

Ensayo de laboratorio con arsénico

Institución de la investigación: Federal University of Uberlandia, Institute of Agricultural Sciences

Laboratorio: Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental

Investigador: Profesor Dr. Adao de Siqueira Ferreira – Microbiólogo de suelos



Resumen:

El arsénico es un metaloide muy extendido en el medio ambiente y reconocido por su alta toxicidad y su potencial carcinogénico. En los suelos agrícolas, la contaminación por arsénico puede comprometer procesos biológicos esenciales relacionados con el funcionamiento de los ecosistemas y la productividad de los cultivos. Este estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos del realgar (As_2S_4) y del trióxido de arsénico (As_2O_3) sobre indicadores microbiológicos, bioquímicos y ecológicos del suelo, así como sobre microorganismos promotores del crecimiento vegetal y la germinación de semillas de soja. Se realizaron experimentos controlados con dosis crecientes de arsénico aplicadas a suelo incubado, seguidos de la determinación de la respiración microbiana, el carbono de la biomasa microbiana, el cociente metabólico, las actividades enzimáticas y los análisis de diversidad bacteriana mediante secuenciación del gen ARNr 16S. Además, se llevaron a cabo ensayos biológicos con bacterias beneficiosas y pruebas de germinación de semillas. Los resultados mostraron que el arsénico aumentó la respiración microbiana y el cociente metabólico, acompañado de reducciones en el carbono de la biomasa microbiana y en la eficiencia de utilización del carbono, lo que indica estrés fisiológico en la microbiota del suelo. Las actividades enzimáticas, en particular la deshidrogenasa y la fosfatasa, se redujeron de manera significativa, lo que demuestra un efecto directo sobre procesos bioquímicos asociados con el ciclo de nutrientes. Los experimentos con microorganismos revelaron una alta toxicidad del As_2O_3 , siendo *Bradyrhizobium japonicum* más sensible que *Azospirillum brasilense*, lo que sugiere una posible reducción de la eficacia de los bioinoculantes microbianos en suelos contaminados. En los ensayos de germinación, se observó una reducción progresiva del porcentaje de germinación y un aumento de las anomalías morfológicas de las plántulas de soja a medida que aumentaban las dosis de arsénico. Además, el arsénico trivalente redujo la diversidad bacteriana del suelo, destacando el posible riesgo asociado con la aplicación de fertilizantes contaminados con arsénico sobre las comunidades microbianas del suelo. En general, el arsénico tiene importantes efectos negativos sobre la salud del suelo, alterando la actividad microbiana, reduciendo la biodiversidad, afectando el ciclo de nutrientes y comprometiendo el establecimiento de las plantas, lo que pone de relieve los riesgos asociados con los insumos agrícolas contaminados con arsénico.

Ensayo de laboratorio con arsénico



Introducción:

El arsénico es un metaloide muy extendido en el medio ambiente y reconocido por su alta toxicidad y su potencial carcinogénico. Los efectos tóxicos de este metaloide sobre los organismos varían según su concentración, forma química y biodisponibilidad. En los ambientes naturales, el arsénico se encuentra predominantemente en dos estados redox: la forma trivalente (As^{3+}) y la forma pentavalente (As^{5+}). Entre estas especies, el As^{3+} presenta una mayor movilidad y se considera más tóxico para los sistemas biológicos. La exposición excesiva y frecuente al As^{3+} puede provocar su acumulación en las células y, en consecuencia, favorecer la desnaturalización de proteínas y ácidos nucleicos. La contaminación del suelo por arsénico puede desencadenar una serie de efectos negativos directos sobre la funcionalidad del suelo y la composición de las comunidades microbianas. Estos efectos pueden provocar la pérdida de calidad y salud del suelo, comprometer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y generar consecuencias adversas en otros ecosistemas, incluida la fauna, como por ejemplo insectos y animales. En China, existe una preocupación significativa por la contaminación del suelo en las áreas de cultivo de arroz irrigado debido a la evidencia de que el arsénico puede acumularse en los granos de arroz y transferirse a través de distintos niveles de la cadena alimentaria. Este fenómeno se ha asociado con enfermedades en los seres humanos, incluidos varios tipos de cáncer. En Brasil, la cadena de producción agrícola utiliza diversos fertilizantes que pueden contener concentraciones significativas de arsénico. La aplicación continua de estos insumos a lo largo de los años puede aumentar la acumulación de este elemento en el suelo hasta alcanzar niveles tóxicos para la actividad microbiana y la diversidad de las comunidades microbianas. Entre los fertilizantes utilizados como fuente de boro, destaca la ulexita, ampliamente aplicada en cultivos tales como soja, café, eucalipto y hortalizas. Sin embargo, la ulexita puede contener impurezas minerales procedentes del proceso de extracción, incluidos minerales que contienen arsénico, como por ejemplo el rejalgar (As_2S_4). A pesar de este posible riesgo, siguen siendo escasos los informes sobre la toxicidad del arsénico en estos cultivos, lo que pone de relieve la necesidad de realizar estudios que evalúen los riesgos de contaminación del suelo y de transferencia a través de la cadena alimentaria en los sistemas agrícolas.

