PRE), Postemergencia, tabla 2.1.

**Tabla 2. 1**

*Clasificación de herbicidas según época de aplicación 2020.*

| <b>Etapa</b> | <b>Modo de aplicación</b>                                                                                     | <b>Herbicida</b>            |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>PS</b>    | Se aplica antes de sembrar el cultivo deseado, se clasifican en dos; presiembra foliar y presiembra al suelo. | Glifosato, Paraquat y 2,4-D |
| <b>PRE</b>   | Se aplica después de la siembra, pero antes que surja la maleza y el cultivo.                                 | Metribuzina y Atrazina      |
| <b>POST</b>  | Se aplica después que haya brotado la maleza en el cultivo.                                                   | Glifosato y Paraquat        |

Tabla 2.1. Se mencionan las épocas de aplicación de los herbicidas. CEDRSSA (2020).

## Selectividad

Los factores que pueden influir en la selectividad de un herbicida controlando la capacidad de controlar las malezas sin dañar los cultivos deseados, incluyen. su composición química, características del cultivo, condiciones ambientales, practicas agronómicas y los mecanismos de acción selectiva (De Prado & Cruz-Hipolito, 2005). La comprensión de estos factores es esencial para maximizar la eficiencia del control de plagas mientras se minimiza el daño a los cultivos (Marcela Bernal Barreto et al., 2020). Los herbicidas pueden clasificados como selectivos y no selectivos, así como se muestra en la tabla 2.2.

**Tabla 2. 2***Clasificación de acuerdo con su selectividad 2020.*

| <b>Clasificación</b> | <b>Modo de aplicación</b>                                                                                                                                   | <b>Herbicida</b> |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>Selectivos</b>    | A ciertas dosis, formas y épocas de aplicación elimina algunas plantas sin dañar significativamente a otras                                                 | Atrazina         |
| <b>No selectivos</b> | Aquellos que ejercen su toxicidad sobre toda clase de vegetación y deben utilizarse en terrenos sin cultivo o evitar el contacto con las plantas cultivadas | Glifosato        |

Tabla 2.2. Se mencionan como se clasifican los herbicidas según su selectividad. CEDRSSA (2020).

**Tipo de acción**

De acuerdo con la forma en que se aplican los herbicidas en el campo se puede conseguir aquellos que se aplican en el follaje o al suelo directamente; también es posible conseguir herbicidas que se aplican disueltos en agua como lo es el GLY (Alvaro, 2007). Este factor de selección se clasifica en dos: de contacto y sistémicos, ver tabla 2.3.

**Tabla 2. 3***Clasificación de acuerdo con su factor de acción 2020*

| <b>Selección</b>   | <b>Modo de aplicación</b>                                                                                                                                          | <b>Herbicida</b>        |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>De contacto</b> | El herbicida elimina solo las partes con las que entra en contacto y tiene un transporte dentro de la planta.<br>Se aplica al suelo o al follaje, son absorbidos y | Paraquat y Bromoxinil.  |
| <b>Sistémico</b>   | transportados a toda la planta desde la raíz hasta otros órganos subterráneos.                                                                                     | 2,4-D y el Prosulfuron. |

Tabla 2.3. Donde se menciona la clasificación de herbicidas según su factor de acción. CEDRSSA (2020).

## **Familia química**

Se basa en la composición de las sustancias usadas en la elaboración de los herbicidas, dentro de esta familia química tienen propiedades similares y el mismo modo de acción; las principales son: triazinas, dinitroanilinas, fenoxiacéticos, cloroacetamidas, ciclohexanodinas, sulfonilureas, bipiridilos (referencia). Según (referencia) en México existen 65 ingredientes activos en alrededor de 300 herbicidas comerciales (González Ruiz et al., 2022).

## **Modo de acción**

Es una secuencia de eventos que ocurren desde la absorción del herbicida hasta que muere la planta, en la siguiente tabla 2.4 se muestra esta clasificación que permite diseñar los programas de control de maleza más eficientes y evitar efectos secundarios como la presencia de residuos en el suelo, el cambio de especies y desarrollo de biotipos resistentes (González Ortega & Fuentes Ponce, 2022)

La forma más útil de clasificar a los herbicidas es por su modo de acción, “el modo de acción es la secuencia de eventos que ocurren desde la adsorción hasta la muerte de la planta” (De Prado & Cruz-Hipolito, 2005). Los herbicidas con el mismo modo de acción tienen el mismo comportamiento de adsorción y transporte produciendo síntomas similares en las plantas tratadas. Además, su clasificación permite predecir su espectro de control de maleza, época de aplicación, selectividad a cultivos y permanencia en el medio (Peruzzolo et al., 2021). Finalmente, este tipo de clasificación permite diseñar programas de control químico de maleza más eficientes y evitar posibles efectos negativos como son: la presencia de residuos en el suelo, el cambio de especies de maleza y el desarrollo de biotipos resistentes a la aplicación de herbicidas (Salomão et al., 2020).

Tabla 2. 4

Clasificación de herbicidas según su modo de acción 2006

| MODO DE ACCIÓN                                 | FAMILIA QUÍMICA                                                                                                                                                | CULTIVOS                                                                     |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Reguladores de crecimiento</b>              | Fenoxicarboxílicos, Benzoicos, Piridincarboxílicos, Quinolincarboxílicos.                                                                                      | Maíz, sorgo, cereales, soya, cacahuete pastos, áreas no agrícolas.           |
| <b>Inhibidores de crecimiento</b>              | Dinitroanilinas.                                                                                                                                               | Soya, algodón, maíz, arroz.                                                  |
| <b>Inhibidores de la fotosíntesis</b>          | Cloroacetamidas, Tiocarbamatos, Ácidos, Benzoicos, Triazinas, Triazinonas, Triazolinonas, Uracilos, Benzotiadizoles, Nitrilos, Amidas.                         | Maíz, soya, algodón, sorgo, agave, cítricos, caña, forrajes, cereales, papa. |
| <b>Inhibidores de la síntesis de pigmentos</b> | Isoxazolidinonas, Triazoles, Isoxazoles, Tricetonas, Benzoilpirazoles, Piridazinonas.                                                                          | Soya, algodón, áreas industriales, maíz.                                     |
| <b>Inhibidores de lípidos</b>                  | Ariloxifenoxipropionatos, Ciclohexanodionas, Imidazolinonas, Triazolopirimidinas, Pirimidiniltioben-Zoatos, Sulfonilaminocarbonil, triazolinonas, Bipiridilos. | Soya, algodón, trigo, cebada.                                                |
| <b>Destrucción de membranas celulares</b>      | Difeniléteres, Triazolinonas, Oxadiazoles, N-fenil-italimidas, Arsenicales orgánicos.                                                                          | Soya, algodón, cebolla, col, cacahuete, prados.                              |

Tabla 2.4. Se mencionan como se clasifican los herbicidas según su modo de acción para aplicarse en cultivos. ER Robles (2006) “TABLA COMPLETA EN APÉNDICE C: INFORMACIÓN DE SOPORTE”.

## *El uso de herbicidas en México*

**Tabla 2. 5**

*Herbicidas de mayor uso y sus efectos 2021*

| Herbicida                                                                 | Modo de acción                                                                                                                  | Categoría toxicológica | Implicaciones medicas                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Paraquat (1,1-dimetil-4,4-bipiridilo dicloruro)</b>                    | Es un herbicida de contacto, actúa en la superficie del follaje, interfiriendo con a fotosíntesis.                              | III                    | Causa insuficiencia orgánica múltiple, en la cual el pulmón es el órgano objetivo primario.                                         |
| <b>Glifosato (N-fosfonometil-glicina)</b>                                 | Es un herbicida de amplio espectro no selectivo, elimina pastos anuales como perennes como hierbas de hoja ancha.               | IV                     | Probable cancerígeno para los seres humanos.                                                                                        |
| <b>Atrazina (6-cloro-N-etil-N-1-metiletil-1,3,5-triazina-2,4-diamina)</b> | Es un herbicida selectivo que se aplica al suelo, es absorbido por las raíces de la planta durante el crecimiento de la maleza. | IV                     | Causa alteraciones en las funciones en algunos órganos, problemas de reproducción, defectos macrosómicos y alteraciones hormonales. |
| <b>2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético)</b>                             | Es de los más antiguos, formaba parte del compuesto químico defoliante, conocido como el “Agente naranja”.                      | III y IV               | Puede tener efectos cancerígenos y mutágenos.                                                                                       |

Tabla 2.5. Se clasifican los herbicidas más utilizados en el país, así como el grado de toxicidad y los riesgos a la salud que causan en seres humanos. Aguilar-González Xóchilt et al. (2021).

En México como en el resto del mundo, el uso de herbicidas es aceptado por los productores, debido a que facilita el control y combate contra malezas no deseadas en cultivos, para una correcta selección se toman en cuenta; la eficacia, dosis administrada, aplicación y su ingrediente activo (Hernández Sierra et al., 2021). Estos agrotóxicos se usan hoy en día en la agricultura y para mantener jardines y áreas verdes urbanas (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), 2023). La dependencia de agroquímicos para controlar la maleza, el uso de sustancias durante varios ciclos de siembra, la ausencia de control cultural y la poca rotación de cultivos, generan una alta probabilidad del surgimiento de biotipos resistentes (Figuerola et al., 2024). En México se publicó un decreto, en el que prohíbe la importación de diversas toxinas y plaguicidas de alta peligrosidad (Aguilar-González et al., 2022), la siguiente tabla 2.5 muestra los tipos de herbicidas más utilizados, así como los efectos que causan en el ser humano.

### ***Glifosato***

El glifosato es un herbicida de amplio espectro no selectivo, utilizado para la erradicación de malezas, (Nogueira et al., 2021). Su función consiste en destruir las plantas consideradas como malas hierbas por los agricultores, es decir aquellas que roban espacio, luz, agua y nutrientes a la siembra (Vargas Moranth et al., 2023). El GLY es de los herbicidas más usados en el mundo, actúa interfiriendo en la síntesis de aminoácidos esenciales, eliminando a la maleza silvestre, su uso aumento al introducirse cultivos genéticamente modificados tolerantes a esta sustancia (Lima et al., 2021). Gracias a su amplia aplicación, la demanda de este herbicida ha aumentado sustancialmente, estudios recientes realizados en 2022, estiman que su producción mundial fue alrededor de 900,000 toneladas (Ma et al., 2025). Esto ha implicado que crezcan casos de intoxicaciones y contaminación de recursos naturales, estudios han evaluado que la toxicidad del GLY en animales y en el ambiente

muestran que las formulaciones comerciales son más tóxicas que el componente activo (Sobrero et al., 2022).

La mayoría de las investigaciones más recientes en relación con los herbicidas y la salud humana se enfocan en el GLY y su compuesto de degradación, sin embargo, existe atención en otro tipo de sustancias (Aguilar-González et al., 2022). El interés científico por el GLY se debe a la polémica por el incremento en el uso de esta sustancia relacionando a los cultivos transgénicos que han ido desplazando a los naturales, ya que estos resisten a la aplicación de este tipo de agente (R. H. Sierra et al., 2021).

## Nanomateriales y nanopartículas

En los últimos años se han logrado grandes avances en el campo de la nanotecnología, especialmente en la fabricación de sensores electrónicos los cuales poseen un gran número de aplicaciones en la industria (Anzar et al., 2020). Los nanomateriales a escala nanométrica han mostrado distintivas propiedades en comparación con sus contrapartes en escala macrométrica, principalmente como resultado de una mayor relación superficie-tamaño (Xu et al., 2025). Al hablar de nanomateriales se refiere a una sustancia o conjunto de sustancias en escala de los nanómetros donde los constituyentes son átomos (acercamiento lo básico César Germán Lizarazo-Salcedo et al., 2018). La ciencia de los nanomateriales se erige como una excelente alternativa para coadyuvar en distintas áreas de aplicación, en donde existen estudios novedosos y sustentables donde se hace uso de los nano materiales (Rodríguez-González & Díaz-Cervantes, 2023). La nanotecnología es una nueva ciencia, que ha tomado auge durante las últimas décadas, la cual se basa en el estudio, síntesis, caracterización y aplicación de materiales nano particulados con propiedades bien definidas (Marlon Borja-Borja & Stalin Rojas-Oviedo, 2020). Las nanopartículas

permiten imitar o modificar procesos biológicos y pueden brindar soluciones a viejos problemas asociados.

## **Nanomateriales a base de carbono**

Los nanomateriales de carbono como son; los tubos, los puntos cuánticos, el grafeno, los fullerenos, entre otros, tienen gran importancia tecnológica por sus propiedades eléctricas y ópticas, así como la composición de materiales compuestos con propiedades mejoradas (Martínez-González et al., 2022). Los nanotubos de carbono son un ejemplo de nanopartículas y de la nanotecnología, ya que poseen un diámetro pequeño y pueden ser manipulados química y físicamente (Gómez-Garzón, 2018). Actualmente son empleados en investigaciones relacionadas a la medicina, principalmente, como soportes de apoyo y excipientes para obtener diferentes sistemas de fármacos. Las aplicaciones en diferentes áreas de la medicina han guiado un nuevo campo en el desarrollo de la terapia y el diagnóstico (Leal Monteiro et al., 2022). Los nanotubos de carbono poseen forma alotrópica en forma de cilindro y están hechos a base de carbono con un diámetro en la escala nanométrica (Swargo & Mia, 2025). Originalmente son elaborados a partir de una hoja o capa de grafito y estas a su vez están conformadas por arreglos hexagonales de carbono haciendo una estructura sólida e irrompible. Dependiendo del número de capas, los nanotubos pueden ser de pared simple SWNT, doble DWNT o múltiple MWNT. Pueden ser fabricados por tres métodos; deposición química por vapor, arco eléctrico de alta elasticidad y método de deposición por láser (Salem et al., 2025). Los nanotubos de carbono exhiben una gran variedad de características y propiedades como alta elasticidad, alta conductividad térmica, baja densidad entre otros (Syduzzaman et al., 2025). Debido a estas interesantes propiedades, los nanotubos de carbono han jugado un rol muy significativo en el campo de la nanotecnología, electrónica, óptica y en el campo de la ciencia de los materiales (Zhou et al., 2025). El desarrollo

de los nanotubos de carbono ha tenido resultados positivos en la industria farmacéutica, en el desarrollo de sensores de tratamiento de agua, etc.

### ***Nanotubos de Carbono de Pared Simple (SWNT)***

Los nanotubos de carbono mono estructurados o de pared simple son importantes en investigaciones y aplicaciones tanto en la electrónica como en la biomédica, un SWNT es formado, enrollando una hoja de grafeno; la dirección y magnitud en que esté enrollado define el ángulo y diámetro de su quiralidad respectivamente, resultando en la formación del nanotubo (Elman et al., 2025). Estos parámetros geométricos determinan las propiedades eléctricas de este; por ejemplo, un SWNT puede tener propiedades metálicas o de un semiconductor dependiendo de sus ángulos de quiralidad y diámetros. Además, la energía contenida en la banda prohibida del SWNT es inversamente proporcional al diámetro del nanotubo (Shajan et al., 2025). Sin embargo, los SWNT poseen gran cantidad de aplicaciones como; la fabricación de láminas conductoras, desarrollo de transistores de efecto de campo, nano sensores y dispositivos ópticos para ello se requiere una cantidad de nanotubos con estructuras bien definidas y buenas propiedades eléctricas (Tonkikh et al., 2025).

### ***Métodos para la funcionalización de nanotubos de carbono***

Los procesos actuales para el crecimiento de SWNT generalmente producen mezclas complejas con múltiples quiralidades. Por consiguiente, se han realizado intensos esfuerzos para desarrollar técnicas de postcrecimiento para la separación de SWNT, incluyendo la química selectiva, la dielectroforesis, la oxidación selectiva, la degradación eléctrica, la ultra centrifugación y la cromatografía de envoltura de ADN (Shahidi & Moazzenchi, 2018). “La funcionalización se define como la modificación de propiedades por la adsorción de moléculas en las paredes exteriores de los CNT, obteniendo cambios en las propiedades físicas en sus superficies, como son la

solubilidad y dispersión, ya que les permite tener una mejor interacción con moléculas biológicas” (Andrade Guel et al., 2012). Como se muestra en la tabla 2.6, se mencionan algunos de los procesos para poder tratar SWNT y que sea más fácil su dispersión.

**Tabla 2. 6**

*Funcionalización química de los CNT 2012*

| <b>Tipo de funcionalización</b>      | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Reactivos empleados</b>                                              |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Oxidación química</b>             | Los SWNT se pueden oxidar al reaccionar cuando se agregan diversos grupos funcionales como ácidos carboxilos y en muchos casos su activación a cloruros de adío, esto permite el acoplamiento de moléculas por medio de una unión covalente en las paredes exteriores. | Ácido nítrico, ácido sulfúrico, disulfuro de fenilo, sales de diazonio. |
| <b>Funcionalización con aminas</b>   | Se da por la unión covalente o la adsorción de diferentes aminas a la estructura de los CNT, modificando su superficie fácilmente.                                                                                                                                     | Carbenos, ciclo adiciones, sales de diazonio, hidracinas.               |
| <b>Enlaces de tipo covalente</b>     | Se forma un enlace resistente entre los grupos funcionales adicionados y los SWNT, interactuando con las moléculas de distintas maneras.                                                                                                                               | Ácidos carboxilos y aminas antraceno y derivados.                       |
| <b>Funcionalización no covalente</b> | Se basan en la adsorción de moléculas surfactantes que no alteran las propiedades de los CNT.                                                                                                                                                                          | Compuestos aromáticos, polímeros, poliacrilamida, poliestireno.         |

Tabla 2.6. Se clasifican los herbicidas más utilizados en el país, así como el grado de toxicidad y los riesgos a la salud que causan en seres humanos. Andrade-Guel et al. (2012).

## Nanopartículas metálicas

Los nanomateriales y en particular las nanopartículas metálicas, han contribuido significativamente en varias áreas de la ciencia y tecnología debido a sus propiedades especiales; gran resistencia mecánica, mayor capacidad de purificación de agua capacidad de inhibir agentes contaminantes, lo que garantiza mayor calidad y una vida útil más prolongada de un producto (M et al., 2025). La nanotecnología provee un avance en la manera de resolver problemas modernos en un mundo moderno, las nuevas tecnologías envolventes hacen posible productos más sustentables y procesos más amigables con el medio ambiente (Xu et al., 2025). La industria agrícola es uno de los principales nichos para las nanopartículas metálicas, ya que el impacto que tienen en los suelos agrícolas ha ido ganando atención recientemente (Sun et al., 2021).

### *Nanopartículas de plata*

Las AgNps son objetos metálicos con un tamaño próximo a la milésima parte de una micra que presentan propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas especiales (“Emulsion-Stabilized Silver Nanoparticles vs. Aqueous Solutions: Effects on Aggregation, Elastic Scattering, and Nonlinear Optical Properties,” 2025). Dentro del área de las nanopartículas, las AgNPs poseen numerosas aplicaciones como; agentes antibacterianas, antivirales, fungicidas y además de tener propiedades antiinflamatorias en el área de la medicina, por mencionar algunas (Xu et al., 2025). Las nanopartículas de plata (AgNPs) han sido probadas como un agente antibacteriano capaz de combatir bacterias in vitro causantes de infecciones, la capacidad antibacteriana de las AgNPs exhibe múltiples y simultáneos mecanismos de acción y en combinación con otros agentes antibacterianos como componentes orgánicos o antibióticos (Bruna et al., 2021).

## ***Síntesis de nanopartículas de plata***

Uno de los problemas que presentan las AgNPs, es su escasa estabilidad que llega al extremo que, si las nanopartículas se llegan a tocar entre sí, pueden llegar a formar conglomerados aumentando su tamaño afectando su morfología, lo que puede llevar a que pierdan sus propiedades (“Emulsion-Stabilized Silver Nanoparticles vs. Aqueous Solutions: Effects on Aggregation, Elastic Scattering, and Nonlinear Optical Properties,” 2025). Tradicionalmente, la síntesis de AgNPs se realiza mediante el uso de agentes reductores como lo son; ácido ascórbico, hidracina, borohidruro de potasio o sodio, hidroxilamina, formaldehidos, glucosa o citrato de sodio, por mencionar algunos (Volcanes Moreno et al., 2025). Actualmente la síntesis de AgNPs es muy común debido a las numerosas aplicaciones en varios campos. las AgNPs tienen propiedades únicas como; ópticas y catalíticas propiedades las cuales dependen de la forma y el tamaño de las NP producidas. La producción de las AgNPs con diferentes formas tiene varios usos en diferentes campos de la medicina (Khodashenas & Ghorbani, 2019). El tipo de síntesis usada para la creación de AgNPs determinara sus propiedades tanto eléctricas como ópticas, el agente reductor utilizado en este proceso determinara el comportamiento de auto ensamblaje durante la síntesis (Bi et al., 2025), además de evitar un crecimiento descontrolado.

## **Espectroscopia Raman Mejorada por superficie (SERS)**

“La espectroscopia Raman (RS) funciona mediante un fenómeno óptico de la dispersión inelástica de la luz, para detectar un analito a través de las vibraciones en enlaces moleculares” (D. Zhang et al., 2021). Cuando una muestra se expone a una luz monocromática, se dispersan un pequeño número de fotones, la mayor parte de la luz es dispersada elásticamente a la cual se le llama Rayleigh, esta tiene la misma frecuencia que la luz incidente (Petersen et al., 2021). Aproximadamente uno de entre  $10^6$  a  $10^8$  de fotones, se dispersan en forma inelástica llamándose

dispersión Raman, lo que da lugar a cambios de frecuencia o corrimientos Raman entre los fotones incidentes y dispersados, a medida que se transfiere energía entre el fotón o la molécula; como se observa en la figura 2.1, se muestra un diagrama de la RS analizando una muestra simple y otra con un sustrato SERS (Petersen et al., 2021). En este caso, la energía de los fotones de luz incidente se obtiene transfiriendo energía, lo cual se le conoce como *dispersión Raman Anti-Stokes*, cuando la energía de los fotones incidentes se pierde transfiriéndola a las moléculas, se le conoce como *dispersión Raman Stokes* (Li et al., 2020).

**Figura 2 1.**

*Comparación entre RS y SERS en la caracterización de analitos 2021*

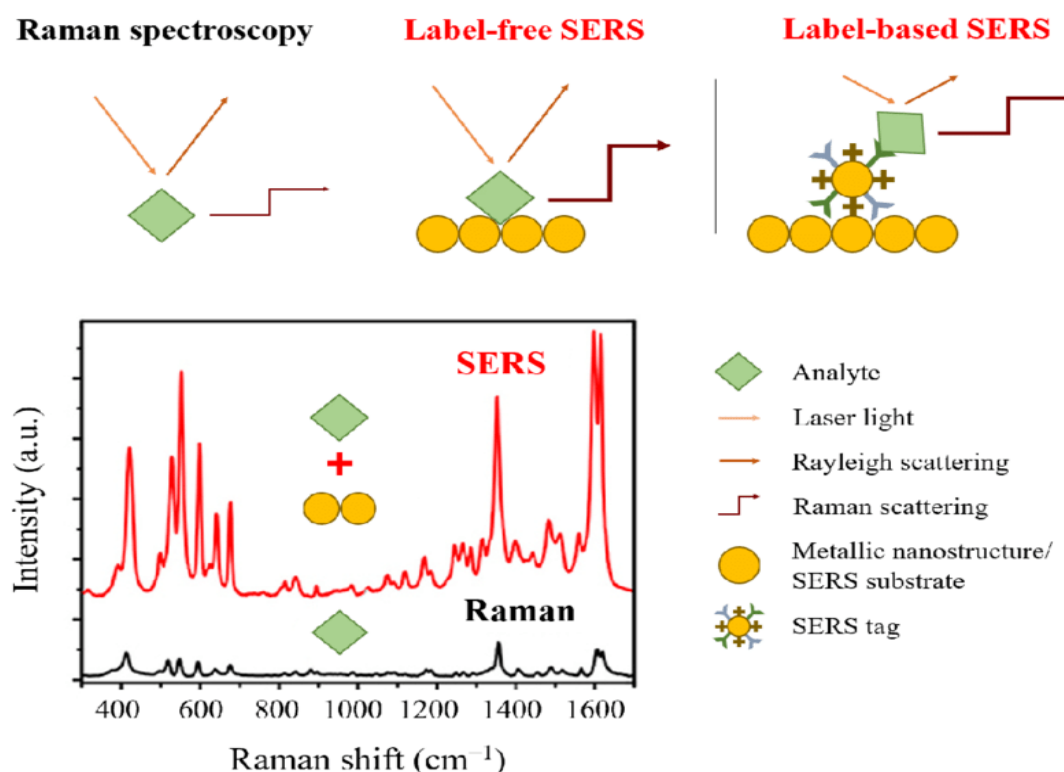


Figura 2.1 Se puede observar la diferencia que existe entre RS y SERS, donde en el SERS se utiliza una superficie nanoestructurada que amplifica la intensidad en los picos característicos de la muestra. Petersen-M et al. (2021).

Los espectros Raman se obtienen a partir de los desplazamientos Raman detectados, en la figura 2.1 se obtuvieron los espectros Raman de una muestra donde los picos negros son de RS y los picos negros usando el SERS, usando nanopartículas de oro (AuNPs) para detectar Piocianina (PCN-) (Petersen et al., 2021). Cada pico Raman del espectro es característico de un enlace molecular específico, lo que permite la identificación molecular de un analito mediante la generación de una vibración específica, es decir, una huella digital vibracional del analito.

La Espectroscopia Raman mejorada por superficie (SERS), fue desarrollada en 1974, convirtiéndose en un método analítico y confiable, ofreciendo una detección precisa de muestras orgánicas, inorgánicas y biológicas para la caracterización de materiales (Ayhan & Ceyhan, 2025). A comparación de otras técnicas analíticas, el SERS es más fácil para análisis cuantitativos y cualitativos, ahorrando tiempo y proporcionando resultados mucho más precisos, además que las muestras no necesitan ser preparadas para este tipo de análisis (Grys et al., 2021). Es una gran técnica óptica empleada para varias aplicaciones, incluida la medicina, microbiología. El desarrollo de sustratos superficiales o planos tienen un interés particular debido a que es fácil de integrarse en obleas fabricadas en un laboratorio y es mejor su elaboración comparada con los sustratos coloidales (Feizpour et al., 2024).

## Resumen de capítulo

En la elaboración de los sustratos nano estructurados, se busca aprovechar las propiedades obtenidas a partir del acoplamiento de AgNPs en los SWNT, abriendo nuevas rutas para la aplicación de estos materiales, siendo una alternativa a las técnicas existentes las cuales suelen ser complejas en la obtención de resultados. El uso de la RS en conjunto con las nano partículas permite la obtención de información de la muestra analizada de manera casi inmediata sin la preparación previa de la muestra además de no ser invasiva lo que ofrece ciertas ventajas, cada vez más se ha ido avanzando en el campo de la nanotecnología ya que los nanomateriales poseen propiedades para la aplicación de varias áreas en la investigación. Al desarrollar este sustrato, se busca que sea capaz de detectar sustancias contaminantes presentes en suelos agrícolas los cuales afectan los ecosistemas cercanos y son perjudiciales para la salud del ser humano, el uso excesivo de herbicidas en los campos de cultivo ha causado la degradación de los suelos de cultivo debido a la sedimentación de residuos que dejan estas sustancias y las malas prácticas que se tienen en su aplicación; una incorrecta aplicación de este tipo de sustancias resulta un problema, ya que si no aplica correctamente un herbicida aumenta la posibilidad que las malezas desarrollen resistencia y, por ende, con el tiempo resultará más costoso y difícil el control de las malas hierbas (Aguilar González et al., 2022). Es importante la rotación del modo de acción del herbicida durante el ciclo de cultivo, con la finalidad de no generar resistencia en la maleza (Villalba, 2009).

## Capítulo 3 Materiales y métodos

En este capítulo se explicará la metodología que se realizó para la elaboración del sustrato nanoestructurado, el cual tiene como objetivo la caracterización de glifosato presentado en bajas concentraciones. Se pusieron a prueba varios métodos para determinar el más adecuado de realizar, además que se pudiera acondicionar de mejor manera al material y equipo con el que se cuenta en el laboratorio enfocado para el estudio de ingeniería electrónica; ubicado en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango.

### Desarrollo del sustrato nanoestructurado

Los sustratos nanoestructurados son superficies que permiten la magnificación de la señal que proviene de una molécula detectada mediante RS, se ha demostrado que estos materiales favorecen el incremento de la sensibilidad de detección (Li et al., 2020). A pesar de que se fabrican usando diferentes técnicas, esta área no se encuentra completamente explorada para poder controlar la producción de estos elementos en un área extensa y de manejar accesible (Cigarroa-Mayorga et al., 2021). Con el desarrollo de este sustrato lo que se intenta es lograr aumentar la capacidad de detectar las energías emitidas por el haz de luz reflejados en la muestra y poder obtener un espectro con mayor definición e intensidad, la figura. 3.1 muestra el proceso de elaboración del sustrato.

**Figura 3.1**

*Procedimiento para el desarrollo del sustrato nanoestructurado 2025.*

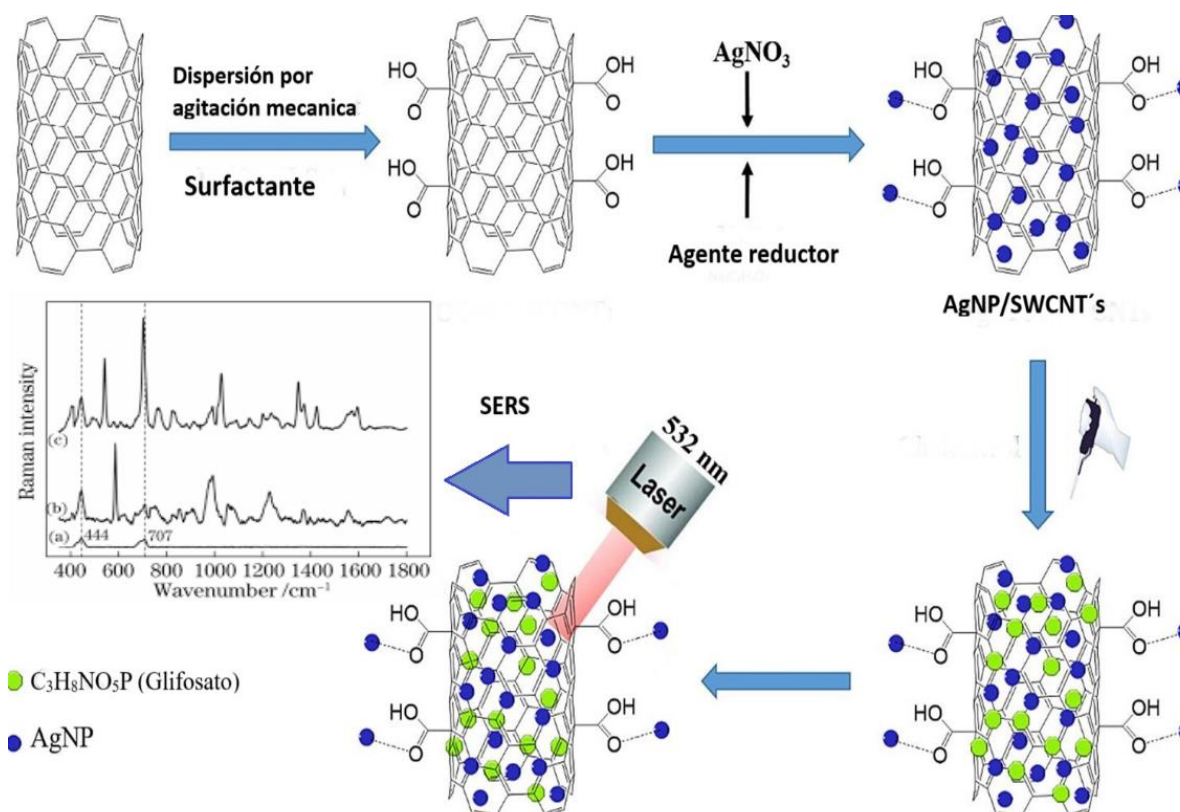


Figura 3.1 Muestra un esquemático del proceso de elaboración del sustrato para la detección de glifosato. Elaboración propia. (2024).

### ***Dispersión de nanotubos de carbono***

Existen algunas técnicas o métodos para la adecuada preparación de CNT, en este caso se seleccionaron SWNT para la elaboración del sustrato; debido a las propiedades eléctricas que ofrecen este tipo de material, sin embargo, su funcionalización suele ser más complicada a diferencia de los MWNT (Martínez-González et al., 2022). Existen varias maneras para preparar SWNT, que permiten mejorar su dispersión y modificar sus propiedades. Primero se realizó una funcionalización covalente agregando un ácido fuerte, donde se depositaron SWNT (pureza 99.8%, Sigma Aldrich®) en ácido clorhídrico (HCl) diluido al 10% (HCl, Densidad: 1,18  $\text{g/cm}^3$  a 20°C), en un recipiente cerrado para posteriormente realizarle un tratamiento ultrasónico (VEVOR

Limpiador Ultrasónico 2L, 60W) por 30 minutos en periodos de 5 minutos, se dejó reposar un día para agregar hidróxido de sodio (NaOH, Na: 57.48 %; H: 2.52 % y O:40.00%) para poder reducir el ácido y retirar el sobrenadante, este proceso se realizó cinco veces.

El siguiente paso consistió en depositar los CNT en surfactante Tritón X-100 (Hycl Chemicals Reagents at 1.0% vol.) al 25% de la disolución, la mezcla fue agitada mecánicamente en un homogeneizador FSH-2A durante 5 horas a 10,000-20,000 rpm en periodos de 45 minutos a 1 hora para evitar sobre calentamiento del equipo; para lograr una mezcla homogénea de color obscuro figura 3.2.

**Figura 3.2**

*Dispersión de nanotubos de carbono 2025.*

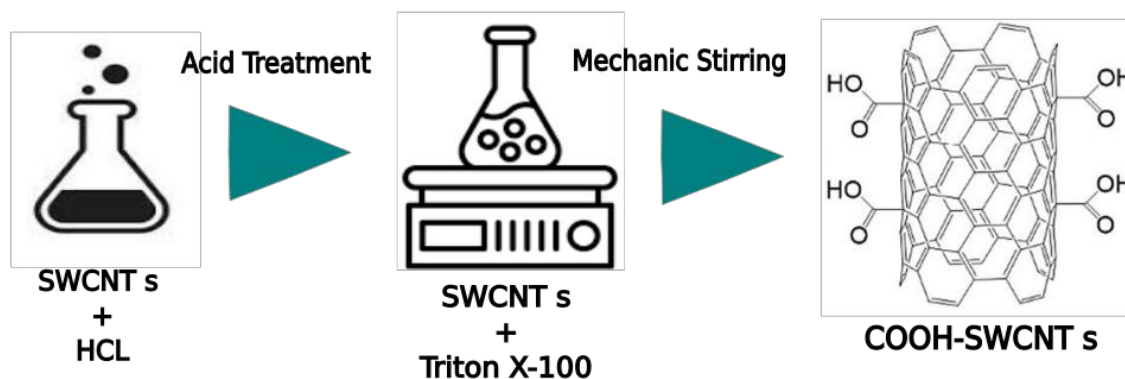


Figura 3.2 Esquemático que muestra el proceso de funcionalización de nanotubos de pared simple SWNT. Elaboración propia (2021).

### ***Síntesis de nanopartículas de plata***

Para la síntesis de AgNPs se utilizaron procedimientos basados en diversas modificaciones de los métodos tradicionales de Lee-Meisel y Creighton en disoluciones coloidales de baja fuerza iónica (Yin et al., 1999). El proceso de formación de nanopartículas se produce con la reducción de una sal precursora en presencia de un agente reductor, y otro agente estabilizador (Jung et al.,

2006), como se observa en la figura 3.3. El uso de agentes estabilizantes permite evitar la agregación y controlar el tamaño y la forma de las nanopartículas.

Se utilizó nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) como sal precursora (karal Analytical Reactants México) disolviéndose al 50% en agua desionizada (CTR-SCIENTIFIC®), se agitaron manualmente en un vaso de precipitados hasta que se diluyera toda la sal de plata. En la preparación de agente reductor y de acuerdo con el método antes mencionado se agregó citrato de sodio ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$  Sigma-Aldrich, USA) diluido al 10% en agua desionizada usando un matraz. Después a la sal de plata se le agregó el agente reductor donde se agitó por varios minutos, la solución se pasó a un agitador magnético para mezclarse por 1 hora a 70 C. Se agregó más agua hasta completar la solución total del composite, por último, se agitó otra hora a la misma temperatura.

**Figura 3.3**

*Síntesis de Nanopartículas de plata 2024.*

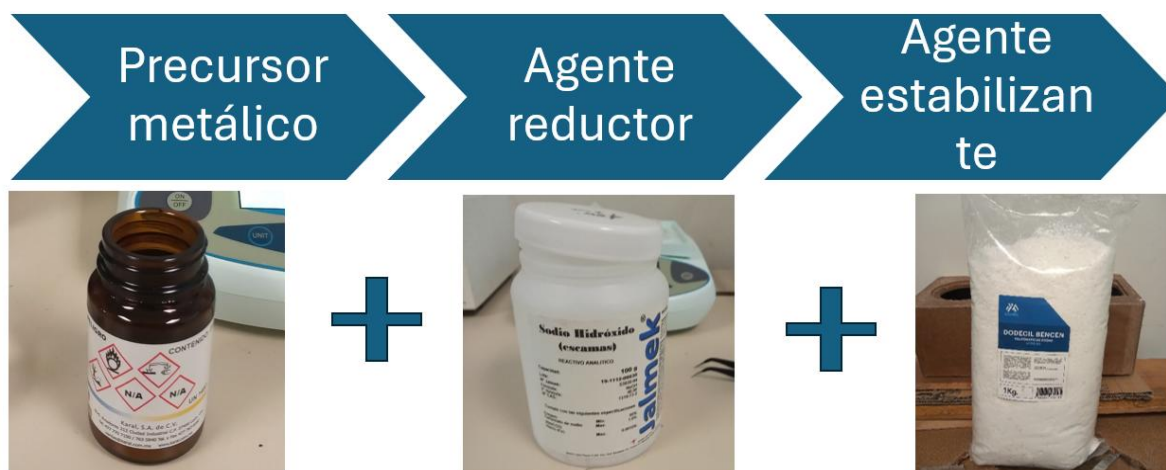


Figura 3.3 Se muestra la creación de nanopartículas de plata AgNPs mediante la modificación de métodos tradicionales. Elaboración propia. (2024).

### Figura 3.4

*Morfología de las nanopartículas de plata 2002*

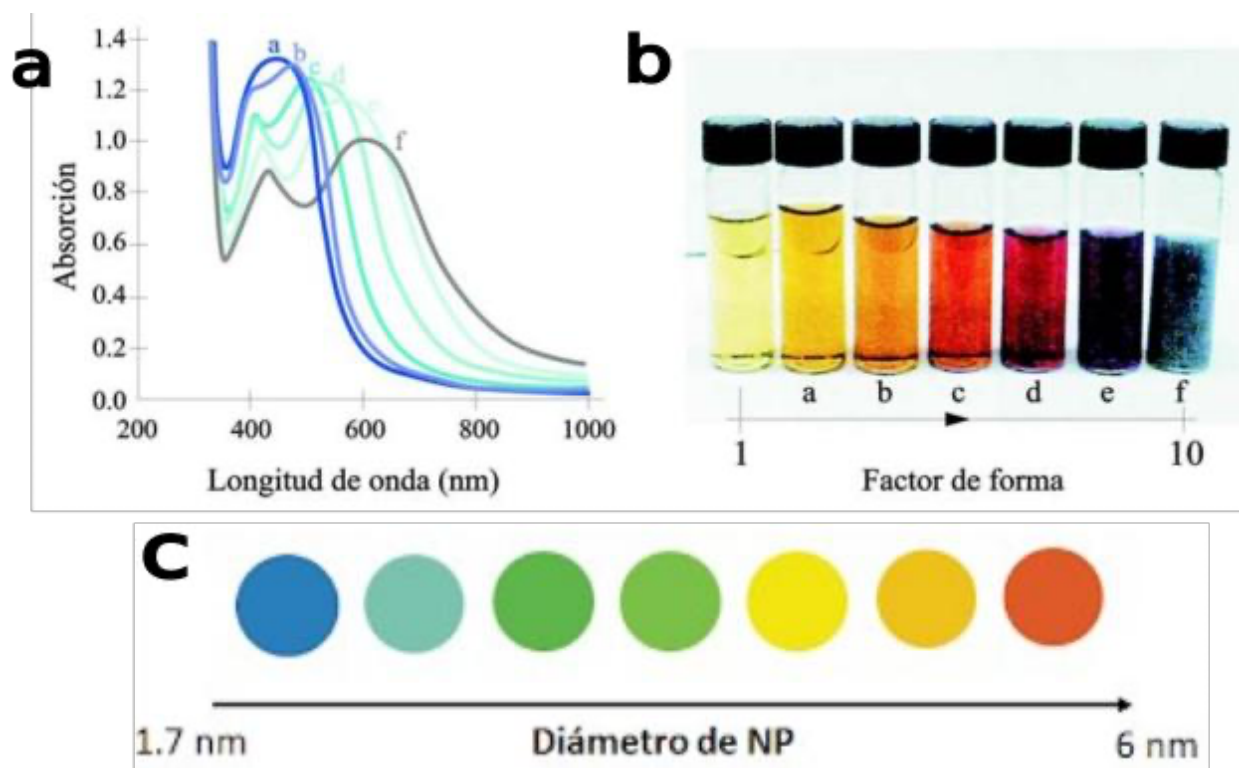


Figura 3.4 Se muestra la coloración de las nanopartículas de plata el cual depende de la adsorción y el factor de forma. Murphy, Jana. (2002).

Pasado el tiempo se dejó reposar para que se asiente la mezcla, se procede a retirar el sobrenadante para realizar la limpieza de las NPs, con el fin que la mezcla obtenga una tonalidad distinta, se realizaron estos últimos pasos hasta obtener una coloración entre rojiza y azul, la cual denota la creación de AgNPs, esta tonalidad ocurre debido a un fenómeno relacionado con las NPs, donde; “la dispersión de la luz donde el tamaño es del orden de la longitud de onda se le conoce como *dispersión de Mie*” (Liebsch, 1993) figura 3.4a, por ejemplo, si un cristal contiene NPs e ingresa un haz de luz verde, se absorbe debido a la dispersión y el vidrio se ve de color rojo, como lo indica el estudio realizado por la coloración indica el tamaño de las nanopartículas, este color dependerá del aspecto de las NPs (Adil et al., 2019), en que las disoluciones acuosas de la plata

son de acuerdo a su forma, para este caso los recipientes de la solución acuosa presentaron la formación de nanocilindros a excepción del recipiente de la izquierda con un con una coloración más tenue, el factor de forma (relación longitud/diámetro) aumenta hacia la derecha, hasta un valor de 10 figura 3.4b (Sudheer et al., 2025). La figura 3.4c indica la relación del tamaño con la coloración de las AgNPs, controlar el tamaño de las NPs evita la generación de partículas haciendo una mezcla más uniforme y que sean capaces de acoplarse a las paredes del nanotubo mucho más fácil.

### Figura 3.5

*Tonalidades obtenidas en la síntesis de nanopartículas 2024.*

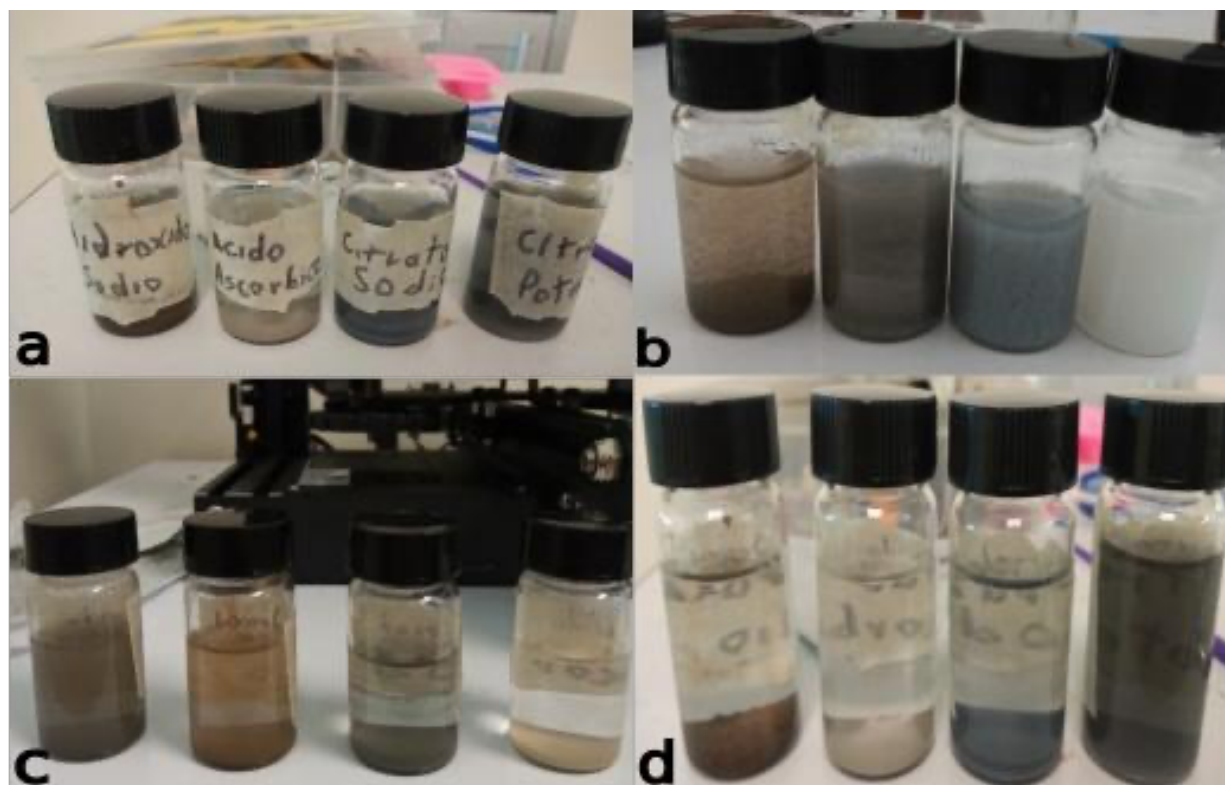


Figura 3.5 Se muestra las coloraciones de las nanopartículas sintetizadas en el laboratorio, se dejaron reposar por varios días y poder observar cambios en las soluciones. Fuente propia. (2024).

Se hicieron pruebas utilizando otro tipo de agentes reductores; ácido ascórbico ( $C_6H_8O_6$ ), NaOH y citrato de potasio ( $C_6H_5K_3O_7$ ) para comprobar la efectividad de estas sustancias y determinar posibles sustitutos en caso de no contar con  $C_6H_5Na_3O_7$ , la figura 3.5a muestra las diferentes coloraciones obtenidas al sintetizar las AgNPs y que tan uniforme se mantuvieron las soluciones, en la figura 3.5b se dejó la solución un día de reposo, la figura 3.5c con una semana y figura 3.5d dos semanas de reposo. Las cuales se dejaron reposar sin ser modificadas, donde las coloraciones al usar  $C_6H_5Na_3O_7$  y  $C_6H_5K_3O_7$  son más de tonalidad azul por lo que indica formación de AgNPs de forma y tamaño adecuados haciendo referencias a las escalas mostradas en la imagen 3.4c, también se realizaron lecturas utilizando un espectrómetro Raman, los resultados de las pruebas realizadas se mostrarán en el capítulo siguiente.

### ***Elaboración de sustrato nanoestructurado***

Como siguiente procedimiento es obtener el decorado de AgNPs en los SWNT mediante el anclaje de las nanopartículas en las paredes del nanotubo, una vez teniendo la síntesis de estos dos materiales por separado, se mezclaron entre sí para obtener el sustrato, se realizaron dos métodos; el primero consistió en la agitación mecánica de las dos sustancias para obtener el sustrato y aplicarlo en una superficie, el segundo método fue aplicar en forma de delgadas películas por medio de capas los dos materiales por separado esperando que se acoplen en la misma superficie en las que fueron depositados, la figura 3.6 muestra un esquema de la composición del sustrato y el método de aplicación en superficies de vidrio y resina de silicio que se explicará en el siguiente apartado.

**Figura 3.6**

*Deposición de materiales en superficies de vidrio y PDMS 2025.*

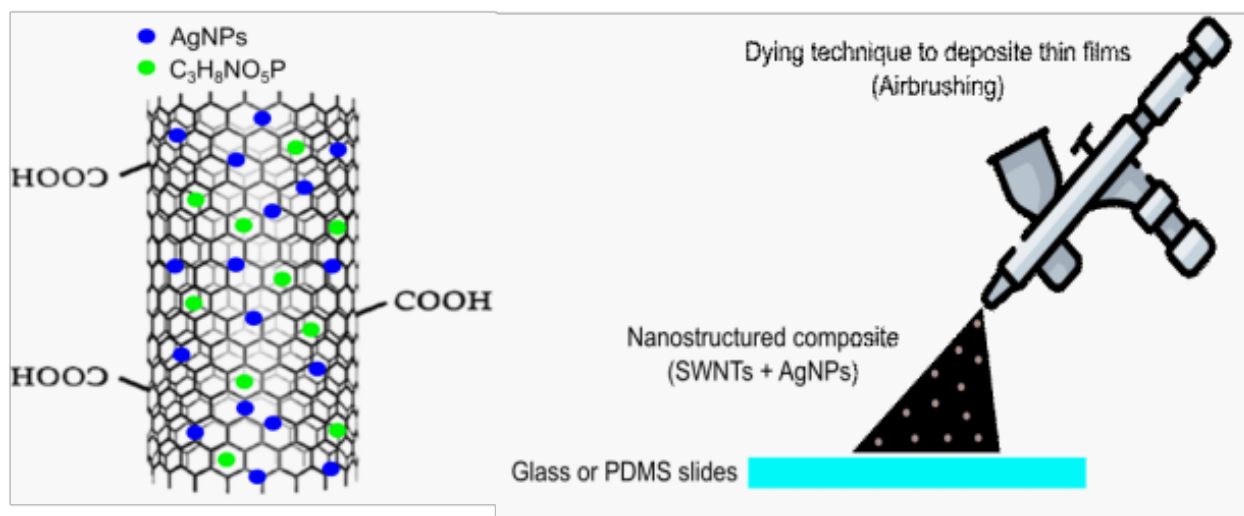


Figura 3.6 Se muestra la deposición de materiales utilizando un aerógrafo. Elaboración propia. (2025).