Contenido de arsénico de los fertilizantes de borato

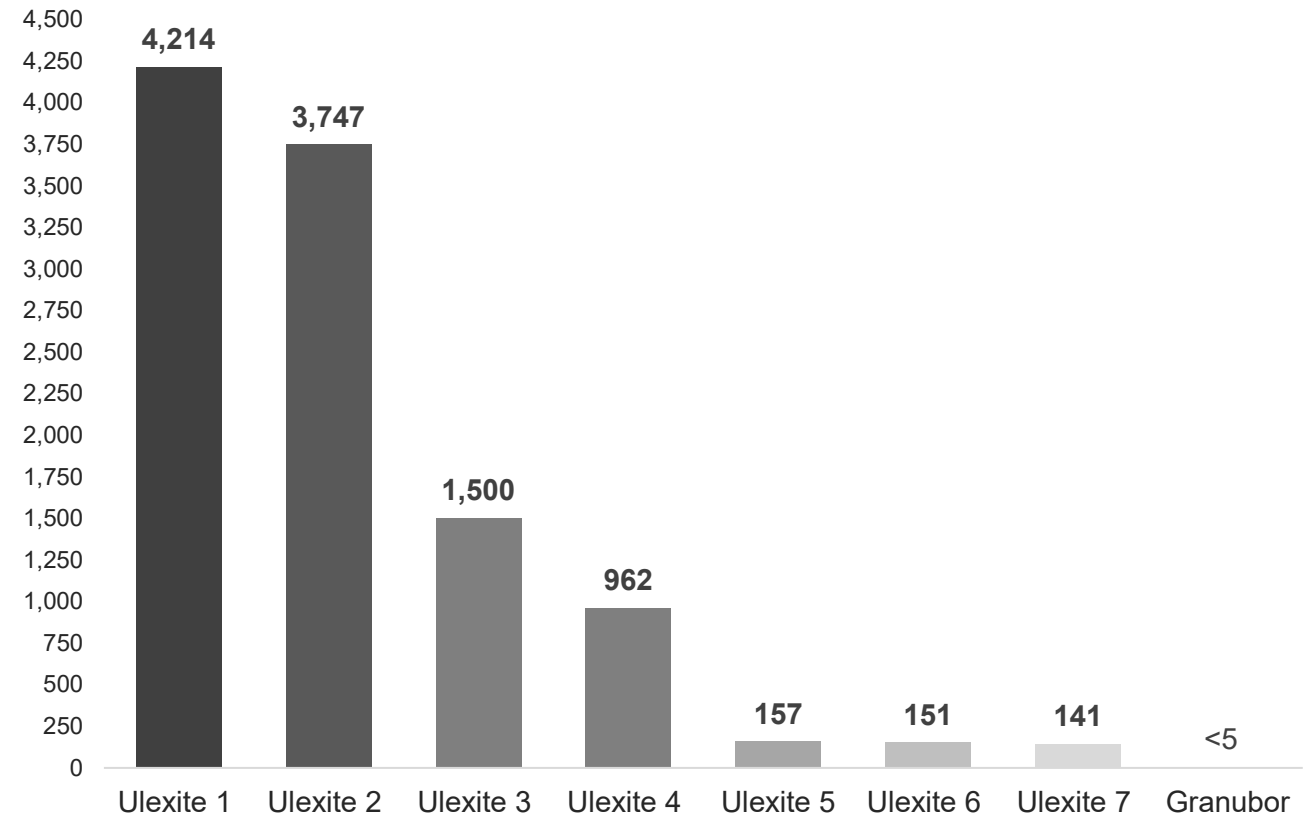


Boro (ulexita) + rejalgar (As_2S_4)