### ***Deposición de nanomateriales en superficies de vidrio y resina de silicio***

Se depositó el sustrato en superficies de vidrio (Microscope Slides 26 x 76 mm), aplicándolo en capas usando un aerógrafo (AERO-35), además se decidió elaborar superficies con resina de silicio, usando Polidimetilsiloxano (PDMS), ya que se realizaron pruebas aplicando voltaje y observar cambios en la caracterización de materiales (figura 3.7), el PDMS (Sylgard 184 silicone, Dow Chemical, USA) se elaboró usando una base y un catalizador lo cual le dará una consistencia flexible y será más fácil de manipular. Se utilizó un composite como base y un agente catalizador, en proporciones de 5:1, las cuales, se fueron ajustando según el tamaño requerido para las superficies, se mezcló la resina en un recipiente de plástico y se introdujo en una bomba de vacío para retirar las burbujas de aire que se lleguen a formar se dejó reposar por 5 minutos y se depositó en un molde donde se dejó secar por un día para después depositar el sustrato.

**Figura 3.7**

*Proceso de fabricación del sustrato para aplicación de voltaje 2025.*

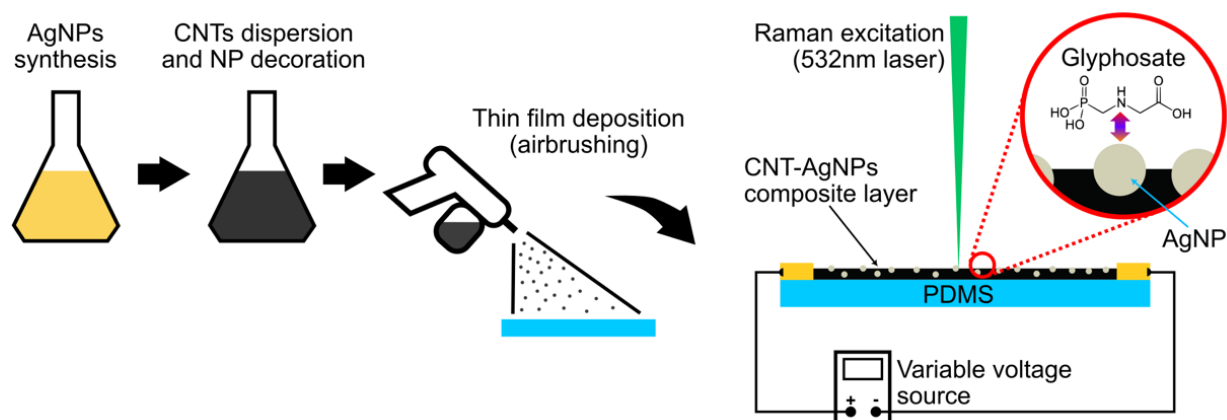


Figura 3.7 Esquema del proceso de fabricación y detección de glifosato mediante SERS ajustable en sustratos. Elaboración propia. (2025).

## Realización de pruebas de campo

Para las pruebas de campo se tomaron muestras de suelo en un cultivo de maíz figura 3.8a, se sustrajo una porción de suelo para la aplicación de GLY figura 3.8b, este tipo de suelo es arcillo areno limoso, la tabla 3.1 describe las características de su composición.

**Tabla 3.1**

*Composición de suelos para cultivos 2025.*

| Compuesto      | Descripción                                                                                                                                              |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Arena</b>   | Está formada por partículas grandes y proporciona buena aireación y drenaje. Sin embargo, tiene poca capacidad de retener nutrientes y agua.             |
| <b>Limo</b>    | Son partículas de tamaño intermedio y permiten una retención moderada de agua y nutrientes, contribuyendo a la fertilidad del suelo.                     |
| <b>arcilla</b> | Contiene partículas más pequeñas, lo que otorga una alta capacidad para retener agua y nutrientes, aunque dificulta el drenaje y puede volverse compacto |

Tabla 3.1 Se muestran las características en la composición de suelo para cultivos indicando cada tipo de proporción. Brady, N.C., & Weil, R.R. (2016).

Tabla 3.2

*Propiedades en la composición de suelos aptos para cultivo 2025.*

| Propiedad    | Descripción                                                                                                   |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Textura      | Suave al tacto, ni demasiado arenoso ni pegajoso como el suelo arcilloso.                                     |
| Drenaje      | Adecuado, evita encharcamientos, pero retiene la suficiente humedad para el crecimiento de las plantas.       |
| Fertilidad   | Rica, ya que contiene materia orgánica y una mezcla equilibrada que facilita el crecimiento vegetal.          |
| Uso agrícola | Ideal para la mayoría de los cultivos debido a su equilibrio entre aireación, retención de agua y nutrientes. |

Tabla 3.2 Descripción de las propiedades del suelo donde se obtuvieron las muestras para realizar mediciones. USDA Soil Survey Staff. (2022).

Figura 3.8

*Pruebas con muestras de suelo 2024.*



Figura 3.8 Se obtuvieron muestras de suelo de un cultivo para la plantación de maíz. Fuente propia (2024).

Un suelo franco ideal debe tener una proporción aproximada de 40 % limo, 40 % arena y 20 % arcilla (Rojas Delgado, 2022), además cuenta con las siguientes principales propiedades tabla 3.2.

**Figura 3.9**

*Glifosato en distintas concentraciones 2024.*



Figura 3.9 Se diluyó glifosato en distintas concentraciones donde se probaron los sustratos nanoestructurados. Fuente propia. (2024).

Como ventajas este tipo de suelo es fácil de manejar, especialmente en condiciones húmedas, ofrece un crecimiento uniforme de las raíces, no es propenso a la erosión, ya que el limo y la arcilla ayudan a estabilizar la arena (Ramírez et al., 2011). Las desventajas serían; puede volverse compacto si se trabaja excesivamente cuando esté húmedo, requiere manejo para mantener un equilibrio en su estructura y evitar su degradación (Torres et al., 2017). Para las pruebas de campo se tomaron muestras de un cultivo se colocaron 10 g de suelo obtenido (figura 3.8) para ser disueltos en agua conteniendo GLY a una concentración del 10% en agua desionizada para la concentración más alta y para las más baja al 0.001%, posteriormente se analizaron las muestras usando un espectrómetro Raman y obtener lecturas que ayuden a detectar la presencia de este contaminante. Se depositó en recipientes de vidrio cada concentración y se mezclaron con el suelo obtenido con el fin que el sustrato absorba el GLY después de agitar la preparación se dejó reposar por varios días para que se asentara y se separe el suelo de la disolución se tomaron muestras de la solución y se depositaron en las superficies nanoestructuradas después se realizaron las lecturas con el Raman aplicando distinto voltaje.

## Capítulo 4 Resultados y discusión

Se realizaron mediciones para la detección de distintas sustancias que incluyen: Azul de metileno (MB), Fosforo y GLY; utilizando un microscopio Raman XploRA Plus (Horiba Scientific, Japan) figura 4.1, con un láser de 532 nm de potencia, las muestras de GLY fueron preparadas en diferentes concentraciones, para evaluar el límite de detección (LoD) y poder comparar con otras técnicas.

**Figura 4.1**

*Espectrómetro Raman XploRA Plus 2025.*



Figura 4.1 Espectrómetro Raman utilizado para la caracterización de sustancias en sustratos nanoestructurados. Fuente propia. (2025).

Las muestras fueron preparadas utilizando disoluciones de GLY comercial (Faena fuerte, N-phosphodimethyl glycine potassium salt, Monsanto, USA), también se aplicaron voltajes a los sustratos nanoestructurados conectando una fuente de poder mediante electrodos (HM305, Hanmatek, China), aplicando voltaje de corriente directa en un rango de 0.0 v a 15.0 v (0, 2, 5, 10, 15) durante la adquisición del espectro Raman de las muestras, se obtuvieron una suma de 5 adquisiciones en un tiempo de 6 segundos cada una utilizando un 50% de potencia del láser, la figura 4.2a se realizan mediciones del sustrato aplicado en una superficie de vidrio en diferentes rangos de voltaje, obsérvese que se tuvieron que añadir electrodos para poder aplicar el potencial de voltaje, en la figura 4.2b no se requirió realizar esto debido a la flexibilidad del material con el que fue fabricado el sustrato añadiendo Alcohol Polivinílico (PVA) a la mezcla.

#### Figura 4.2

*Mediciones en sustratos nanoestructurados 2025*

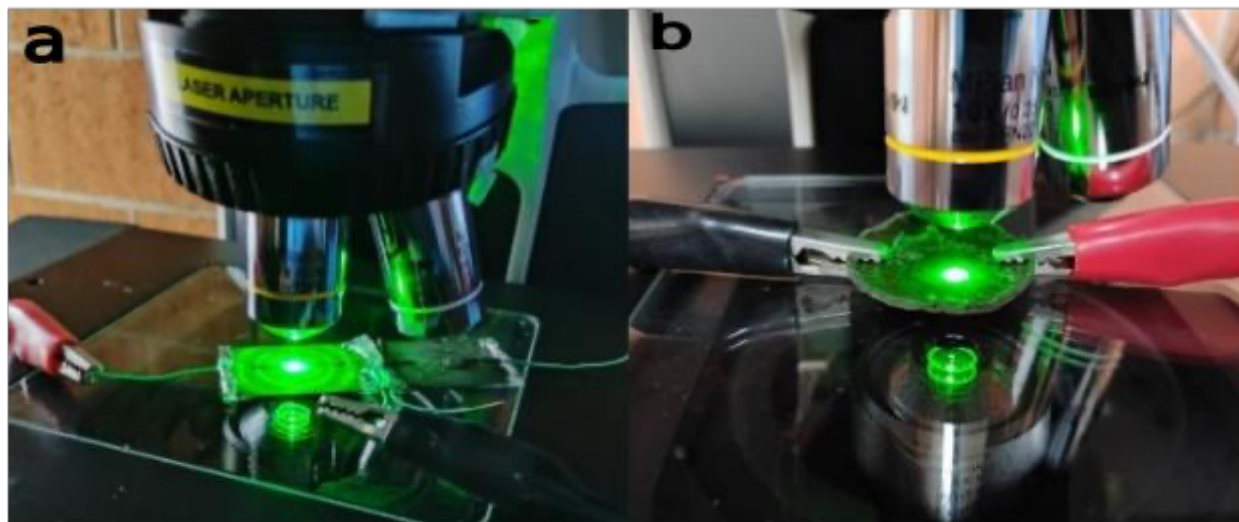


Figura 4.2 Realización de mediciones en sustratos de vidrio y PVA aplicándoles un potencial eléctrico. Fuente propia (2025).

Se obtuvieron imágenes del acoplamiento de las AgNPs en los SWNT, para ello se usó la microscopía electrónica de barrido (SEM) mediante un microscopio FIB dual Beam Helios Nanolab 600 (FEI Company, USA) empleando 8 kV, para la obtención de imágenes de electrones secundarios y retrodispersados para la difracción de rayos X (XRD), se utilizó un difractómetro Smartlab (Rigaku, Japan) usando una fuente CuK $\alpha$  (40kV, 30mA) en las mediciones.

### Figura 4.3

*Imágenes SEM de SWNT y CNT+AgNPs 2024.*

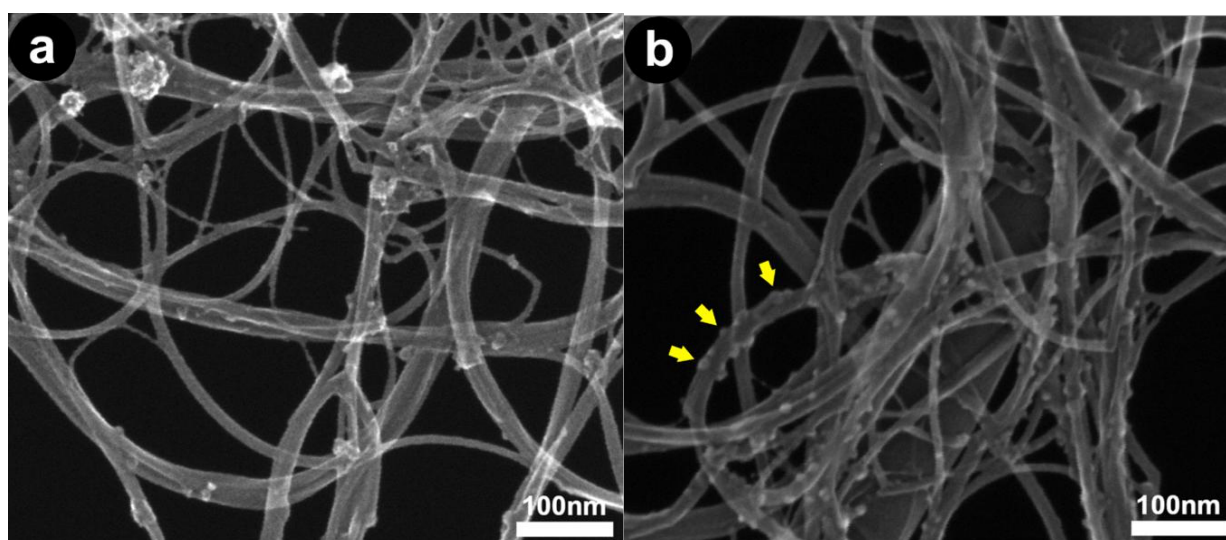


Figura 4.3 Se muestra la comparación entre imágenes por medio de SEM de un sustrato con CNT puros y uno con CNT+AgNPs. Fuente propia. (2024).

La figura 4.3a muestra la imagen en XRD de los SWNT a una escala de 100 nm, el diámetro de estas estructuras es aproximadamente de entre 5 y 30 nm, las protuberancias observadas son residuos del surfactante utilizado para su dispersión; mientras que la imagen 4.3b corresponde al anclaje de AgNPs a las paredes de los CNT, donde se pueden observar pequeñas protuberancias que sobresalen de la superficie de los SWNT, correspondientes a estas NPs, las cuales poseen un tamaño entre 10 a 20 nm de diámetro, la flexibilidad de las nanoestructuras de carbono es evidente, ya que una de sus principales ventajas es que pueden formar redes de conducción muy fácilmente.

**Figura 4.4**

*Difractogramas XRD de SWNTs y CNT+AgNPs 2024.*

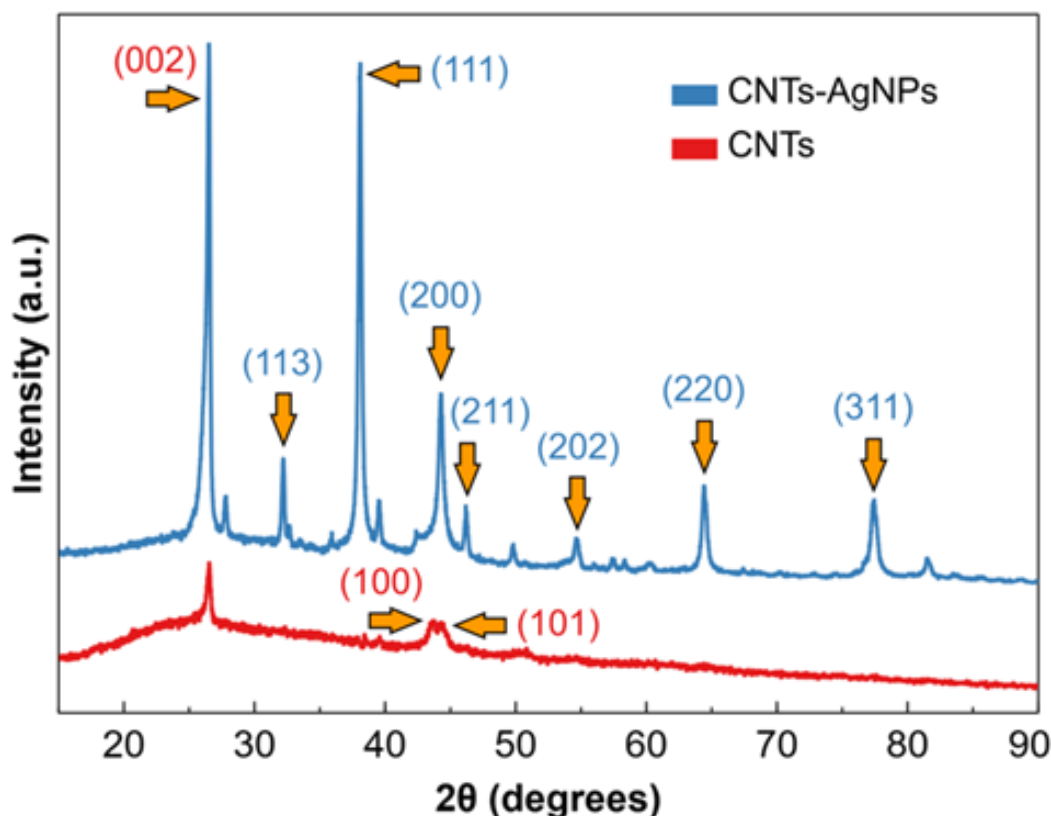


Figura 4.4 Se muestran difractogramas de difracción de rayos X (XRD) para muestras de nanotubos de carbono (CNT) y nanopartículas de plata. Fuente propia. (2024).

La figura 4.4 muestra los resultados obtenidos del difractograma XRD realizados con SWNT y SWNT-AgNPs, lo cual confirma la presencia de Ag en forma cristalina. Se identifican los picos característicos de los CNT en los planos 002, 100 y 101, así como los picos de difracción mostrados correspondientes a los planos cristalográficos emitidos por las AgNPs, y sus correspondientes índices de Miller. Cabe destacar la diferencia entre el difractograma de CNT puros y los CNT-AgNPs, que muestran la presencia de plata cristalina en los planos 111, 200, 220, y 311; en relación con los resultados visuales obtenidos del SEM. Obsérvese que también el XRD revela la presencia de óxidos de plata, mostrando picos más pequeños pero claros que no aparecen en los CNT puros en los planos 113, 211 y 202.

Las características morfológicas de las muestras analizadas pueden compararse con otros estudios, que reportan características similares (Lin et al., 2019) algunas investigaciones que proponen diseños similares basados en CNT reportan formaciones de NPs en las paredes de nanotubos. Sin embargo, implican un paso previo al incorporar grupos funcionales de reactivos como carboxilos a la superficie de las estructuras, con el fin de promover los puntos de nucleación para la formación de NPs metálicas (Dikmen, 2023). Para efectos de este trabajo se demostró que la mezcla por simple agitación mecánica de SWNT y AgNPs previamente sintetizados se es capaz de lograr un decorado adecuado para conseguir sustratos SERS funcionales, evitando realizar procesos sumamente complejos.

**Figura 4.5**

*Espectros Raman de sustratos depositados en vidrio y PDMS 2025.*

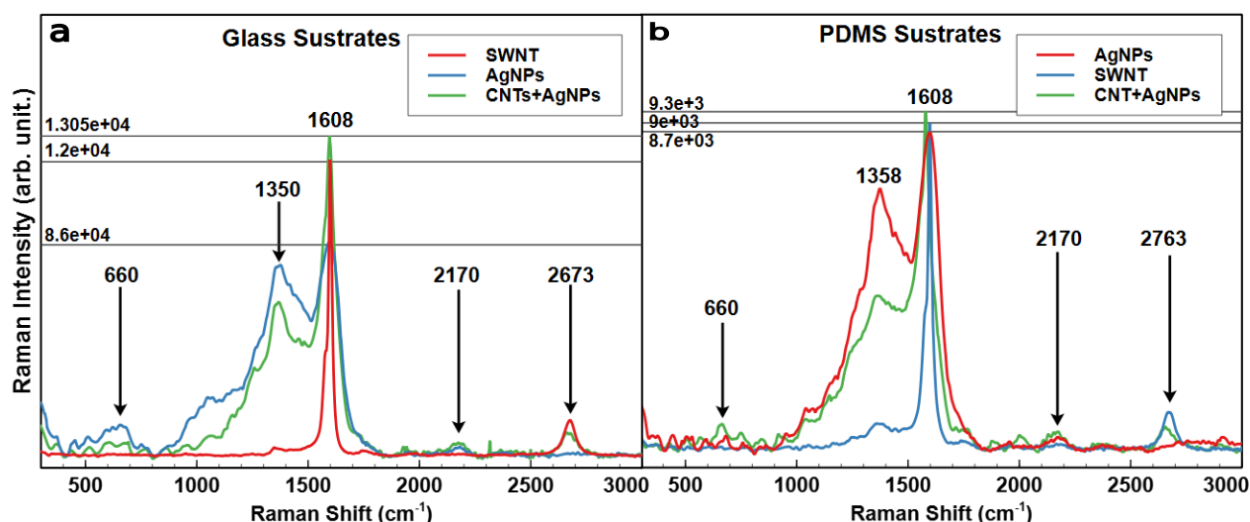


Figura 4.5 Caracterización de espectros Raman utilizando sustratos de Plata, CNT y CNT+AgNPs. Elaboración propia. (2025).

En cuanto a la estabilidad mecánica y funcional, los sustratos mostraron características notables, ya que se resistieron a deformaciones mecánicas durante su manipulación, almacenamiento y conexiones eléctricas para la realización de pruebas, esto se debe a las

características de los CNT, además de fabricar una superficie flexible a base de PDMS donde se depositaron, la cual proporciona buena adherencia y flexibilidad mecánica inerte a la resina de silicio. La primera sustancia caracterizada fue MB utilizando un sustrato SERS de AgNPs, en la figura 4.5a se muestra la caracterización de la molécula del MB depositada en superficies de vidrio y PDMS figura 4.5b mediante SERS, donde se utilizaron AgNPs como sustrato nanoestructurado para ambas pruebas. Esta sustancia es utilizada como indicador de cambios químicos de oxidación-reducción en química analítica (Rodríguez Torres et al., 2014), por lo que se utilizó para comprobar las capacidades de detección del sustrato.

**Figura 4.6**

*Espectros del azul de metileno en distintos sustratos 2024.*

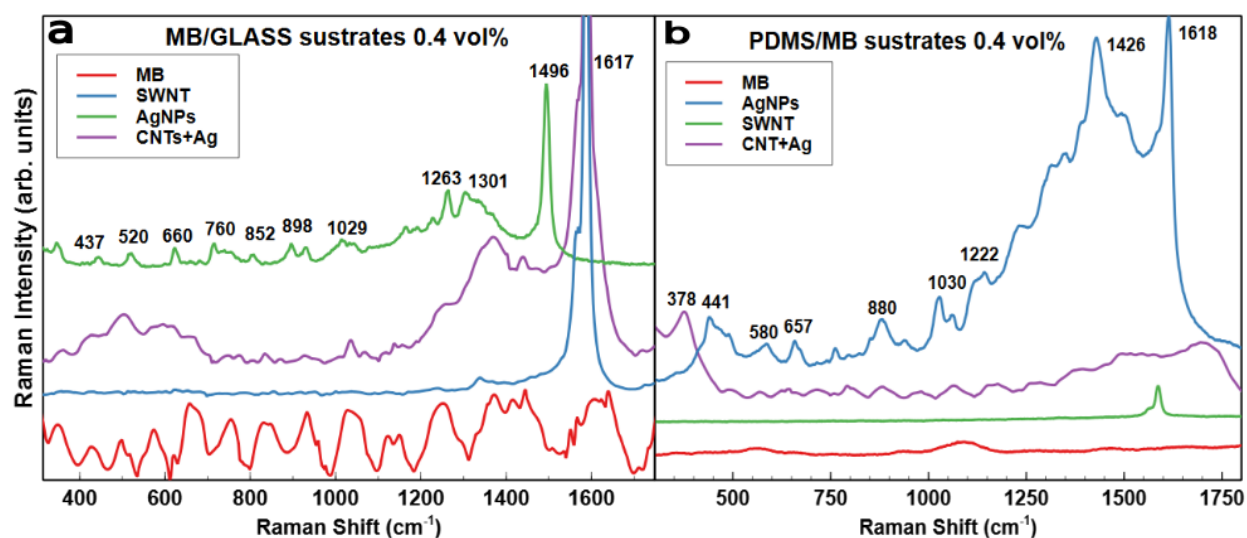


Figura 4.6 Espectros Raman del MB usando distintos sustratos. Elaboración propia (2024).

En ambas superficies el sustrato con AgNP's fue es que pudo obtener mas picos característicos del MB seguido del sustrato con CNT+Ag, las muestras fueron realizadas en concentraciones al 0.4% de la disolución.

**Figura 4.7**

*Caracterización de la molécula de glifosato 2024.*

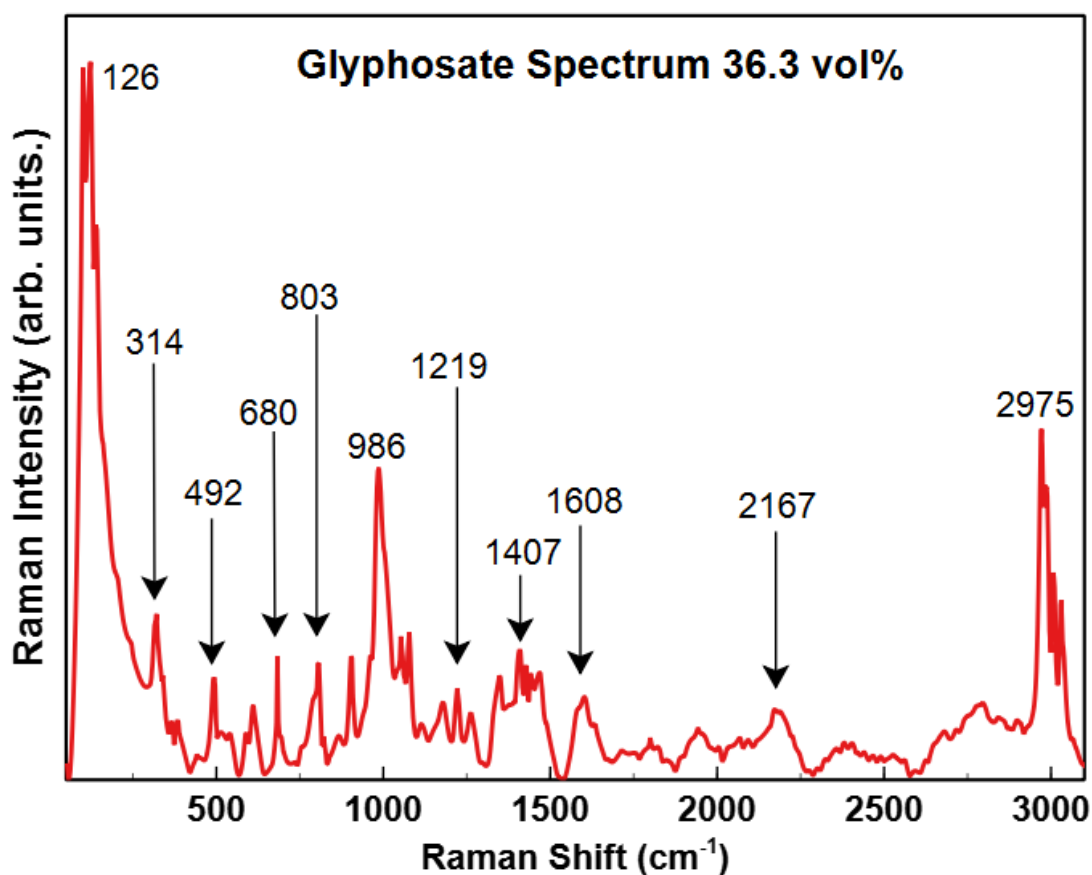


Figura 4.7 Se muestra la caracterización de glifosato obteniendo sus picos más característicos. Elaboración propia (2024).

Se caracterizó el espectro Raman de la molécula correspondiente al GLY figura 4.7, donde los picos más característicos están resaltados con flechas, usando muestras sin diluir para posteriormente probarlo en sustratos que se fabricaron realizando mediciones a bajas concentraciones, donde se analizará el comportamiento de estos picos característicos en diferentes sustratos.

**Figura 4.8**

*Caracterización de glifosato utilizando nanopartículas de plata 2024.*

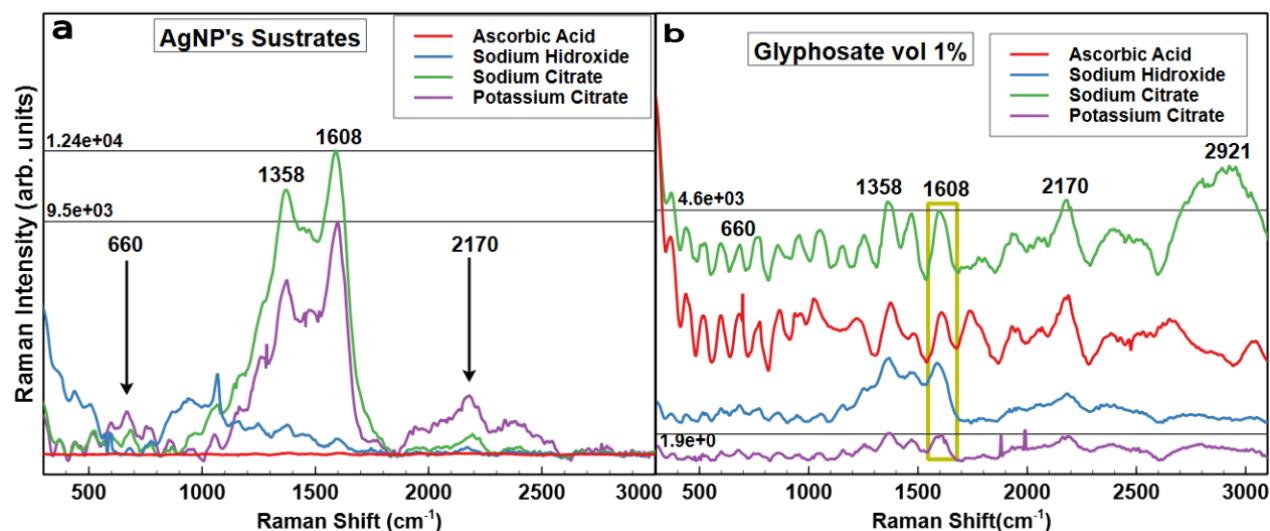


Figura 4.8 Se muestran dos graficas de los espectros caracterizados de plata con diferentes agentes reductores para comprobar cual detecta el glifosato de mejor manera. Elaboración propia (2024).

Se hizo la prueba usando un sustrato SERS con plata para comprobar su efectividad al detectar GLY, donde se usó agentes reductores distintos para comprobar el más adecuado para la creación de NPs y obtener mejores resultados, la elaboración de las AgNPs se mencionó en el capítulo anterior.

Al entrar en contacto con el GLY ocurre una disminución en la intensidad de los picos significativos del sustrato teniendo que el sustrato de  $\text{Ag}+\text{C}_6\text{H}_5\text{K}_3\text{O}_7$  baja la intensidad de sus picos figura 4.8a. Por el contrario, el sustrato con  $\text{Ag}+\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$  presenta el efecto opuesto aumentando su intensidad figura 4.8b, sin embargo, el sustrato con  $\text{Ag}+\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$  sigue manteniendo su intensidad mayor a lo de los demás sustratos dejándolo como el más adecuado para la síntesis de las AgNPs. En el recuadro amarillo se observa el cambio en la intensidad del pico más significativo al momento de añadir GLY.

**Figura 4.9**

*Caracterización de glifosato empleando distintos sustratos 2024.*

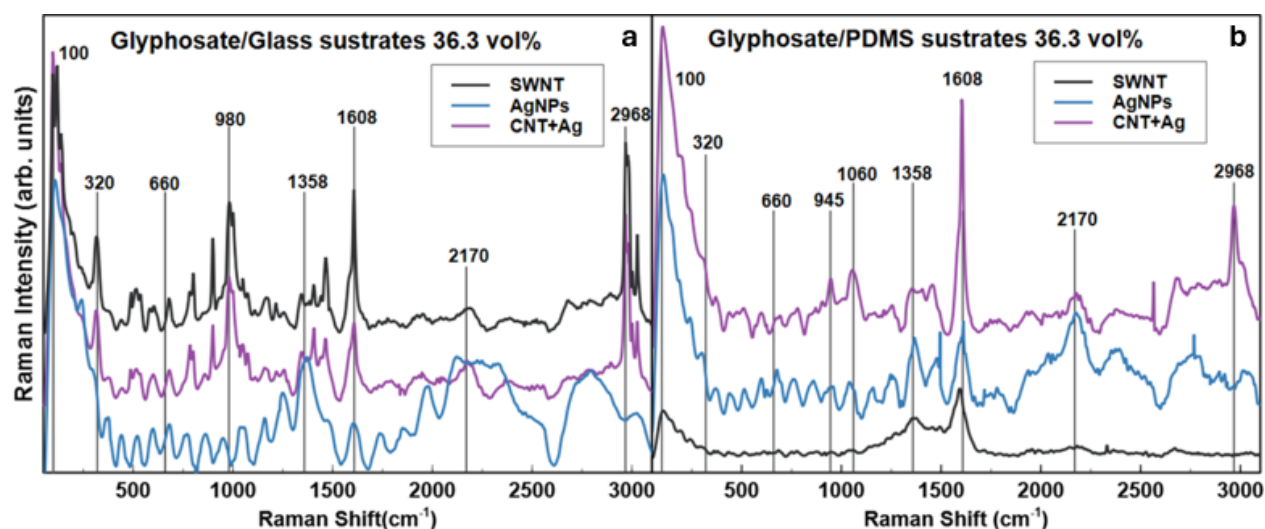


Figura 4.9 Se muestran sustratos SERS con SWNT, AgNPs y CNT+Ag, para caracterizar glifosato puro sin diluir. Elaboración propia. (2024).

Se utilizaron sustratos SERS con SWNT, AgNPs y CNT+Ag, para caracterizar GLY puro sin diluir, depositados en vidrio y PDMS, en la superficie de vidrio figura 4.9a los SWNT caracterizaron de mejor manera al GLY a diferencia de las otras dos teniendo un espectro más definido en cuanto a la intensidad de los picos, en la figura 4.9b el sustrato que obtuvo un mejor espectro fue el de AgNPs, teniendo que los SWNT se acoplan mejor a las superficies de vidrio y la Ag a las de resina de silicio para efectos de esta prueba.

Cabe destacar el tiempo en que se deposita la muestra de GLY y que tan fresca se encuentre, ya que eso influye al momento de la caracterización, aunque los nanotubos presentaron mejor nivel de detección depositados en vidrio, al ser muestras diluidas en agua, perdían su capacidad de detección, sin embargo, la plata mantenía la muestra por más tiempo ya que son soluciones líquidas. A pesar de que el nanotubo presenta mejores picos al probarlo en distintas concentraciones la muestra se evapora más rápido que con los otros sustratos como la plata esto se demostrará más adelante al realizar pruebas a diferentes concentraciones. Para el caso de los sustratos con plata al

aplicar el láser al 100% de su intensidad, el haz de luz daña la superficie del sustrato por lo que es conveniente acoplarlo con los nanotubos y aprovechar sus propiedades de resistencia mecánicas figura 4.10.

### Figura 4.10

*Sustrato de nanopartículas de plata dañada 2024.*

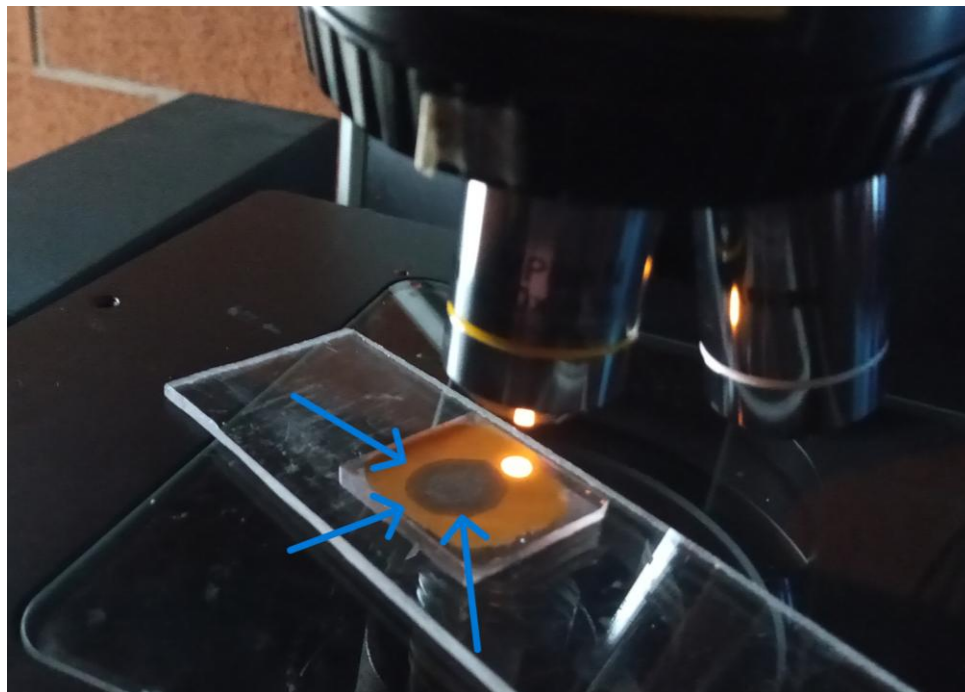


Figura 4.10 Se muestra daños causados debido a altas intensidades en el láser. Fuente propia (2024).

La figura 4.11 muestra el espectro Raman del GLY caracterizado en tres diferentes concentraciones: Sin diluir (UD), 10% y 0.001% de concentración de volumen a partir de la muestra correspondientes a las utilizadas descritas en el capítulo anterior (Mikac et al., 2022). Los picos raman mas significativos durante las mediciones están indicados mediante flechas, con el fin de evaluar su evolución en función de los voltajes aplicados. Algunos de estos picos son consistentes de acuerdo con espectros Raman reportados previo a este trabajo. donde el pico obtenido en  $1100\text{ cm}^{-1}$  es usualmente atribuido a los modos de corrimiento relacionados con la presencia de fosfatos  $\text{PO}_3$ ,  $\text{POH}$  y  $\text{C-N}$ , otros picos significativos registrados están en el rango de

575 y 660  $\text{cm}^{-1}$  que la igual que el anterior parecen estar relacionados con los mismos grupos. Los pocos obtenidos en los valores de 1350 y 1608  $\text{cm}^{-1}$  son propios del sustrato nanoestructurado que están relacionados con los CNT.

**Figura 4.11**

*Glifosato caracterizado en diferentes concentraciones 2024.*

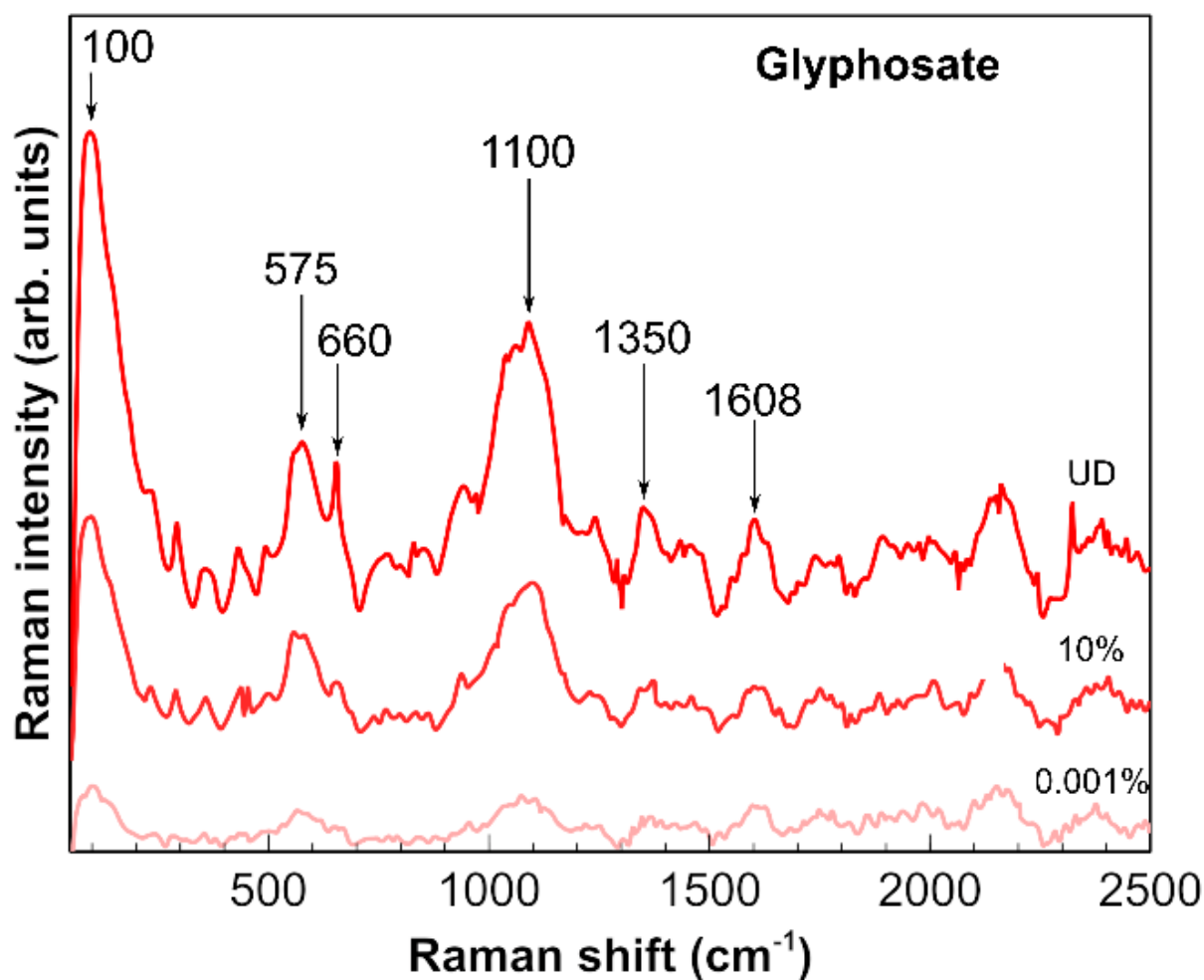


Figura 4.11 Glifosato caracterizado en tres diferentes concentraciones: sin diluir (UD), 10% y 0.001% de concentración. Fuente propia. (2024).

Figura 4.12

*Sustratos de plata caracterizando glifosato en distintas concentraciones 2024.*

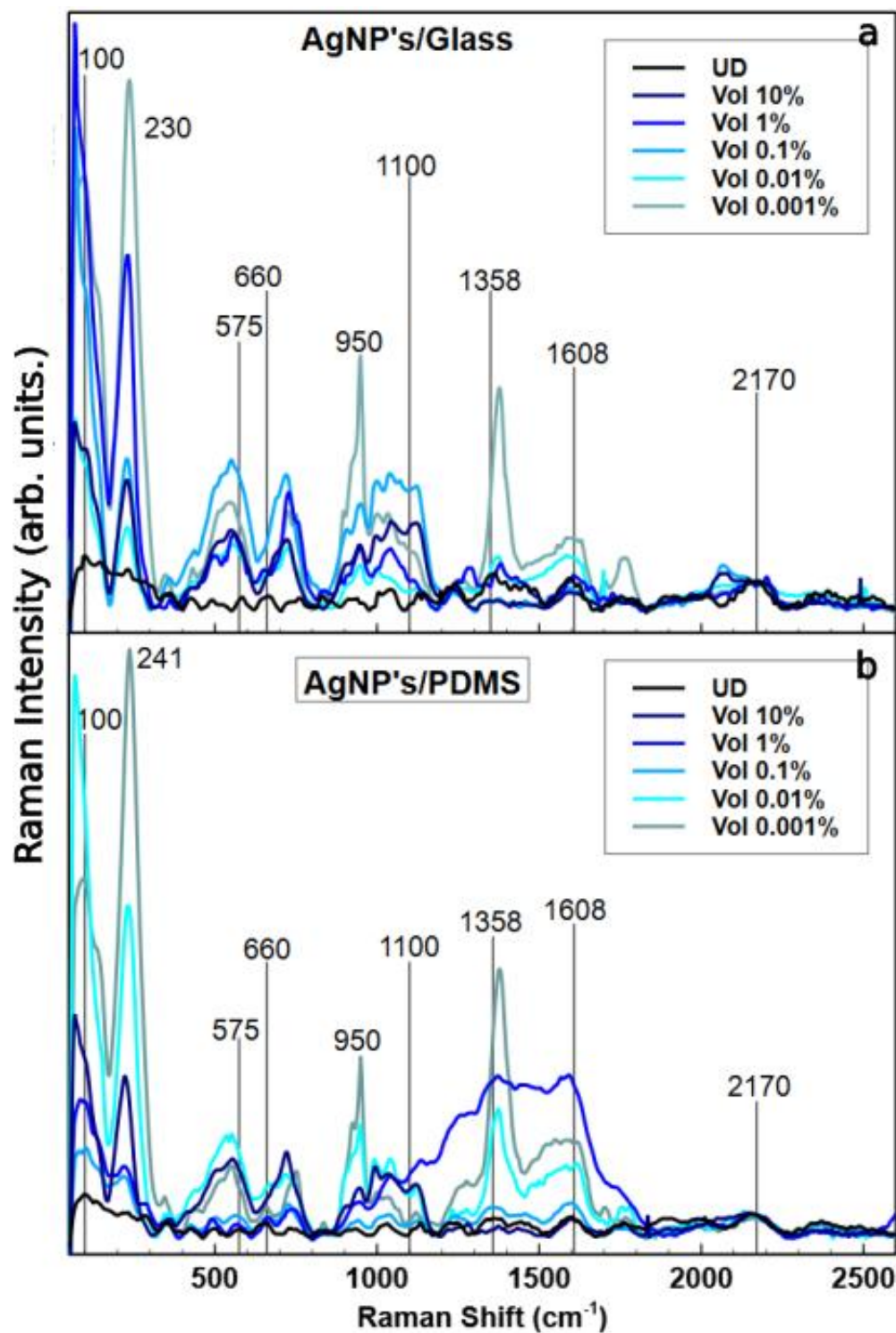


Figura 4.12 Se muestra la caracterización de glifosato en sustratos de plata a distintas concentraciones. Elaboración propia. (2024).

Para los sustratos de plata se lograron percibir algunos de los picos característicos del glifosato, la consistencia en las intensidades se presenta fue algo dispareja, teniendo saltos irregulares en las intensidades en los espectros, a pesar de esto, se obtuvo en el rango de los  $240\text{ cm}^{-1}$  un pico característico el cual merecería un análisis más profundo en siguientes investigaciones el cual, va aumentando según disminuye la concentración de la muestra, ver figura 4.12a. La gráfica correspondiente a la concentración de 1% vol., presenta una cierta disparidad figura 4.12b, ya que fue cuando el sustrato presentó daños debido a la alta intensidad del láser.

Los espectros Raman de muestras de GLY en distintas concentraciones no muestran ningún efecto cuando se analizan en un sustrato hecho de nanotubos puro al ir disminuyendo la concentración de la muestra cómo se observa en la figura 4.13 para ambas superficies de vidrio figura 4.13a y en PDMS figura 4.13b obteniendo únicamente algunos resultados en la muestra sin diluir, pero se cree que puede ser una saturación del sensor del espectrómetro debido a la alta concentración de la sustancia. Sin embargo, no se produjeron cambios significativos en los picos clave referentes al GLY, solamente visualizándose su pico característico localizado en  $1600\text{ cm}^{-1}$  llamándose pico G asociado a los materiales de carbono. Por el contrario, en los otros dos sustratos se hizo más evidente el efecto SERS, siendo más visibles en el sustrato con AgNPs de la figura 4.11a depositada en vidrio. Los sustratos fabricados con CNT+AgNPs a pesar de que fueron mejores que los nanotubos solos no igualaron a los hechos con AgNPs ya que hubo mayor intensidad en los picos significativos por parte de ellos figura 4.14.

Aunque el sustrato con plata mostró mejores capacidades para la caracterización del glifosato, hay que tener en cuenta que hubo daños durante el desarrollo de las pruebas, por lo que es conveniente complementarlo añadiendo SWNT debido a sus propiedades mecánicas que ofrecen mejor resistencia.

Figura 4.13

*Nanotubos caracterizando glifosato en distintas concentraciones 2024.*

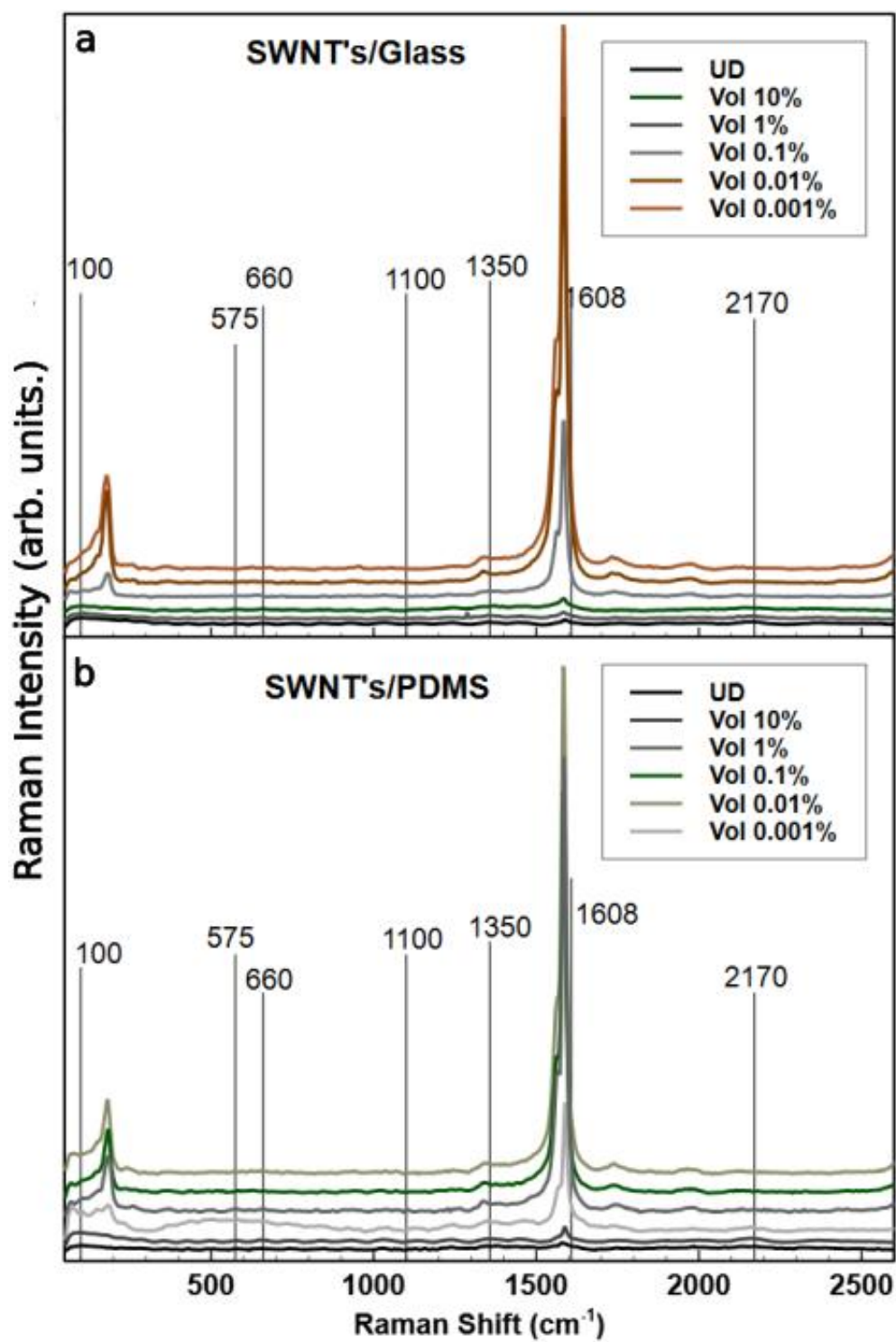


Figura 4.13 Se muestra la caracterización de glifosato en sustratos con nanotubos a distintas concentraciones. Elaboración propia. (2024).