Rejalgar (As_2S_4)

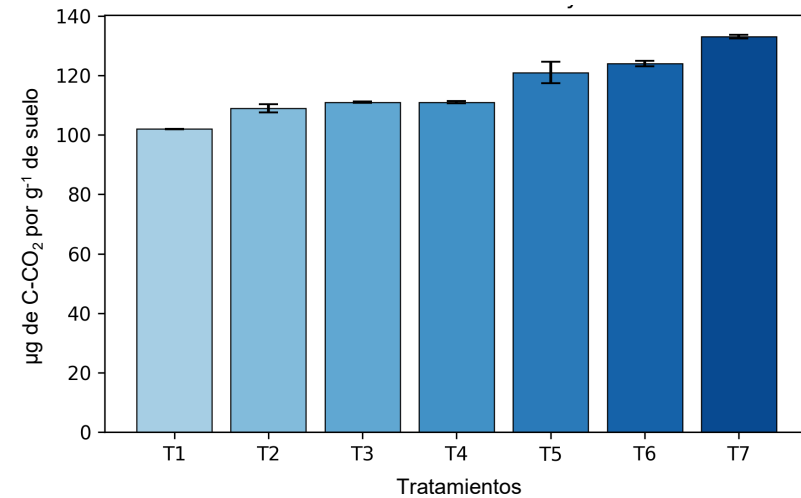
Contenido de arsénico (ppm) de los fertilizantes de boro



Fuente: Análisis de muestras realizados en los laboratorios de calidad de U.S. Borax en Boron, CA, y Denver, CO, EE. UU.; y en el laboratorio Fundação ABC en Castro, PR, Brasil.

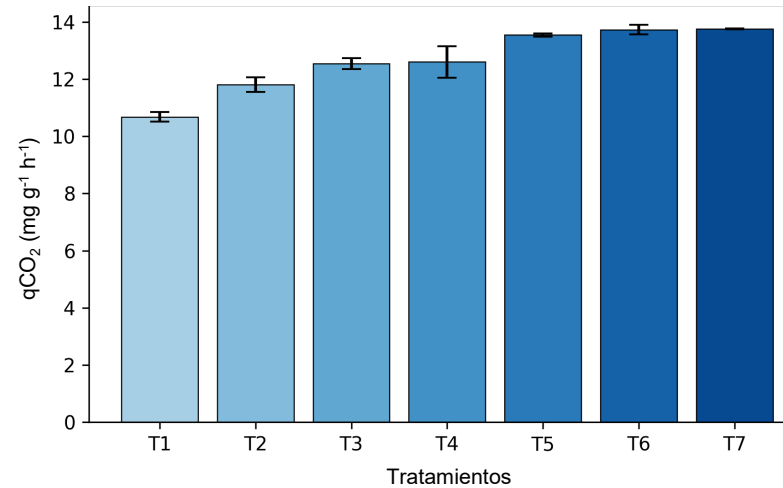
Efecto del rejalgar (sulfuro de arsénico) sobre los indicadores microbianos del suelo