Figura 4.14

*Sustratos con CNT+AgNPs caracterizando glifosato en distintas concentraciones 2024.*

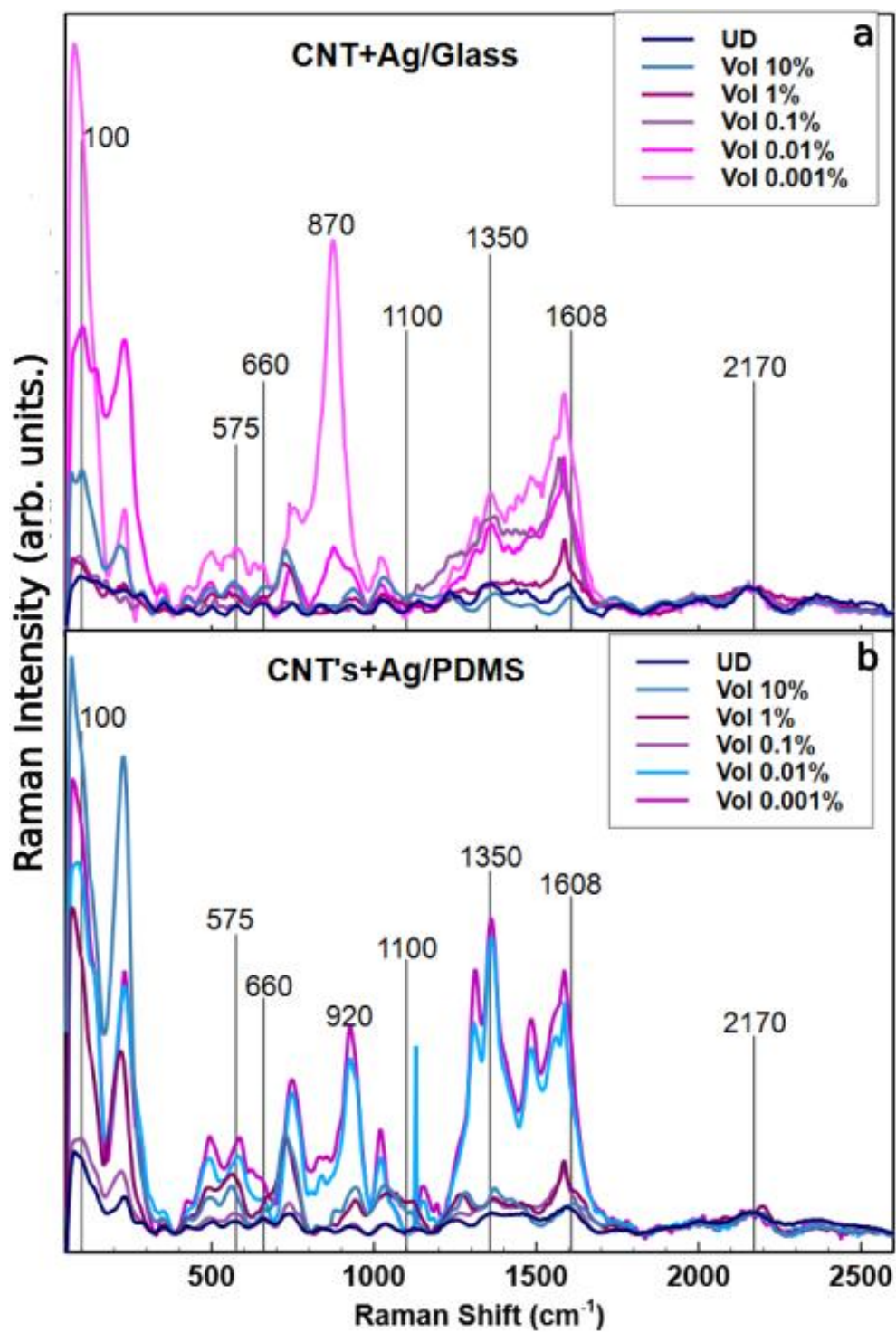


Figura 4.14 Se muestra la caracterización de glifosato en sustratos de CNT+AgNPs a distintas concentraciones. Elaboración propia. (2024).

Figura 4.15

*Sustrato nanoestructurado caracterizando glifosato diluido y concentrado 2025.*

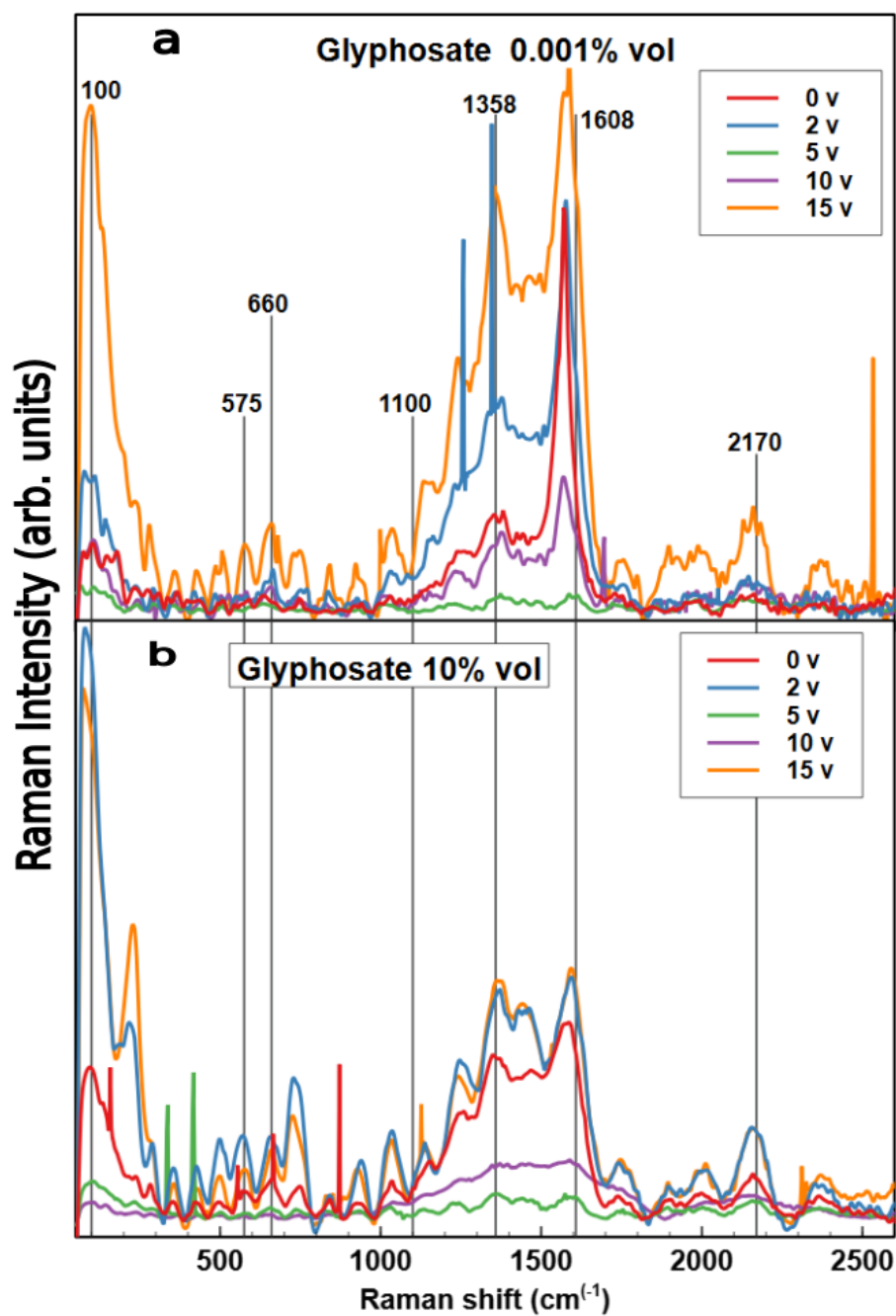


Figura 4.15 Lecturas correspondientes a bajas y altas concentraciones de glifosato aplicando voltaje para la obtención de los enhancement factors. Elaboración propia. (2025).

La figura 4.15a se caracterizó glifosato a una concentración del 0.001% ya que se trata de que el sustrato iguale el LoD de técnicas existentes refiriéndose a el uso de cromatografías líquidas y de gases empleadas para la detección de sustancias (Martín & Miranda, 2018). Siendo la concentración más diluida utilizada para este proyecto, en el caso de la concentración más alta se utilizó al 10% ya que es la medida más común para la aplicación de esta sustancia, aunque las concentraciones pueden variar según las necesidades del productor y especificaciones del producto (Hernández Sierra et al., 2021), (Espinosa-Ramírez & Cisneros-López, 2022).

La figura 4.16 representa el espectro Raman (SERS) del GLY sobre el sustrato nanoestructurado aplicando diferentes potenciales de voltaje. En la figura 4.16a se caracterización espectros Raman del glifosato en baja concentración aproximadamente el 0.001%, y la figura 4.16b corresponde a una concentración alta del 10% del volumen total de la disolución. Ambas figuras muestran gráficas con diferentes potenciales en un rango de 0-15 V. Es importante señalar que los picos obtenidos se normalizaron respecto a la señal constante de los CNT de los que se encuentra hecho el sustrato, ubicándolos a  $2660\text{ cm}^{-1}$ .

La figura 4.17 muestra los *enhancement factors* (Ef) que calculan como la intensidad entre del espectro Raman al aplicárle un potencial de voltaje y otro sin dicha tensión. Estos factores se obtienen como la relación entre la intensidad Raman con tensión aplicada y la intensidad Raman sin tensión. Estos factores se muestran para los picos obtenidos del GLY de la figura 4.11.

En la figura 4.17a se obtienen los factores de las muestras con concentración baja (0.001% vol), revelando un aumento en la intensidad consistente proporcional con el voltaje aplicado al sustrato nanoestructurado. La figura 4.17b por el contrario esta consistencia no es tan evidente ya que al aumentar el potencial aplicado el efecto en la intensidad en los picos tiene el efecto contrario,

incluso presentándose discontinuidad en algunos picos, estas muestras fueron realizados con una concentración alta (10% vol).

Si analizamos los resultados observados en relación con algunos estudios realizados, que tienen que ver con el efecto del campo eléctrico en la interacción de moléculas absorbidas en las superficies de algunos materiales compuestos de carbono (Ortiz-Medina et al., 2015) se puede argumentar la presencia de un campo eléctrico en el sustrato, ya que ya que produce cambios en la distribución de carga en las AgNPs facilitados por las trayectorias conductivas de los CNT.

Las energías de interacción en el analito y el sustrato se ven moduladas por la aplicación de un campo externo, que se induce fácilmente en “puntos calientes” producidos por dopaje o sitios dañados dentro del nanomaterial. Además, las NPs metálicas, como las AgNPs, también son sensibles a la polarización espacial de la carga, debido a la presencia de campos eléctricos externos, lo que influye en la intensidad SERS (Zhu et al., 2019). La escala de los  $E_f$  obtenida para el glifosato de alta concentración podría considerarse despreciable en comparación con las de baja concentración, sin embargo, la explicación precisa de este fenómeno requiere un estudio más profundo.

**Figura 4.16**

*Espectro Raman del glifosato caracterizado aplicando voltaje 2025.*

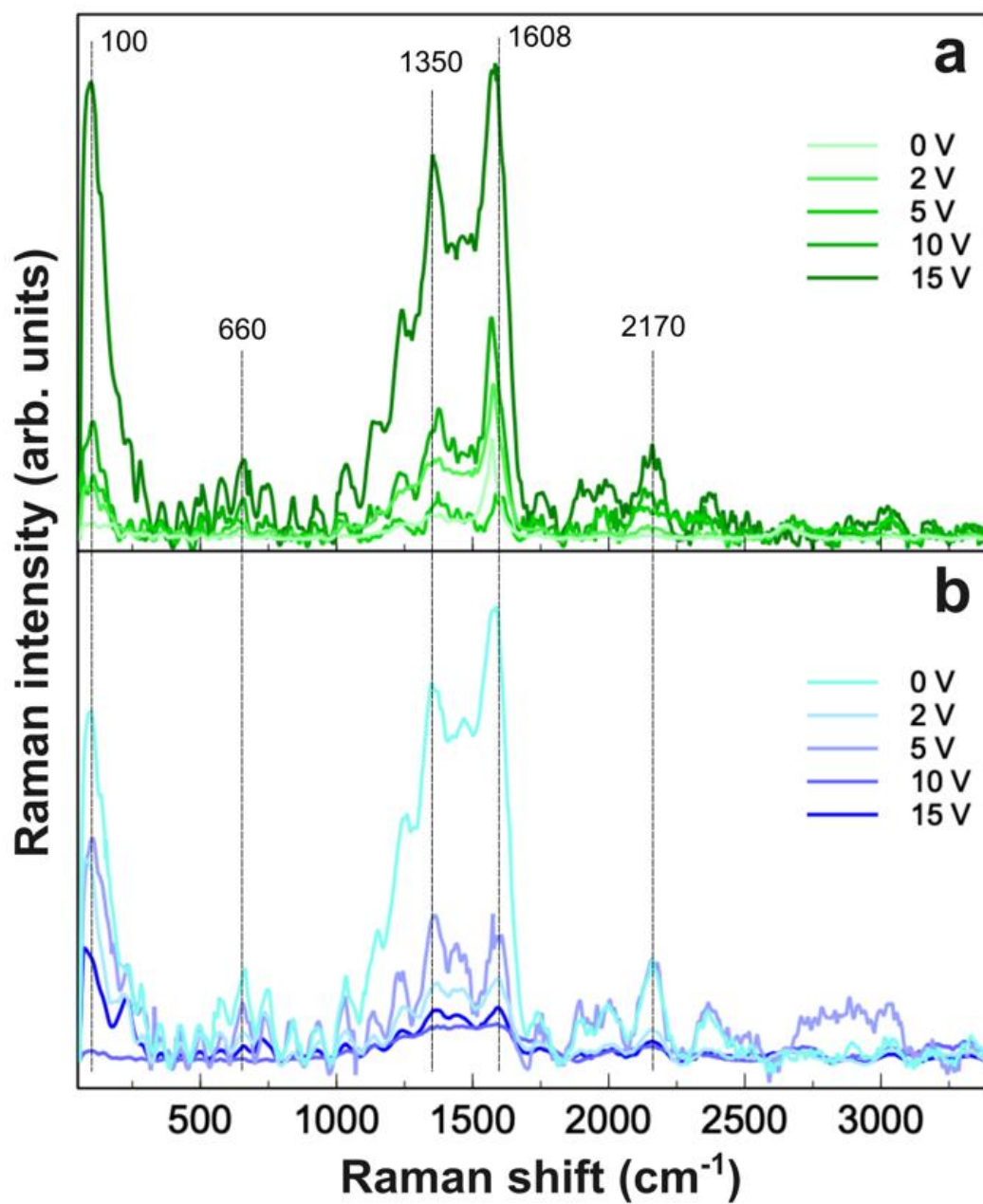


Figura 4.17 Lecturas correspondientes a bajas y altas concentraciones de glifosato aplicando diferentes rangos de voltaje. Elaboración propia. (2025).

**Figura 4.17**

*Enhancement factors de mediciones SERS 2025.*

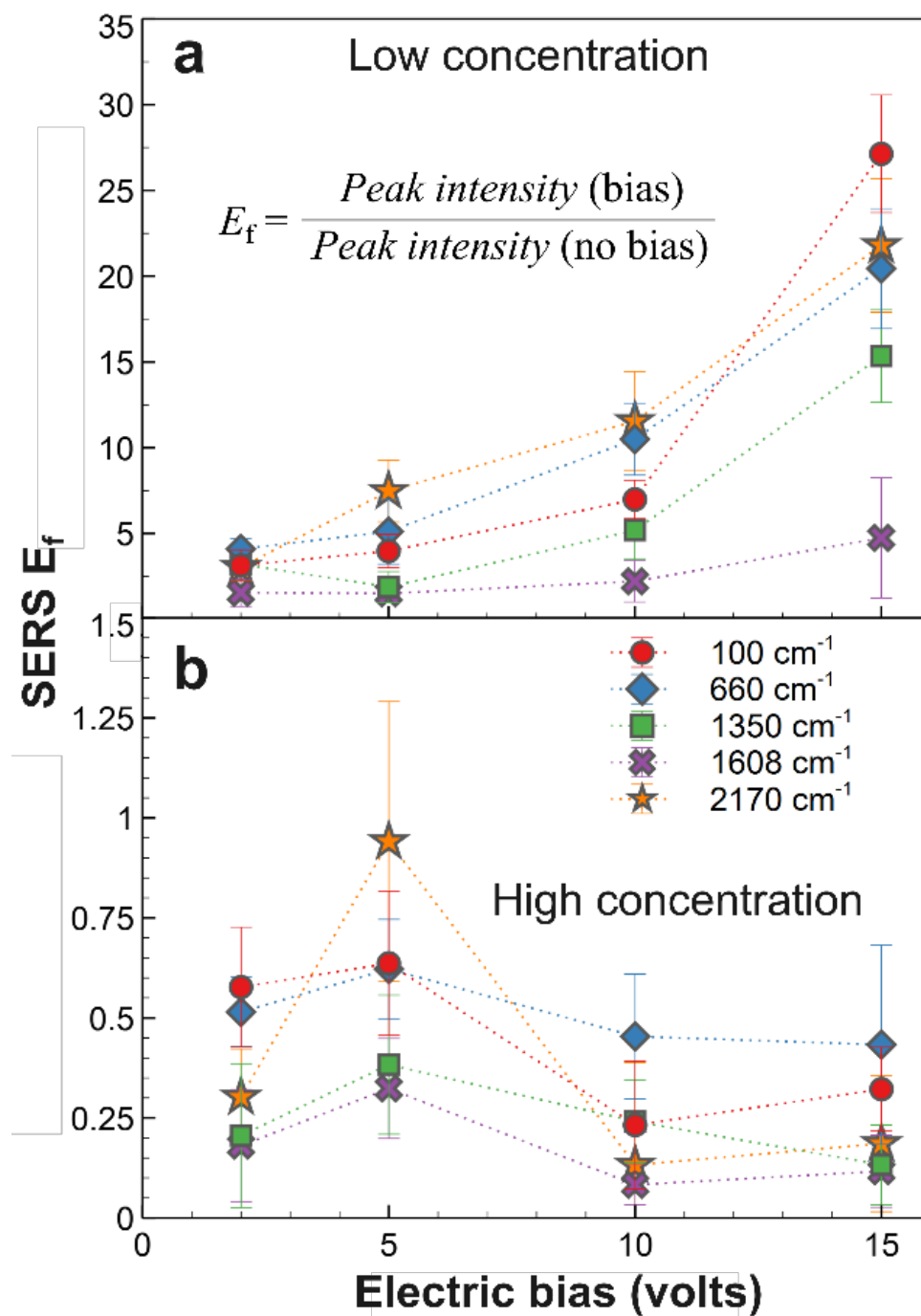


Figura 4.17 Lecturas correspondientes a bajas y altas concentraciones de glifosato aplicando voltaje para la obtención de los enhancement factors. Elaboración propia. (2025).

Figura 4.18

*Caracterización de glifosato en muestras de suelo 2024.*

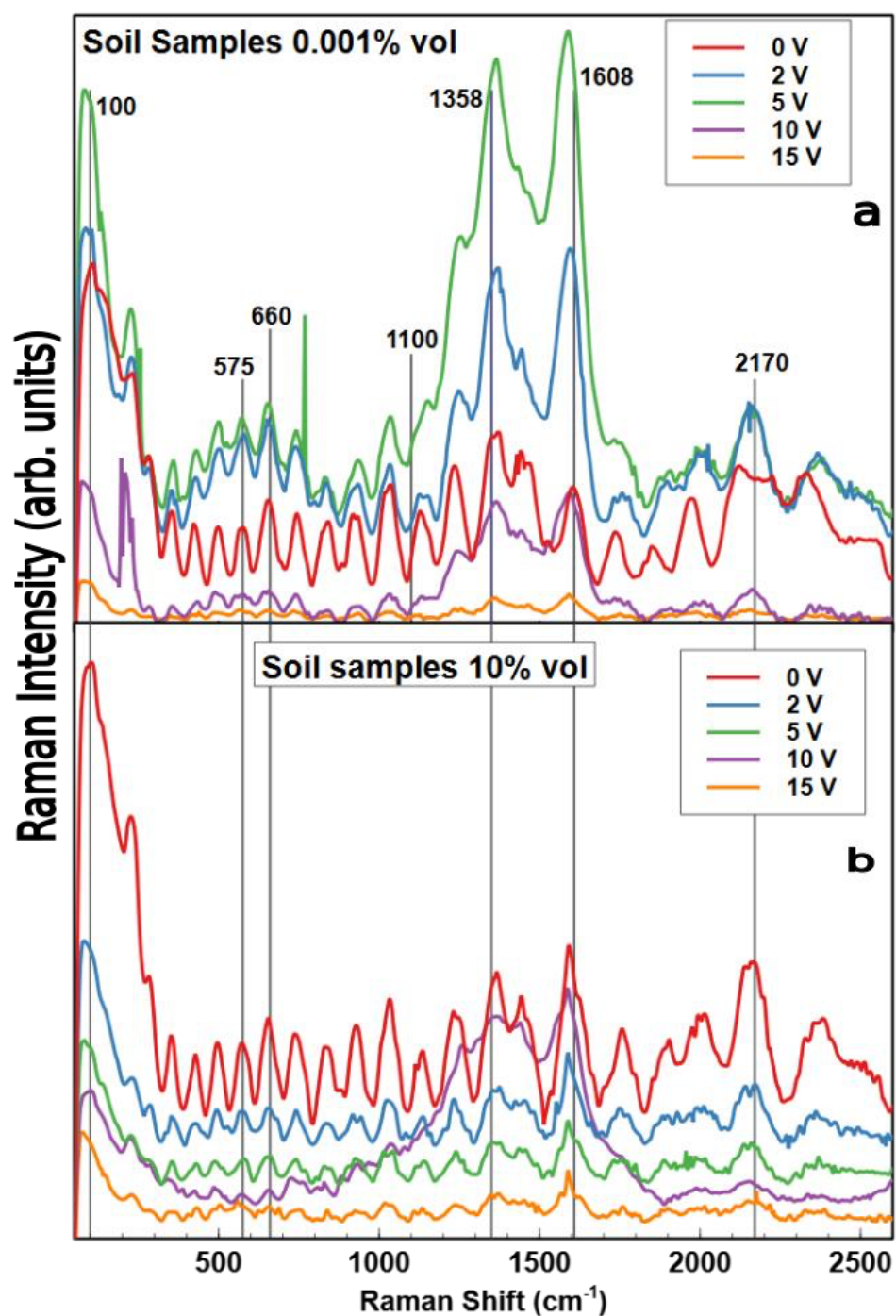


Figura 4.18 Caracterización de glifosato aplicado en muestras de suelo en diferentes concentraciones y aplicando distintos voltajes. Elaboración propia (2024).

Como se observa en la figura 4.18a que corresponde a la concentración baja de la caracterización del GLY, ocurre un aumento en las intensidades de los espectros del sustrato al incrementar el voltaje y, por el contrario, en la figura 4.18b referente a la alta concentración ocurre lo contrario, similar a lo mostrado en la figura 4.16 que presenta un fenómeno similar. Nótese que en ambas gráficas siendo más evidente en la concentración al 0.001% vol., figura 4.18a hay una discontinuidad en la intensidad de los espectros ya que el rango más alto es alcanzado cuando se le aplica un voltaje de 5 V, siendo los restantes de menor intensidad. En la figura 4.18b en el espectro del rango de los 10 V el sustrato sufre daños debido a la gran corriente que estaba circulando por el sustrato, debido a la alta resistencia presentada por el mismo ya que se agregó PVA a la mezcla para obtener una solución más uniforme y esto hace que aumente su resistividad según algunas pruebas realizadas anteriormente.

Con el fin de explorar la aplicabilidad del sustrato se realizaron pruebas para la caracterización en otras moléculas utilizando MB (0.1 vol %), de igual manera aplicando diferentes potenciales eléctricos los resultados se muestran en la figura 4.19a utilizando voltajes de 0, 5, 10, 15 V. Se observan picos característicos de la molécula del MB en el rango de 1395 y 1620  $\text{cm}^{-1}$ , además de tener dos picos adicionales en 2005 y 2160  $\text{cm}^{-1}$  (Dinh et al., 2016). Se cree que estas dos señales surgieron de la interacción de las moléculas del MB y los sustratos específicamente por interacciones electrostáticas, que sería sensible a la presencia de un campo eléctrico externo. El gráfico de Ef de la figura indica esta observación; ambos picos 2005 y 2160  $\text{cm}^{-1}$  muestran un cambio más significativo con el voltaje externo aplicado figura 4.19b. Cabe destacar que este fenómeno es similar al del glifosato del pico 2170.

**Figura 4.19**

*Lecturas SERS en muestras caracterizadas de azul de metileno 2025.*

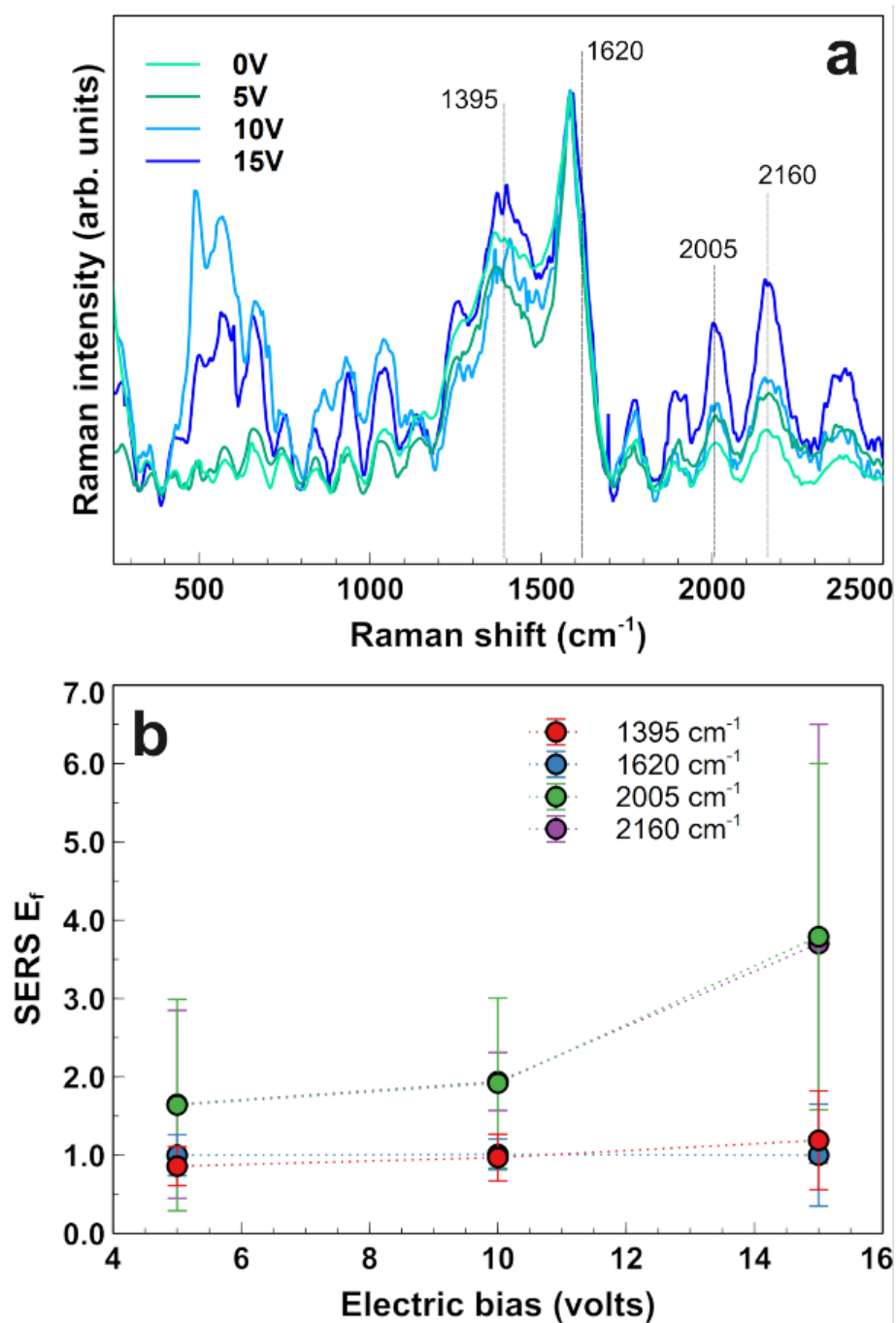


Figura 4.19 Espectro Raman de la molécula de MB caracterizado en una concentración de 0.1% aplicándose diferentes voltajes. Elaboración propia (2025).

**Figura 4.20**

*Caracterización de la molécula del oxido de fósforo 2025.*

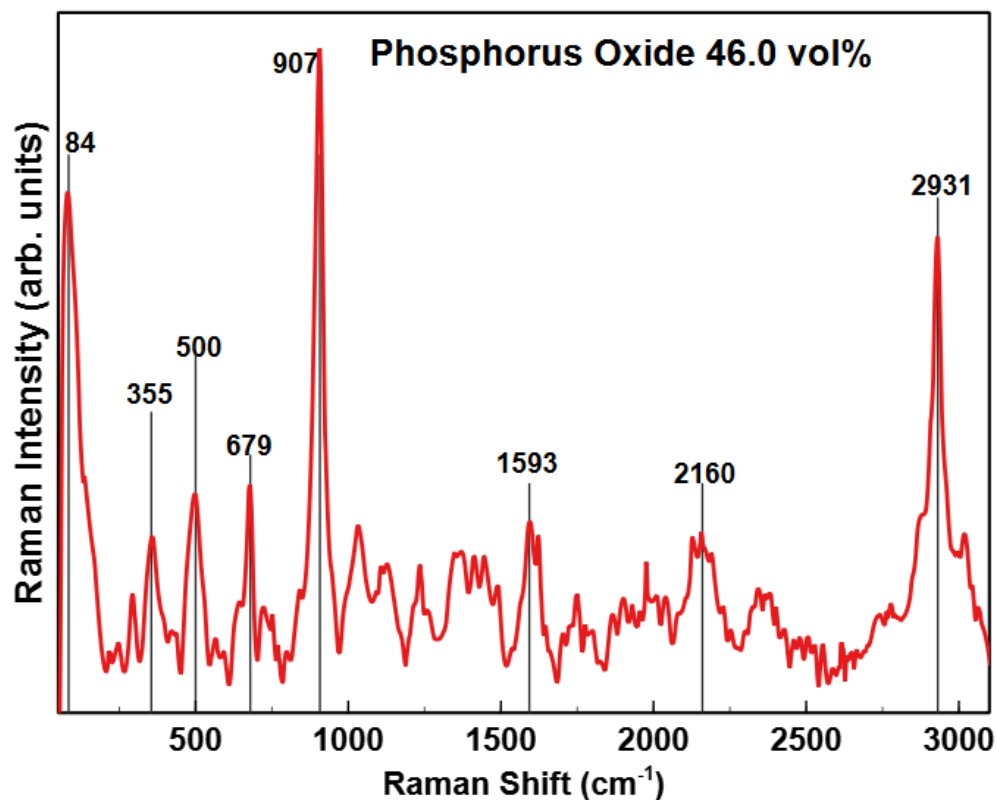


Figura 2.1 Se muestra el óxido de fósforo caracterizado resaltando sus picos más característicos. Elaboración propia (2025).

El óxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) es una sustancia que se utiliza principalmente como agente desecante debido a su gran afinidad con el agua (Canteño Borja, 2022). También se usa en la síntesis orgánica como reactivo de condensación, utilizado en aplicaciones de la agroindustria para la formulación de fertilizantes, por lo que se realizaron pruebas para su caracterización en los sustratos la figura 4.20 muestra el espectro que se caracterizó de esta molécula (Miraval Tarazona, 2019). En la figura 4.21a, se puede observar casi nula presencia de los picos característicos del fósforo dejando visible solo el espectro del sustrato depositado en una superficie de vidrio el cual al aplicarle voltaje presenta un aumento continuo en sus intensidades.

Figura 4.21

*Oxido de fósforo caracterizado en distintas concentraciones sobre vidrio 2025.*

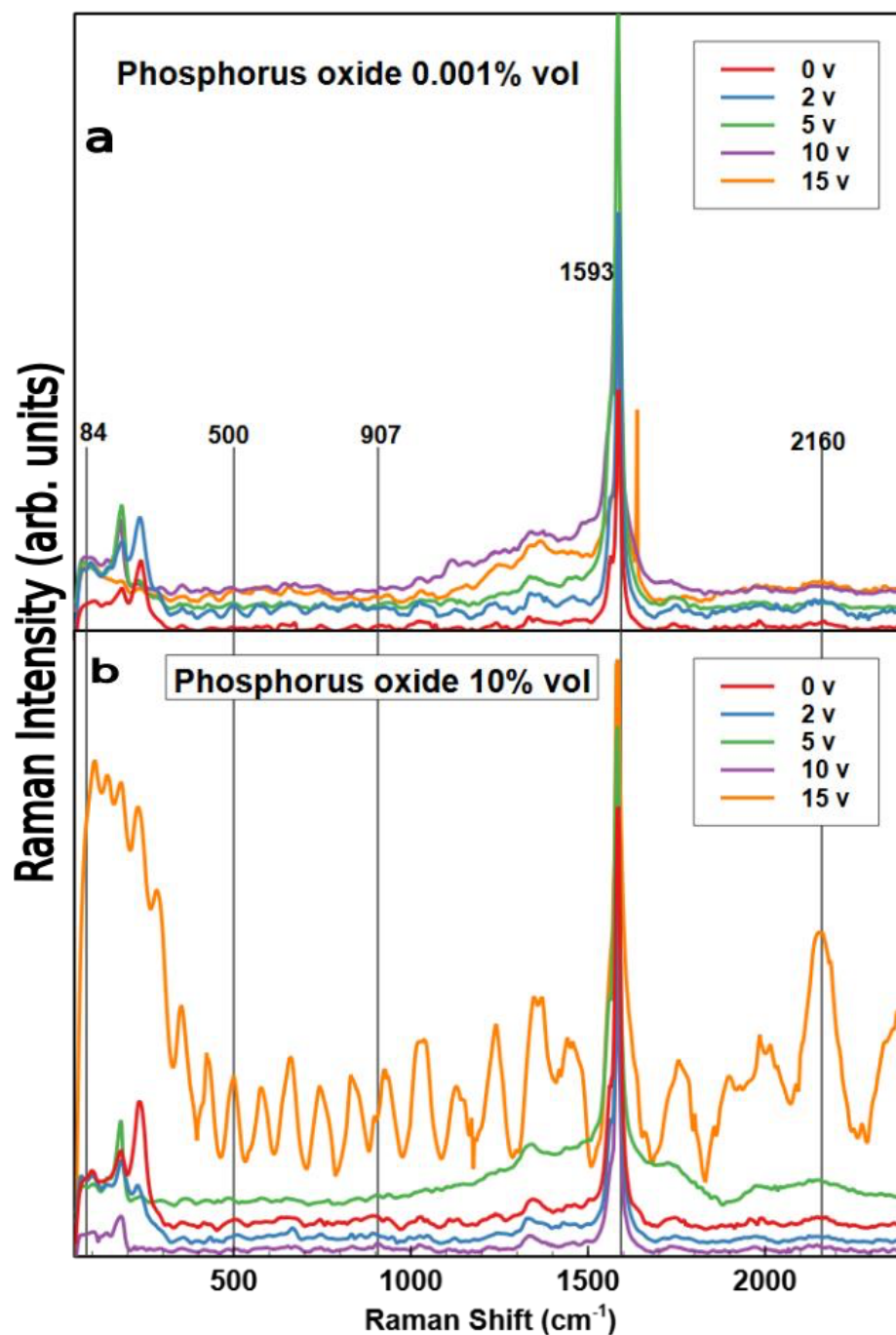


Figura 4.21 Se muestra la comparación entre concentraciones altas y bajas para detectar fósforo aplicando voltaje. Elaboración propia (2025).

Figura 4.22

*Oxido de fósforo caracterizado en distintas concentraciones sobre PDMS 2025.*

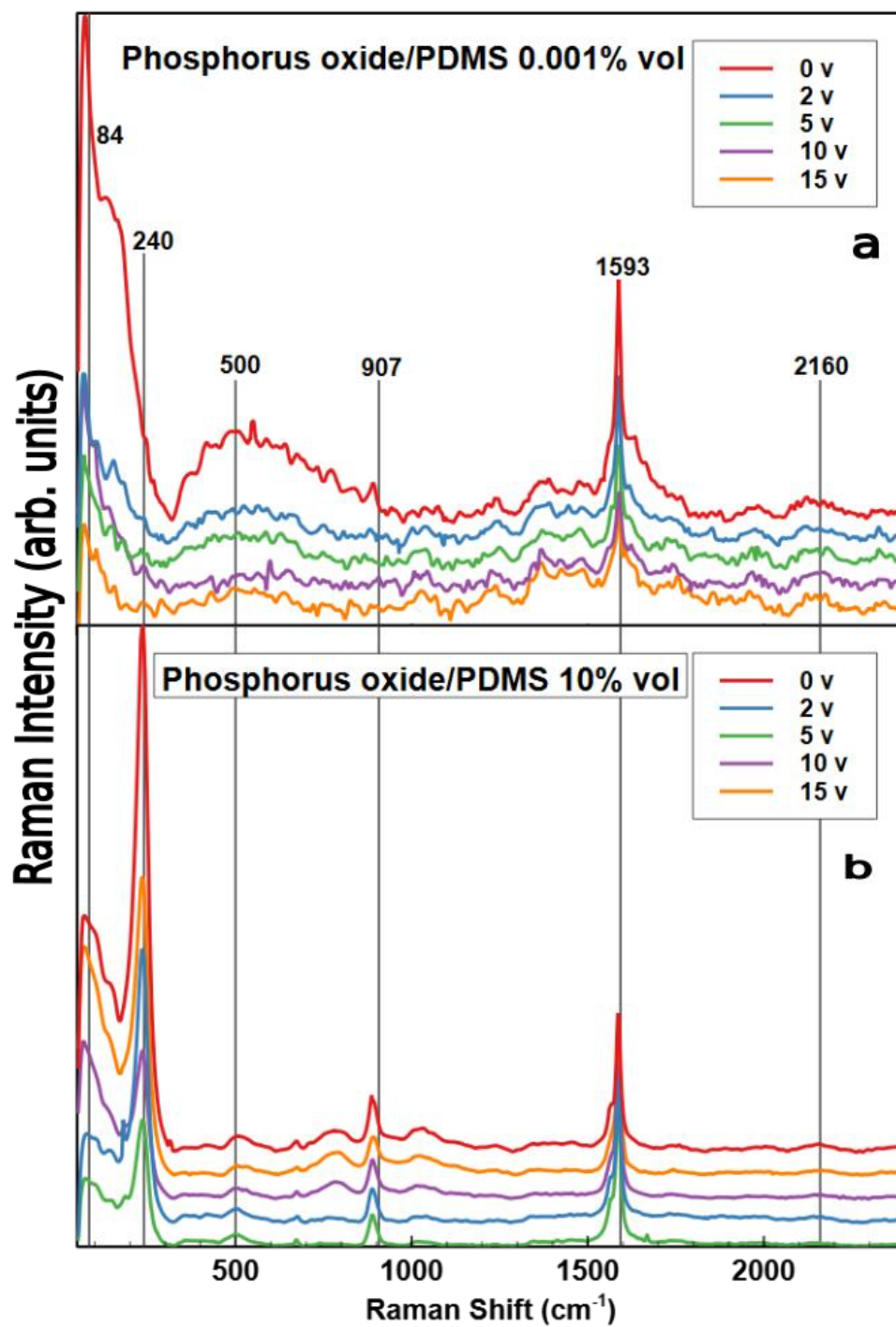


Figura 4.22 Fósforo caracterizado en PDMS con distintos voltajes. Elaboración propia. (2025).

La figura 4.21b ocurre un fenómeno que en el potencial más alto se logran captar algunos picos, pero en los potenciales más bajos la presencia de esta sustancia es casi nula, esto puede deberse a la dificultad de conectar electrodos a la superficie de vidrio, dando como resultado este fenómeno, haciendo al PDMS el más adecuado para ese tipo de pruebas. En las superficies con PDMS se pudieron captar con más claridad algunos picos característicos del fósforo, siendo la figura 4.22a es la que presenta mejor correlación entre los diferentes rangos de voltaje aplicados y el aumento de sus intensidades el espectro del sustrato. La figura 4.22b solo resalta un pico significativo en el rango de  $240\text{cm}^{-1}$  variando su intensidad según el potencial aplicado.

Comparando la viabilidad experimental de este dispositivo, otras investigaciones han propuesto enfoques similares, informan de configuraciones más complejas, como, el desarrollo de un transistor de efecto de campo JFET, que permita un control de polarización (C. Zhang et al., 2024), o utilizando un electrodo basado en un gel iónico (Zhou et al., 2022). Un estudio reciente también propone la creación de un dispositivo mediante el empalme de superficie de plata nanoestructurada, grafeno y una capa de un semiconductor termoeléctrico (Hao et al., 2013). Todos ellos coinciden en la modulación de estos materiales ya sea a partir de NPs metálicas, carbono, etc. Esta modulación producida por la aplicación de un campo eléctrico externo permite controlar la transferencia de carga entre el analito y la superficie SERS, potenciando los picos Raman resonantes, produciendo una amplificación de las características asociadas a las moléculas analizadas.

## Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

Se propuso el desarrollo de un sustrato nanoestructurado para la realización de lecturas SERS, que es activado eléctricamente mediante la conexión de dos electrodos. El sustrato se construyó por medio de la preparación de un nanocompuesto de SWNT y AgNPs, caracterizado por microscopía electrónica de barrido SEM y la difracción de rayos X. Se realizaron mediciones para la detección de muestras diluidas de glifosato, utilizando concentraciones altas y bajas representativas de un compuesto comercial de glifosato, y a diferentes potenciales eléctricos aplicados directamente para evaluar su efecto sobre el SERS. Los potenciales eléctricos aplicados fueron de un rango entre 2-15 de voltaje de corriente directa (VDC), y dieron lugar a una mejora más efectiva para muestras de glifosato de baja concentración, mientras que lo observado en las pruebas realizadas para altas concentraciones fue inferior. Esto se debe probablemente a la diferencia en la acumulación de moléculas en el analito saturando el sensor del espectrómetro Raman, se puede sugerir que las interacciones electrostáticas entre el glifosato y el sustrato son más fuertes para el SERS, en lugar de las transferencias de carga. Sería adecuado un análisis más profundo sobre la naturaleza de la interacción entre el analito de estudio y la superficie nanoestructurada.

El nanocompuesto se utilizó para la deposición de películas delgadas en superficies de vidrio y resina de silicio obteniendo resultados distintos en las pruebas que se realizaron, teniendo que en vidrio el sustrato tiene mayor capacidad de caracterización, sin embargo, la resina de silicio suele ser más práctico de operar haciéndola más adecuada para realizar pruebas de campo y podersele aplicar de mejor manera potencial eléctrico lo que compensa la capacidad de caracterización contra la superficie de vidrio.

La elaboración de este sustrato es relativamente sencilla ya que fue desarrollado con materiales al alcance y equipo básico que no requiere tener alguna especialización para operarlo, lo que representa una ventaja potencial para darle continuidad y realizar futuras investigaciones relacionadas al tema. La fabricación de este sustrato busca detectar glifosato a diferentes concentraciones, toma como antecedente la importancia del desarrollo de técnicas que detecten de mejor manera este tipo de sustancias además de ser alternativas más prácticas a las ya existentes y potenciar el desarrollo de nanomateriales, estos estudios ayudarían a revelar la naturaleza de los cambios a nanoescala en la interfaz del analito y la superficie de los AgNPs+CNT tras la aplicación del campo eléctrico externo.

La implementación de este sustrato podría presentar una alternativa en las técnicas de detección ya existentes para glifosato y otros compuestos, siendo una opción mas flexible y de fácil manejo para su operación, al darle continuidad al proyecto se pretende ayudar al productor en determinar presencia de contaminantes, además de ser guía al momento de usar un plaguicida, respetando los ciclos de aplicación de fertilizantes y pesticidas, no se pretende la prohibición del uso de estas sustancias, ya que estas en cierta medida son de apoyo para los productores, si o de tener un mejor control en su aplicación, optar por alternativas no tan toxicas y dañinas para el medio ambiente y el ser humano y evitar el desarrollo de resistencia por parte de las plagas lo cual es uno de los problemas principales que enfrentan los productores teniendo que añadir más dosis de la recomendada.

La simplicidad del enfoque propuesto para este trabajo fue mediante una conexión de dos electrodos a un sustrato flexible y de fabricación sencilla, basado en el decorado de AgNPs en SWNT, representando una alternativa potencialmente factible como técnica en la detección de glifosato y otros compuestos químicos. El efecto observado al aplicar un potencial eléctrico se

confirma tomando como referencia estudios sobre su ventaja al momento de realizar mediciones. Sin embargo, el sencillo concepto que se presentó en este trabajo puede ser precursor para continuar en la investigación para el desarrollo de nuevas técnicas y dispositivos prácticos para la detección efectiva de contaminantes más complejos y de alto rendimiento.

El desarrollo de este proyecto propuso la implementación de la nanotecnología y la espectroscopia Raman mejorada por superficie, que son técnicas no invasivas y adecuadas para aplicarse en el sector agrícola sin la preocupación de dejar algún tipo de residuo o daño en el área de estudio en cuestión. De darle continuidad podría ser capaz de caracterizar más materiales presentes en suelos o mantos acuíferos con mayor precisión.

## Referencias

- Acercamiento lo básico César Germán Lizarazo-Salcedo, un, Emir González-Jiménez, E., Yohana Arias-Portela, C., Guarguati-Ariza, J., & Germán Lizarazo-Salcedo, C. (2018). Nanomateriales: un acercamiento a lo básico Nanomaterials: Being Closer to Basics. In *Nanomateriales: Artículo especial Med Segur Trab (Internet)* (Vol. 64, Issue 251).
- Adil, M., Khan, T., Aasim, M., Khan, A. A., & Ashraf, M. (2019). Evaluation of the antibacterial potential of silver nanoparticles synthesized through the interaction of antibiotic and aqueous callus extract of *Fagonia indica*. *AMB Express*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/S13568-019-0797-2>
- Aguilar González, X., Ronquillo-Cedillo, I., Ávila-Nájera, D. M., Rodríguez-Hernández, C., Pedraza-Mandujano, J., & Martínez-Jiménez, D. L. (2022). Riesgos a la salud por el uso de herbicidas. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 10(1). <https://doi.org/10.5377/payds.v10i1.13341>
- Aguilar-González, X., Ronquillo-Cedillo, I., & Ávila-Nájera, D. M. (2022). *Riesgos a la salud por el uso de herbicidas*.
- Alcántara-de la Cruz, R. (2022). Prevención, detección y manejo de la resistencia a herbicidas. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 26(Especial). <https://doi.org/10.53897/revaia.22.26.18>
- Alexandre de Toledo Alves, P., Munhoz-Garcia, G. V., Nalin, D., Mendes, K. F., & Tornisielo, V. L. (2024). Understanding the complexities in glyphosate and ametryn interactions: Soil retention and transformation as influenced by their applications alone and mixture. *Crop Protection*, 184, 106803. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2024.106803>
- Alvaro, A. (2007). Herbicidas: Modos y mecanismos de acción en plantas. *Los Ángeles, Estados Unidos: Universidad Centroccidental" Lisandro Alvarado*.
- Andrade Guel, M. L., López López, L. I., & Sáenz Galindo, A. (2012). Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 43(3), 9–18.
- Anzar, N., Hasan, R., Tyagi, M., Yadav, N., & Narang, J. (2020). Carbon nanotube - A review on Synthesis, Properties and plethora of applications in the field of biomedical science. In *Sensors International* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100003>
- Bi, Y., Tang, B., Shen, X., Cui, C., Zhan, X., Bi, F., & Bao, X. (2025). Synthesis water-dispersible silver nanoparticles based on green chemistry for inverted organic solar cells. *Materials Science and Engineering: B*, 316, 118088. <https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2025.118088>

Bruna, T., Maldonado-Bravo, F., Jara, P., & Caro, N. (2021). Silver nanoparticles and their antibacterial applications. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 22, Issue 13). <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>

Canteño Borja, N. C. (2022). *Efecto del uso de estiércol de bovino (bos taurus) y el suero lácteo de la industria inka milk jarara sac en la producción del biol, mediante el uso de biodigestores semicontinuo en el distrito Baños-Huánuco, 2020.*

Cigarroa-Mayorga, O. E., Gallardo-Hernández, S., & Talamás-Rohana, P. (2021). Tunable Raman scattering enhancement due to self-assembled Au nanoparticles layer on porous AAO: The influence of the alumina support. *Applied Surface Science*, 536, 147674. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147674>

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2023). *Manejo Ecológico Integral De Arvenses En México.*

Dikmen, G. (2023). Surface enhanced Raman spectroscopy sensor based on silver nanoparticles/multi wall carbon nanotubes for ultrasensitive detection of cholesterol. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 303, 123235. <https://doi.org/10.1016/J.SAA.2023.123235>

Dinh, N. X., Huy, T. Q., & Le, A.-T. (2016). Multiwalled carbon nanotubes/silver nanocomposite as effective SERS platform for detection of methylene blue dye in water. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1(1), 84–89.

Du, Y., Liu, Z., & He, F. (2025). Fabrication of a novel bifunctional magnetic nanocomposite for colorimetric detection and removal of glyphosate. *Journal of Hazardous Materials*, 484, 136772. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2024.136772>

Ekerim, S. E., Taşci, N., & Demirkan, M. F. (2025). Determination of glyphosate with a novel optic membrane sensor. *Food Chemistry*, 475, 143361. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2025.143361>

Elman, R. R., Kurdyumov, N., Laptev, R. S., & Kudiiarov, V. N. (2025). The influence of single-walled carbon nanotubes additives on the structure and hydrogenation behavior of magnesium hydride. *Journal of Energy Storage*, 119, 116408. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2025.116408>

Emulsion-stabilized silver nanoparticles vs. aqueous solutions: Effects on aggregation, elastic scattering, and nonlinear optical properties. (2025). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 717, 136795. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2025.136795>

Feizpour, M., Liu, Q., Van der Donck, T., Thienpont, H., Meulebroeck, W., & Ottevaere, H. (2024). Characterizing planar SERS substrates: unraveling the link between physical characteristics and performance metrics. *JPhys Photonics*, 6(2). <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ad2528>

Figuerola, S. G., Tavera, V. M., Almanza, E. C., & López, J. L. A. (2024). Alpiste silvestre resistente a herbicidas: alerta temprana para el campo mexicano. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 28(82).

Fuenzalida, F. B., Slepčíková, P., Repovská, M., Jutková, A., Vega Cañamares, M., Miškovský, P., Jurašeková, Z., & Sanchez-Cortes, S. (2024). Selective and ultrasensitive detection of the herbicide glyphosate by means of plasmon catalysis on Ag nanoparticles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 323, 124845. <https://doi.org/10.1016/J.SAA.2024.124845>

Gao, X., Hu, F., Cui, H., Zhu, X., Wang, L., Zhang, K., Li, D., Ji, J., Luo, J., & Cui, J. (2023). Glyphosate decreases survival, increases fecundity, and alters the microbiome of the natural predator *Harmonia axyridis* (ladybird beetle). *Environmental Research*, 238, 117174. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117174>

Godwin, A., Pieralli, S., Sofkova-Bobcheva, S., Ward, A., & McGill, C. (2024). Comparing vegetative growth patterns of cultivated (*Daucus carota* L. subsp. *sativus*) and wild carrots (*Daucus carota* L. subsp. *carota*) to eliminate genetic contamination from weed to crop. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101213>

Gómez-Garzón, M. (2018). Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2). <https://doi.org/10.31260/repertmedcir.v27.n2.2018.191>

González Ruiz, A., López Urquidez, G. A., Ail Catzim, C. E., López Orona, C. A., Medina López, R., & Estrada Acosta, M. D. (2022). Efectividad biológica del herbicida pinoxaden sobre *Avena sterilis* L. en la zona norte del valle de Mexicali. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 26(Especial). <https://doi.org/10.53897/revaia.22.26.17>

Grys, D. B., Chikkaraddy, R., Kamp, M., Scherman, O. A., Baumberg, J. J., & de Nijs, B. (2021). Eliminating irreproducibility in SERS substrates. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(2). <https://doi.org/10.1002/jrs.6008>

Hao, Q., Morton, S. M., Wang, B., Zhao, Y., Jensen, L., & Jun Huang, T. (2013). Tuning surface-enhanced Raman scattering from graphene substrates using the electric field effect and chemical doping. *Applied Physics Letters*, 102(1).

Hernández Sierra, R., García Luzón, D., & Romero Zepeda, H. (2021). Uso del glifosato en México. *Revista Iberoamericana de Bioética*, 17. <https://doi.org/10.14422/rib.i17.y2021.007>

Jung, J. H., Cheol Oh, H., Soo Noh, H., Ji, J. H., & Soo Kim, S. (2006). Metal nanoparticle generation using a small ceramic heater with a local heating area. *Journal of Aerosol Science*, 37(12), 1662–1670. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2006.09.002>

Kubiak, A., Wolna-Maruwka, A., Niewiadomska, A., & Pilarska, A. A. (2022). The Problem of Weed Infestation of Agricultural Plantations vs. the Assumptions of the European Biodiversity Strategy. *Agronomy*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy12081808>

- Kusumavathi, K., Rautaray, S. K., Sarkar, S., Dash, S., Sahoo, T. R., Swain, S. K., & Sethi, D. (2025). Nano-herbicides a sustainable strategy for weed control. *Plant Nano Biology*, 11, 100132. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100132>
- Leal Monteiro, A. C., Ottmann Boff, M., Thiele Fracassi, M. A., & Fuhr, M. I. (2022). Avaliação dos métodos de obtenção e propriedades de nanocompósitos de polímeros com nanotubos de carbono – uma revisão. *Revista Liberato*, 23(39). <https://doi.org/10.31514/rliberato.2022v23n39.p61>
- Li, S., Li, Y., Yi, R., Liu, L., & Qu, J. (2020). Coherent Anti-Stokes Raman Scattering Microscopy and Its Applications. In *Frontiers in Physics* (Vol. 8). <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.598420>
- Liebsch, A. (1993). Surface-plasmon dispersion and size dependence of Mie resonance: silver versus simple metals. *Physical Review B*, 48(15), 11317.
- Lima, I. B., Boëchat, I. G., & Gücker, B. (2021). Glifosato no Brasil. *Caderno de Geografia*, 31(1). <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2021v31nesp1p90>
- Lin, J., Guan, G., Yang, W., & Fu, H. (2019). The enhanced Raman scattering of Ag nanoparticles decorated on the carbon nanotube via a simple manipulation. *Optical Materials*, 95, 109258. <https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2019.109258>
- M, A., Giri, J., Kanan, M., Kumar, J. A., Aruna, V., Deepak, J. R., Jayaprabakar, J., Sathish, T., & Jayaprakash, V. (2025). Development and assessment of a closed-loop pulsating heat pipe employing TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> nanofluids utilizing metallic nanoparticles. *Results in Engineering*, 26, 104675. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2025.104675>
- Ma, Q., Zhou, Y., Parales, R. E., Jiao, S., Ruan, Z., & Li, L. (2025). Effects of herbicide mixtures on the diversity and composition of microbial community and nitrogen cycling function on agricultural soil: A field experiment in Northeast China. *Environmental Pollution*, 372, 125965. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2025.125965>
- Marcela Bernal Barreto, E., Restrepo Manrique Biólogo, R., & Universidad Santo Tomás, E. (2020). *IMPLEMENTACIÓN TÉCNICA HPLC PARA DETECCIÓN DE GLIFOSATO 2*.
- Martínez-González, J., Flores Gil, A., Reyes-Contreras, D., Vigueras Santiago, E., & García-Orozco, I. (2022). Síntesis de nanoestructuras de carbono por molienda mecánica. In *Materiales Avanzados y Nanomateriales: Aprovechamiento de fuentes naturales y sus beneficios al medio ambiente*. <https://doi.org/10.3926/oms.409.08>
- Mikac, L., Rigó, I., Škrabić, M., Ivanda, M., & Veres, M. (2022). Comparison of glyphosate detection by surface-enhanced Raman spectroscopy using gold and silver nanoparticles at different laser excitations. *Molecules*, 27(18), 5767.
- Miraval Tarazona, A. A. (2019). *Elaboración de compost utilizando materia orgánica de cocina y estiércol de vacuno en la granja ecológica lindero, Tomayquichua, ambo, Huánuco, diciembre 2018–marzo 2019*.

- Niu, R.-G., Yin, C.-M., Si, J.-Y., Tang, M.-D., & Lan, J.-F. (2025). Exposure to glyphosate causes hypoxia in crustaceans by targeting hemocyanin. *Aquaculture*, 602, 742314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.742314>
- Nogueira, O. M. N., Salgueiro, J. L. G., Francisco, E. A., Ottoni, J. R., & Passarini, M. R. Z. (2021). Tolerância de microrganismos eucariotos ao herbicida glifosato. *Semina: Ciências Biológicas e Da Saúde*, 42(1). <https://doi.org/10.5433/1679-0367.2021v42n1p103>
- Ortiz-Medina, J., López-Urías, F., Terrones, H., Rodríguez-Macías, F. J., Endo, M., & Terrones, M. (2015). Differential response of doped/defective graphene and dopamine to electric fields: A density functional theory study. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(24), 13972–13978.
- Peruzzolo, M. C., Grange, L., & Ronqui, L. (2021). MORTALIDADE DE ABELHAS SEM FERRÃO *Scaptotrigona bipunctata* SOB OS EFEITOS DOS HERBICIDAS PARAQUAT E DIQUAT. *Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia Da UNIPAR*, 24(1cont). <https://doi.org/10.25110/arqvet.v24i1cont.2021.8408>
- Petersen, M., Yu, Z., & Lu, X. (2021). Application of Raman Spectroscopic Methods in Food Safety: A Review. *Biosensors*, 11, 187. <https://doi.org/10.3390/bios11060187>
- Ramírez, M. E., Limas, E. A., Ortiz, P. R., & Díaz, A. R. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía*, 53–54, 77–88.
- Rodriguez Torres, M., Diaz-Torres, L., & Romero Servin, S. (2014). Heparin Assisted Photochemical Synthesis of Gold Nanoparticles and Their Performance as SERS Substrates. *International Journal of Molecular Sciences*, 15, 19239–19252. <https://doi.org/10.3390/ijms151019239>
- Rojas Delgado, L. M. (2022). Dinámica del agua en el suelo. In *Dinámica del agua en el suelo*. <https://doi.org/10.19052/1900618779>
- Salem, M. A. S., Bhat, A. S., Mehandi, R., Abugu, H. O., Onwujiogu, V. C., Orjiocha, S. I., & Chinonso, E. F. (2025). Advances in sensing technologies using functional carbon nanotube-hydrogel nanocomposites. *Inorganic Chemistry Communications*, 175, 114139. <https://doi.org/10.1016/J.INOCHE.2025.114139>
- Salomão, P. E. A., Ferro, A. M. S., & Ruas, W. F. (2020). Herbicidas no Brasil: um breve revisão. *Research, Society and Development*, 9(2). <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i2.1990>
- Shajan, S. R. O., Sadashivappa, N. M., Hanumanthappa, D., Walikar, S. K., Dinesh, B. G. H., Kumar, B. S., Kunjiappan, S., Theivendren, P., Alagarsamy, S. K. K., Chidamabaram, K., Ammunje, D. N., & Pavadai, P. (2025). Exploring the potential application of single-walled carbon nanotubes in medical treatment and therapy. *Talanta Open*, 11, 100392. <https://doi.org/10.1016/J.TALO.2024.100392>

- Shoman, N., Solomonova, E., & Akimov, A. (2024). Growth stimulation of toxic dinoflagellate *Prorocentrum cordatum* with herbicide glyphosate. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 577, 152017. <https://doi.org/10.1016/J.JEMBE.2024.152017>
- Sierra, E. V., Méndez, M. A., Sarria, V. M., & Cortés, M. T. (2008). Electrooxidación de glifosato sobre electrodos de níquel y cobre. *Química Nova*, 31, 220–226.
- Sierra, R. H., Luzón, D. G., & Zepeda, H. R. (2021). Uso del glifosato en México: Problemas ecológicos e implicaciones éticas. *Revista Iberoamericana de Bioética*, 17.
- Sobrero, M. S., Marsili, N. R., Schenone, A. V., Manzo, R., & Frisón, L. N. (2022). Degradacion biológica de glifosato. *South Florida Journal of Environmental and Animal Science*, 2(2). <https://doi.org/10.53499/sfjeasv2n2-015>
- Sudheer, W. N., Jaison, J. P., Nagella, P., & Joseph, K. S. (2025). Photocatalytic and antimicrobial properties of Boerhavia diffusa bio-callus synthesized Silver nanoparticles. *Plant Nano Biology*, 12, 100153. <https://doi.org/10.1016/J.PLANA.2025.100153>
- Sun, W., Dou, F., Li, C., Ma, X., & Ma, L. Q. (2021). Impacts of metallic nanoparticles and transformed products on soil health. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(10). <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1740546>
- Syduzzaman, M., Islam Saad, M. S., Piam, M. F., Talukdar, T. A., Shobdo, T. T., & Pritha, N. M. (2025). Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry. *Results in Materials*, 25, 100654. <https://doi.org/10.1016/J.RINMA.2024.100654>
- Tonkikh, A. A., Rybkovskiy, D. V., Enyashin, A. N., Obraztsova, E. A., Van Chuc, N., & Obraztsova, E. D. (2025). The probing of local charge with sulfur encapsulated in single-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 232, 119806. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2024.119806>
- Torres, J., Gutierrez, J. A., & Beltran, H. A. (2017). Compactación, una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Ciencias Agropecuarias*, 3(3), 18–22.
- Vargas Moranth, R., Llinás Burgos, L., Vargas Alcocer, E., Alcocer Olaciregui, A., & Llinás Delgado, A. (2023). Glifosato y cáncer: cuando la ciencia, la política y la industria converge. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3). [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i3.6389](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6389)
- Villalba, A. (2009). Resistencia a herbicidas. Glifosato. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 2009(39).
- Volcanes Moreno, V., Yohai, L., Procaccini, R., & Pellice, S. (2025). Silver-functionalized mesoporous silica nanoparticle coatings: Optimal thermal stability and ionic activity for antimicrobial applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 711, 136387. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2025.136387>
- Wang, L., Wu, G., Wang, T., & Tian, D. (2024). Sm<sup>3+</sup>-tuning aggregation-induced emission of copper nanoclusters for sensitive and visual detection of glyphosate. *Journal of*

*Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 113578.

<https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.113578>

Xu, L. T., Yuan, Y. F., Shen, S. H., Zhu, M., Wang, B. X., Huang, X. H., & Guo, S. Y. (2025). Metallic bismuth nanoparticles encapsulated within nanoporous hollow carbon sphere/polydopamine-derived carbon shell for stable and rapid sodium storage. *Journal of Power Sources*, 629, 236066. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2024.236066>

Yin, Y., Zhong, Z., Gates, B., & Xia, Y. (1999). Synthesis, Characterization, and Utilization of Single Crystalline Nanoparticles of Silver. *MRS Online Proceedings Library*, 581(1), 83–88. <https://doi.org/10.1557/PROC-581-83>

Zeebaree, A. Y. S., Sharaf, S. Y., Sultan, S. J., Rashid, R. F., Haji, O. I., Ismael Barani, S. S., Rumih, Z. K., Othman, I. I., Mohammad, K. S., Albastky, N. M. S., & Abdallah, M. A. (2025). Sustainable strategy and rapid naked eye performance of novel Cu@SG nanosensor for detection of glyphosate in aquatic models. *Desalination and Water Treatment*, 321, 100903. <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100903>

Zhang, C., Tan, J., Du, B., Ji, C., Pei, Z., Shao, M., Jiang, S., Zhao, X., Yu, J., & Man, B. (2024). Reversible thermoelectric regulation of electromagnetic and chemical enhancement for rapid SERS detection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(9), 12085–12094.

Zhang, D., Pu, H., Huang, L., & Sun, D. W. (2021). Advances in flexible surface-enhanced Raman scattering (SERS) substrates for nondestructive food detection: Fundamentals and recent applications. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 109, pp. 690–701). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.058>

Zhou, L., Chen, X., Ren, G., Chen, L., Xu, W., Gu, C., Zhang, W., Li, Y., Tian, Z., & Zhou, J. (2022). Electrically tunable SERS based on plasmonic gold nanorod-graphene/ion-gel hybrid structure with a low voltage. *Carbon*, 187, 425–431.

Zhou, L., Zhao, Z., Xie, A., Zhang, R., Cheng, L., Liu, J., Zhou, H., Chen, Y., Wan, P., & Tang, Y. (2025). Ni<sub>4</sub>Mo nanoparticles embedded in N-doped carbon nanotubes growing on Ni<sub>4</sub>Mo/MoO<sub>2</sub> micropillars for durable hydrogen evolution. *Chemical Communications*, 61(26), 4983–4986. <https://doi.org/10.1039/D5CC00513B>

Zhu, A., Zhang, F., Gao, R., Zhao, X., Chen, L., Zhang, Y., Zhang, X., & Wang, Y. (2019). Increasing polarization-dependent SERS effects by optimizing the axial symmetry of plasmonic nanostructures. *Applied Surface Science*, 494, 87–93.

Anexos

Apéndice A: Artículo publicado y Retribuciones

Artículo publicado

Variable sensitivity of nanostructured substrate for SERS-based glyphosate detection

Publisher: IEEE Cite This PDF

Alejandro D. Ramírez-Flores ; Merit Cisneros-Gonzalez ; Jose A. Martínez-Rivera ; Francisco J. Godínez-García ; Ignacio Villanueva-Fierro ; Josué Ortiz-Medina All Authors



|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                    |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Abstract                    | <b>Abstract:</b><br>Electrically active nanostructured substrates based on carbon nanotubes (CNTs) and silver nanoparticles (AgNPs) have been studied for surface enhanced Raman spectroscopy (SERS)-based detection of diluted glyphosate samples. The nanostructured flexible substrates are prepared by means of a thin film deposition of dispersed CNTs/AgNPs composite mixtures on silicone-based substrates, which are electrically connected to an electric potential source. SERS measurements are performed for glyphosate detection at two different concentrations (10 and 0.001 vol.%), at variable electric potentials applied to the conductive substrate. The results indicate a relevant sensitivity of SERS signals enhancement to applied voltages, which can be seen at Raman features associated with glyphosate. The facile fabrication of the proposed nanostructured substrate, along with the practicality of simple electrical connections and set-up for SERS based measurements, make this proposal a potentially useful platform for practical and accessible detection of glyphosate, possibly extendable to other critical agrochemicals or molecules of interest. |                                                    |
| Document Sections           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                    |
| I. Introduction             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                    |
| II. Materials and Metods    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                    |
| III. Results and Discussion |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                    |
| IV. Conclusions             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                    |
| Authors                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                    |
| Figures                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                    |
| References                  | <b>Published in:</b> 2025 IEEE 11th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                    |
| Keywords                    | <b>Date of Conference:</b> 10-11 September 2025                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>DOI:</b> 10.1109/ICSIMA66552.2025.11233790      |
| Footnotes                   | <b>Date Added to IEEE Xplore:</b> 14 November 2025                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Publisher:</b> IEEE                             |
|                             | <b>► ISBN Information:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Conference Location:</b> KUALA LUMPUR, Malaysia |
|                             | <b>^ ISSN Information:</b><br><b>Electronic ISSN:</b> 2640-6535<br><b>Print on Demand(PoD) ISSN:</b> 2640-6543                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                    |

*Reconocimiento por participación y publicación del artículo*



*Constancia de participación en Simposio en la presentación de cartel*



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO  
OTORGA LA PRESENTE

**CONSTANCIA**

**A**

**ALEJANDRO D. RAMÍREZ FLORES, D. JOSUÉ ORTIZ MEDINA,  
FRANCISCO J. GODÍNEZ GARCÍA, DARÍO CISNEROS  
ARREOLA, IGNACIO VILLANUEVA**

por su destacada participación con la presentación del cartel:

**"ELABORACIÓN DE UN SUSTRATO NANOESTRUCTURADO PARA LA  
DETECCIÓN DE CONTAMINANTES EN SUELOS AGRÍCOLAS"**

en el Simposio 2024 de la Maestría en Ingeniería

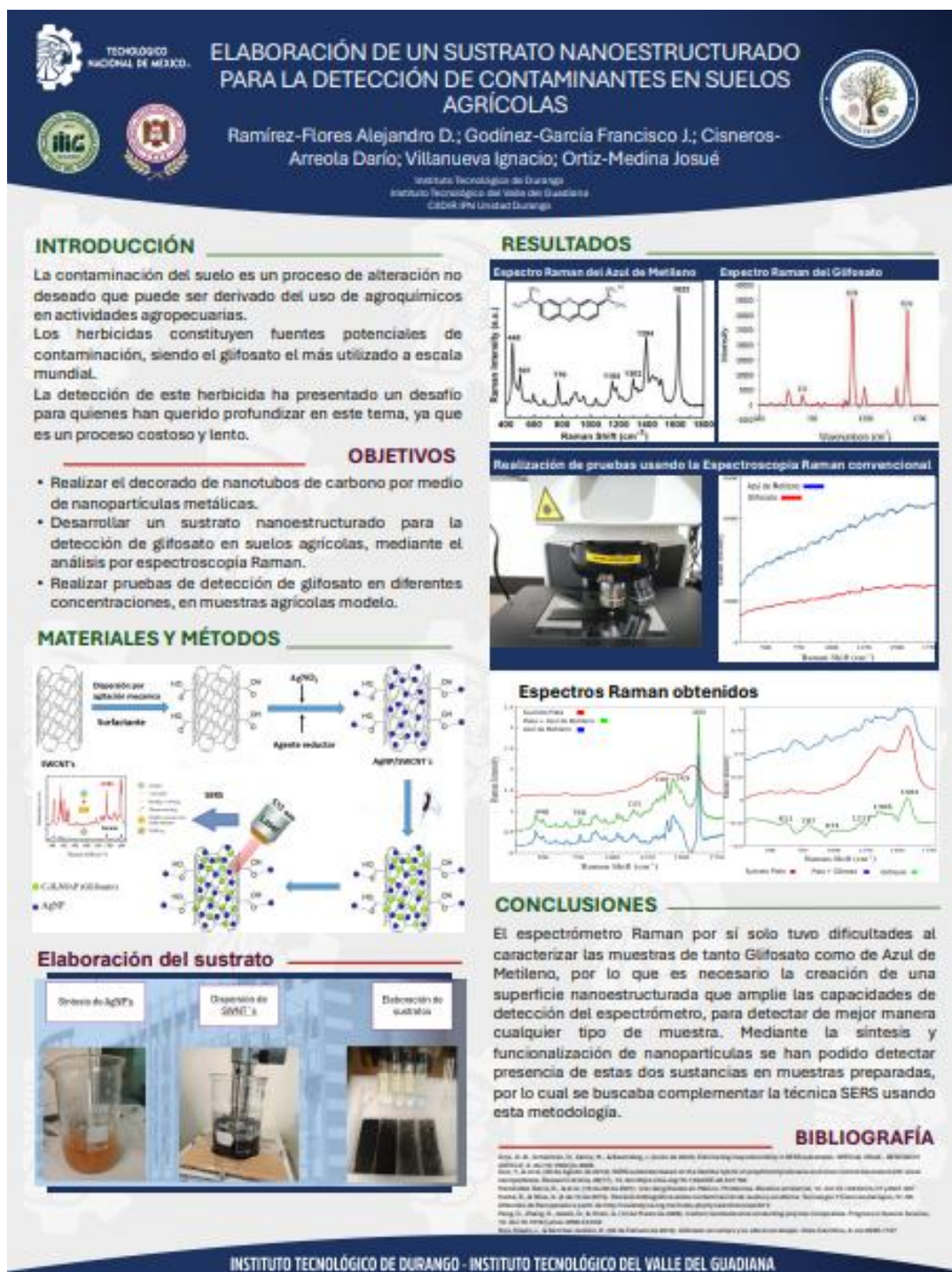
**"Tecnología, Innovación y Emprendimiento en Ingeniería"**

Victoria de Durango, Dgo., a 28 de Mayo de 2024

**GUILLERMO DE ANDA RODRÍGUEZ**  
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO



## Cartel publicado de avances de proyecto en Simposio



## Apéndice B: información de soporte

### *Nomenclaturas utilizadas*

| Nomenclatura                                                 | Descripción                                                                         |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>SWCNTs</b>                                                | Single Wall Carbon Nanotubes/ Nanotubos de Carbono de Pared Simple                  |
| <b>MWCNTs</b>                                                | Multiple Wall Carbon Nanotubes/ Nanotubos de Carbono de Pared Multiple              |
| <b>CNT</b>                                                   | Carbon Nanotubes / Nanotubos de Carbono                                             |
| <b>NT</b>                                                    | Nanotecnología                                                                      |
| <b>SEM</b>                                                   | Microscopia electrónica de barrido                                                  |
| <b>Ag</b>                                                    | Plata                                                                               |
| <b>PVA</b>                                                   | Alcohol Polivinílico                                                                |
| <b>PDMS</b>                                                  | Polidimetilsiloxano (resina de silicio)                                             |
| <b>AgNPs</b>                                                 | Nanoparticulas de plata                                                             |
| <b>NPs</b>                                                   | Nanoparticulas                                                                      |
| <b>VDC</b>                                                   | Voltaje de corriente directa                                                        |
| <b>RS</b>                                                    | Espectroscopia raman                                                                |
| <b>SERS</b>                                                  | Espectroscopía Raman Mejorada por Superficie/Spectroscopy-enhancement Raman Surface |
| <b>GLY</b>                                                   | Glifosato                                                                           |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>                            | Oxido de fosforo                                                                    |
| <b>MB</b>                                                    | Azul de metileno/Methylene Blue                                                     |
| <b>Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub></b> | Citrato de sodio                                                                    |
| <b>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>K<sub>3</sub>O<sub>7</sub></b>  | Citrato de potasio                                                                  |
| <b>NaOH</b>                                                  | Hidróxido de sodio                                                                  |
| <b>HCl</b>                                                   | Ácido clorhídrico                                                                   |
| <b>C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub></b>               | Acido ascórbico                                                                     |
| <b>AgNO<sub>3</sub></b>                                      | Nitrato de plata                                                                    |

### *Información de soporte*

| <b>Materiales</b> | <b>Reactivos</b>                            | <b>Funcionalización</b>                                                                        | <b>Tiempo de preparación</b>                                                 |
|-------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nanotubos</b>  | Surfactante<br>Tritón X-100                 | Se añadieron 18 mg de SWNT, 5 ml de HCl/50 ml de agua, 25 ml de surfactante.                   | 15 min baño ultrasónico, 5 horas en intervalos de 45 minutos homogeneizador. |
| <b>Plata</b>      | $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ | Se utilizaron 687 mg $\text{AgNO}_3$ , 150 mg de $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$ . | 1 hora calentándose a 70 C, el proceso se realizó 5 veces.                   |
| <b>PDMS</b>       | Base de silicio y caralizador               | Se prepararon 5 ml de la base y 1 ml del catalizador.                                          | Se sometió a un proceso de vacío por 5 minutos.                              |

| <b>Material</b>          | <b>Cantidad</b> | <b>Precio \$</b> |
|--------------------------|-----------------|------------------|
| <b>SWCNTs</b>            | 250 gr          | 17,077           |
| <b>PVA</b>               | 1 kg            | 280              |
| <b>PDMS</b>              | 1 L             | 5800             |
| <b>Agua destilada</b>    | 20 L            | 250              |
| <b>Tritón X-100</b>      | 1 L             | 1041.81          |
| <b>Nitrato de plata</b>  | 100 g           | 4,901            |
| <b>Resina de silicio</b> | 250 ml          | 65               |
| <b>Citrato de sodio</b>  | 500 g           | 150              |

### *Sustancias analizadas*

| <b>Sustancia</b>        | <b>Primeras pruebas</b> | <b>Concentración alta</b> | <b>Concentración baja</b> |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Glifosato</b>        | 600 ul en 50 ml de agua | 100ml en 1L               | 10ul/1L                   |
| <b>Oxido de fosforo</b> | -----                   | 25 ml / 100 ml            | 300 ul/100ml              |
| <b>Azul de metileno</b> | 200 ul en 50 ml de agua | 1 ml / 50ml               | 30 ul/50ml                |

*Clasificación de herbicidas según modo de acción*

| MODO DE ACCIÓN                                                             | FAMILIA QUÍMICA       | NOMBRE COMÚN    | NOMBRE COMERCIAL                    | CULTIVOS                   |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------------|
| <b>Reguladores de crecimiento</b>                                          | Fenoxicarboxílicos    | 2,4-D           | Hierbamina y otros                  | Maíz, sorgo, cereales      |
|                                                                            |                       | 2,4-DB          | Butyrac                             | Soya, cacahuete            |
|                                                                            | Benzoicos             | Dicamba         | Banvel, Fortune, Herbamba           | Maíz, sorgo, cereales      |
|                                                                            |                       | Picloram        | Tordon, Combo                       | Maíz, pastos               |
|                                                                            | Piridincarboxílicos   | Clopiralid      | Stinger, Reclaim                    | Pastos, trigo              |
|                                                                            |                       | Fluroxipir      | Starane, Tomahawk                   | Pastos, trigo              |
|                                                                            |                       | Triclopir       | Garlon                              | Áreas no agrícolas         |
| <b>Inhibidores de crecimiento</b><br><b>Inhibidores de la fotosíntesis</b> | Quinolincarb oxílicos | Quinclorac      | Facet                               | Arroz                      |
|                                                                            | Dinitroanilinas       | Trifluralina    | Treflan, Otilan, Archer, Premierlin | Soya, algodón              |
|                                                                            |                       | Pendimetalina   | Prowl, Patrol                       | Maíz, soya, algodón, arroz |
|                                                                            | Cloroacetamidas       | Metolaclor      | Dual Maxx                           | Maíz, soya, algodón        |
|                                                                            |                       | Acetochlor      | Harness, Surpass, Anaclor, Keystone | Maíz, Agave                |
|                                                                            |                       | Dimetenamida    | Frontier 2X                         | Maíz, soya, sorgo          |
|                                                                            | Tiocarbamatos         | EPTC            | Eptam, Eradicane                    | Maíz                       |
|                                                                            | Ácidos Benzoicos      | Clortal-dimetil | Dacthal                             | Hortalizas                 |
|                                                                            |                       |                 |                                     |                            |
|                                                                            |                       |                 |                                     |                            |

|                                                            |                      |                            |                               |                                |
|------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| <b>Inhibidores<br/>de la síntesis<br/>de<br/>pigmentos</b> | Triazinas            | Atrazina                   | Atranex, Gesaprim y<br>otros  | Maíz, sorgo                    |
|                                                            |                      | Ametrina                   | Ametrex, Amigan,<br>cañon     | Caña                           |
|                                                            |                      | Prometrina                 | Gesagard,<br>Prometrex        | Soya, algodón                  |
|                                                            | Triazinonas          | Metribuzina                | Sencor, Lexone,<br>Metribuzin | Soya, tomate                   |
|                                                            |                      | Hexazinona                 | Velpar, Hexapar               | Caña                           |
|                                                            | Triazolinonas        | Amicarbazone               | Orión, Pegaso                 | Agave, maíz                    |
|                                                            | Fenilureas           | Fluometuron                | Cotoran, Cottonex             | Algodón                        |
|                                                            |                      | Diuron                     | Karmex, Cañex y<br>otros      | Maíz, algodón                  |
|                                                            |                      | Linuron                    | Linurex, Lorox                | Soya, papa                     |
|                                                            | Uracilos             | Bromacil                   | Hyvar                         | Cítricos                       |
|                                                            |                      | Terbacil                   | Sinbar                        | Caña, forrajes                 |
|                                                            | Benzotiadizol<br>es  | Bentazon                   | Basagran                      | Maíz, soya                     |
|                                                            | Nitrilos             | Bromoxinil                 | Brominal, Bucril              | Maíz, cereales                 |
|                                                            | Amidas               | Propanil                   | Pantox, Stamfos               | Arroz                          |
|                                                            | Isoxazolidino<br>nas | Clomazone                  | Gamit, Command                | Soya, algodón                  |
|                                                            | Triazoles            | Amitrole                   | Amitrol                       | Áreas<br>industriales          |
|                                                            | Isoxazoles           | Isoxaflutole               | Isoxazolidinonas              | Maíz                           |
|                                                            | Tricetonas           | Mesotrione<br>Tembotrione  | Callisto Laudis               | Maíz                           |
|                                                            | Benzoilpiraz<br>oles | Topramezone y              | Convey                        | Maíz                           |
|                                                            | Piridazinonas        | Norflurazon<br>Fluazifop-P | Zorial, Solicam<br>Fusilade   | Algodón, Soya<br>Soya, algodón |

|                                           |                              |                                  |                  |                             |
|-------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------|
| <b>Inhibidores<br/>de lípidos</b>         | Ariloxifenoxi<br>propionatos | Quizalofop-P                     | Assure           | Soya, algodón               |
|                                           |                              | Diclofop                         | Iloxan           | Trigo, cebada               |
|                                           |                              | Clodinafop                       | Topik            | Trigo                       |
|                                           |                              | Haloxifop                        | Galant           | Papa                        |
|                                           |                              | Fenoxaprop                       | Furore, Puma     | Arroz                       |
| <b>Inhibidores<br/>de<br/>aminoácidos</b> | Ciclohexanod<br>ionas        | Sethoxidim                       | Poast            | Soya, algodón               |
|                                           |                              | Clethodim                        | Select           | Soya, algodón               |
|                                           |                              | Sulfonilureas                    | Accent, Sansón   | Maíz                        |
|                                           |                              | Primisulfuron                    | Tell, Beacon     | Maíz                        |
|                                           |                              | Prosulfuron                      | Peak             | Maíz y sorgo                |
| <b>Inhibidores<br/>de<br/>aminoácidos</b> | Sulfonilureas                | Halosulfuron                     | Permit, Sempra   | Maíz, sorgo,<br>arroz, caña |
|                                           |                              | Metsulfuron                      | Ally             | Trigo, cebada               |
|                                           |                              | Triasulfuron                     | Amber            | Trigo                       |
|                                           |                              | Clorimuron                       | Classic, Assert  | Soya                        |
|                                           |                              | Foramsulfuron +<br>iodosulfuron  | Maister          | Maíz                        |
|                                           |                              | Meosulfuron +<br>iodosulfuron    | Sigma            | Trigo                       |
|                                           |                              | Imidazolinon<br>as               | Pívor, Pursuit A | Soya                        |
|                                           |                              | Imazaquin                        | Scepter          | Soya                        |
|                                           |                              | Imazethabenz                     | Assert           | Trigo, cebada               |
|                                           |                              | Imazapir                         | Arsenal          | Áreas no<br>agrícolas       |
| <b>Inhibidores<br/>de<br/>aminoácidos</b> | Triazolopirim<br>idinas      | Flumetsulam                      | Broadstrike      | Soya                        |
|                                           |                              | Cloransulam                      | Firstrate        | Soya                        |
|                                           |                              | Pirimidiniltio<br>ben-<br>zoatos | Staple           | Algodón                     |

|                    |                                            |                    |                    |                 |
|--------------------|--------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
|                    | Sulfonilamin<br>ocarbonil<br>triazolinonas | Flucarbazone-sodio | Everest            | Trigo           |
| <b>Destruyores</b> | Bipiridilos                                | Paraquat           | Gramoxone y otros  | Presiembra      |
| <b>de</b>          |                                            | Diquat             | Reglone, Reward    | Presiembra      |
| <b>membranas</b>   | Difeniléteres                              | Acifluorfen        | Blazer             | Soya            |
| <b>celulares</b>   |                                            | Oxifluorfen        | Goal               | Cebolla, col    |
|                    |                                            | Fomesafen          | Flex               | Soya            |
|                    |                                            | Lactofen           | Cobra              | Soya, algodón   |
|                    | Triazolinonas                              | Sulfentrazone      | Boral              | Caña, tabaco    |
|                    |                                            | Carfentrazone      | Affinity, Veloz    | Maíz, algodón   |
|                    | Oxadiazoles                                | Oxadiazon          | Ronstar            | Arroz           |
|                    | N-fenil-<br>italimidaz                     | Flumiclorac        | Resource           | Soya, maíz      |
|                    |                                            | Flumioxazin        | Valor              | Soya, cacahuete |
|                    | Arsenicales                                | MSMA               | Citripol, Novansar | Algodón, prados |
|                    | orgánicos                                  | DSMA               | DSMA               | Algodón, prados |

### *Infraestructura y equipo*

| <b>Equipo</b>           | <b>Figura</b>                                                                       | <b>Especificaciones</b>                                                                                   |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Homogeneizador:</b>  |  | Homogeneizador de dispersión de alta velocidad ajustable FSH-2A 185W mezclador de pantalla digital.       |
| <b>Placa agitadora:</b> |  | SH-2 Mezclador agitador magnético de placa caliente de doble control con barra de agitación de 1 pulgada. |

---

**Bascula electrónica:**

WANT WT-A 0.01g Electronic balance, Model NO. WT-A, Application Special Scales, Function Weighing Scale, Structure Electronic Scale, Shape Square, Transport Package Carton, Specification 29\*22\*17.

**Limpiador ultrasónico:**

Materiales: SUS304, Color plata, Frecuencia: 40kHz, Capacidad del tanque: 1.3L, Rango de configuración de tiempo: 1-99 min, Rango de ajuste de temperatura: 0 grados Celsius-80 grados Celsius, Potencia ultrasónica: 60W, Potencia de calefacción: 100W, Fuente de alimentación: CA 110-240 V.

**Bomba de vacío:**

Bomba de vacío 5 CFM 1/3 HP VEVOR Cámara de vacío 5 galones de paleta rotativa de 1 etapa HVAC de 110 V desgasificar siliconas, epoxis y aceites esenciales.

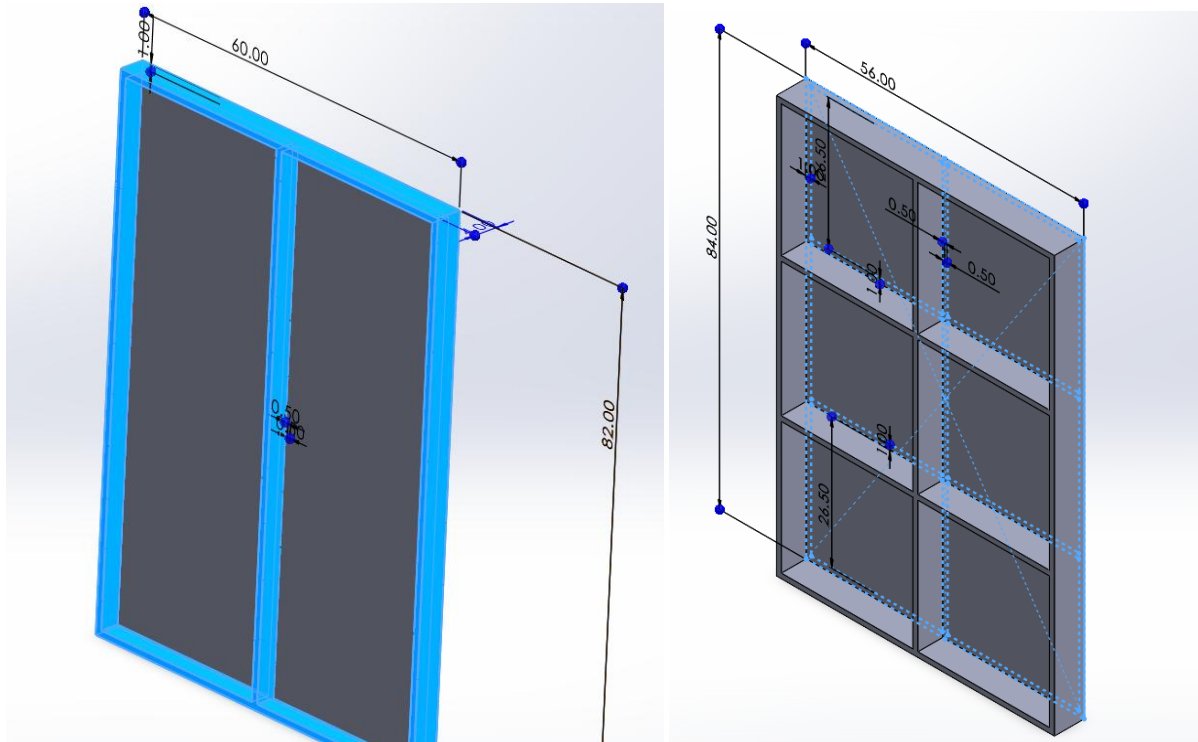
**Centrifugadora:**

Centrífuga Centrifugadora 6 Tubos Laboratorio 4000rpm Zeigen, Temporizador programable de hasta 30 minutos, Rotor (45°) angular de aluminio, Motor de 25W, Sistema de frenado mediante carbones, Alimentación eléctrica trifásica de 110V/60HZ, Medidas del producto: 25 x 25 x 23 cm, Peso de 3.2 kg

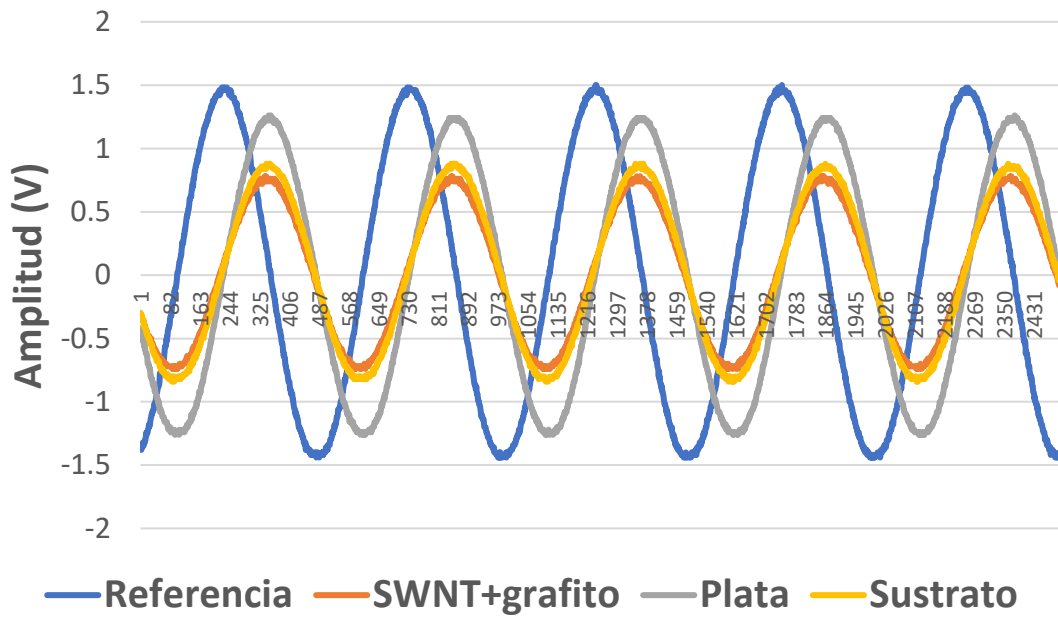
---

## Apéndice C: Pruebas y diseños realizados

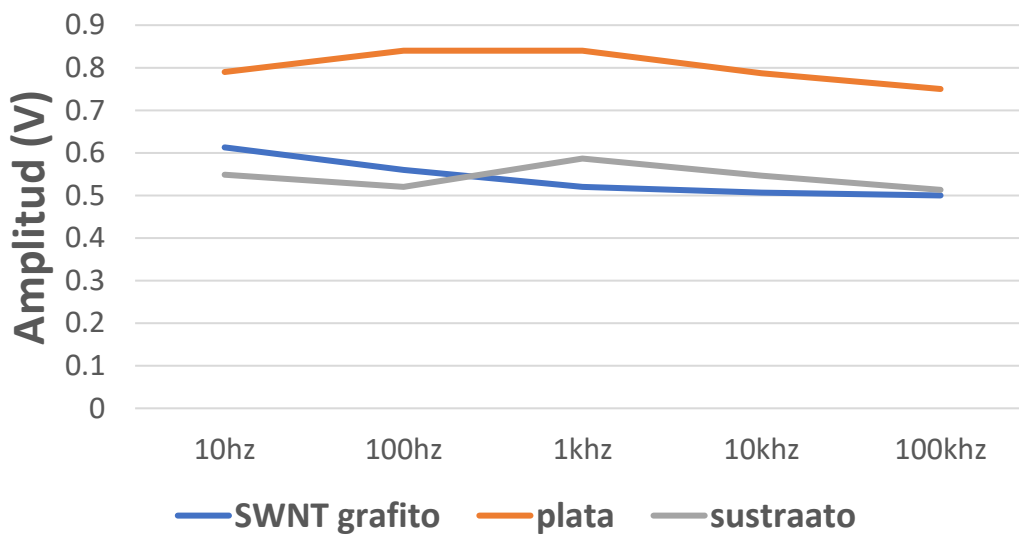
### *Elaboración de moldes*



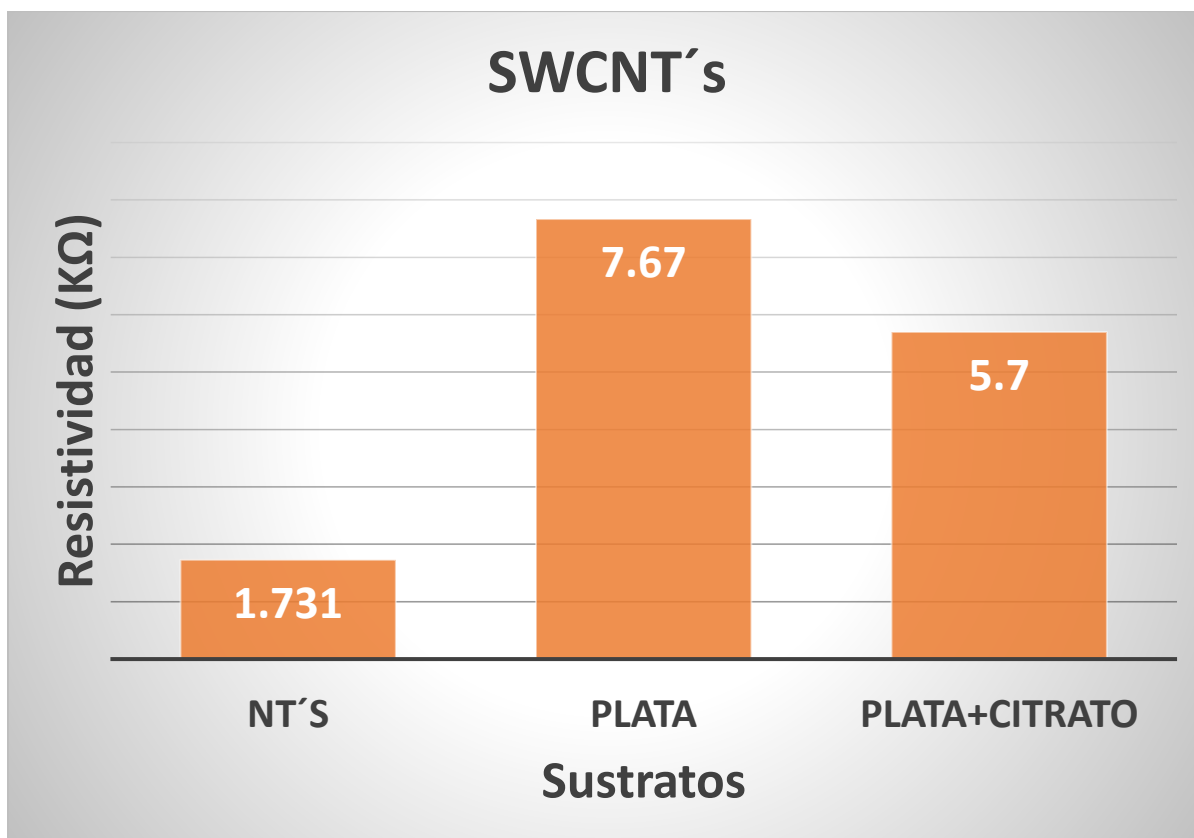
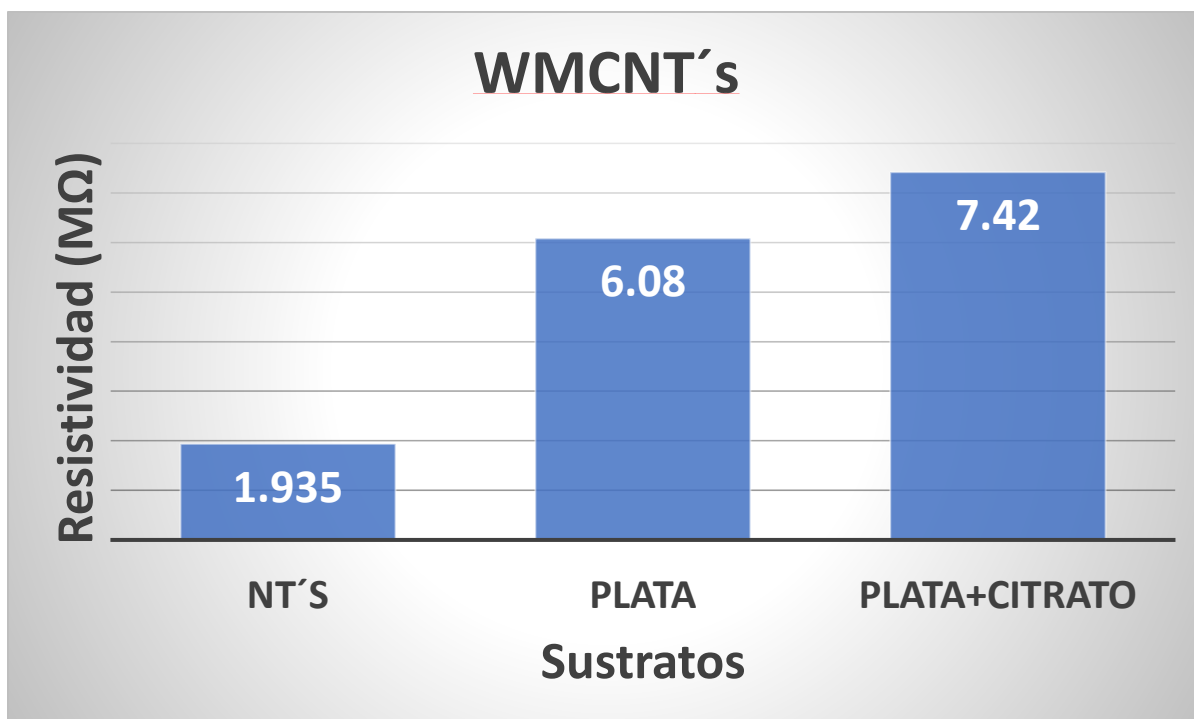
### *Variación de amplitud y desfase en sensores nanoestructurados*



### Variación de ondas en sensores nanoestructurados



*Pruebas de resistencia realizadas a los CNT*



## *Código diseñado para el cálculo de los Enhancement Factors Ef*

```

get_factors.py
C: > Users > alex_ > Documents > get_factors.py > ...
1  # Extraction of peak intensities (Raman) and determination of enhancement factors
2  # JOM, january 2025
3
4  import pandas as pd
5
6  file_2_work = input('Filename to work on: ')
7  shift_cm = float(input('Raman shift to check: '))
8  low_limit_cm = shift_cm - 75
9  up_limit_cm = shift_cm + 75
10
11 raman_data = pd.read_csv(file_2_work, delimiter='\t', header=0)
12 print(raman_data.info())
13
14 sub_data = raman_data.loc[raman_data['raman'] > low_limit_cm]
15 sub_data = sub_data.loc[raman_data['raman'] < up_limit_cm]
16
17 max_vals = sub_data.max()
18 max_0v = max_vals.iloc[1]
19
20 ef_list = []
21
22 ef_list.append(max_vals.iloc[2]/max_0v)
23 ef_list.append(max_vals.iloc[3]/max_0v)
24 ef_list.append(max_vals.iloc[4]/max_0v)
25 ef_list.append(max_vals.iloc[5]/max_0v)
26 ef_list.append(max_vals.iloc[6]/max_0v)
27
28 final_data = {
29     'bias':[1,2,3,4,5],
30     'e_factor':ef_list
31 }
32
33 final_data = pd.DataFrame(final_data)
34
35 name_string = file_2_work.removesuffix('.txt')
36 name_string = name_string + '_' + str(shift_cm) + '.dat'
37 final_data.to_csv(name_string, '\t', index=False)

```