Actividad microbiana del suelo



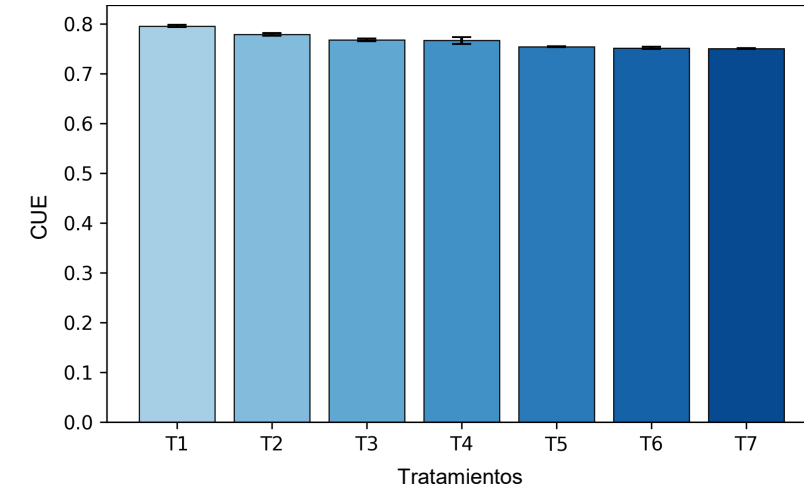
La incorporación de rejalgar al suelo aumentó de manera significativa su respiración, lo que demuestra que el As incrementa la respiración del suelo debido al efecto tóxico que tiene este elemento sobre los microorganismos.

Coeficiente metabólico del suelo



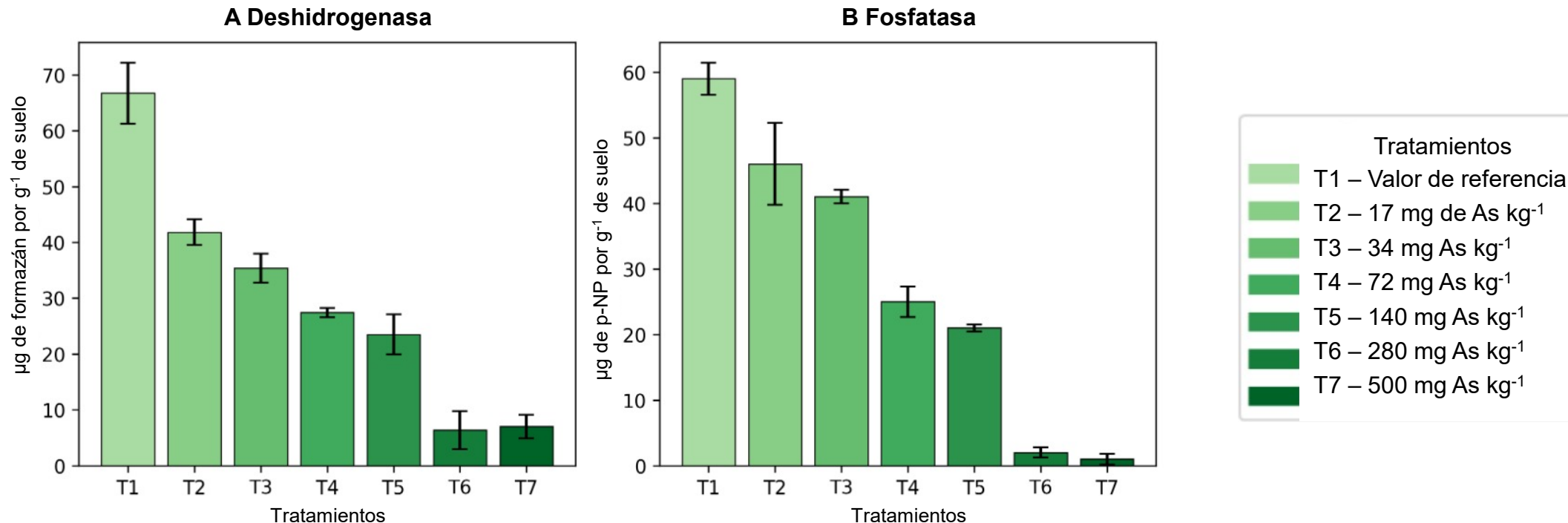
Los resultados muestran que el coeficiente metabólico del suelo (qCO₂) aumentó de manera significativa con la aplicación de rejalgar, lo que demuestra la presencia de estrés metabólico.

Eficiencia de utilización del carbono



La incorporación de rejalgar también afecta la eficiencia de utilización del carbono del suelo por parte de los microorganismos. La eficiencia de utilización del carbono del suelo también está asociada con la formación de sustancias orgánicas en el suelo, como por ejemplo los ácidos húmicos.

Efecto del rejalgar sobre la biosíntesis de enzimas del suelo por los microorganismos

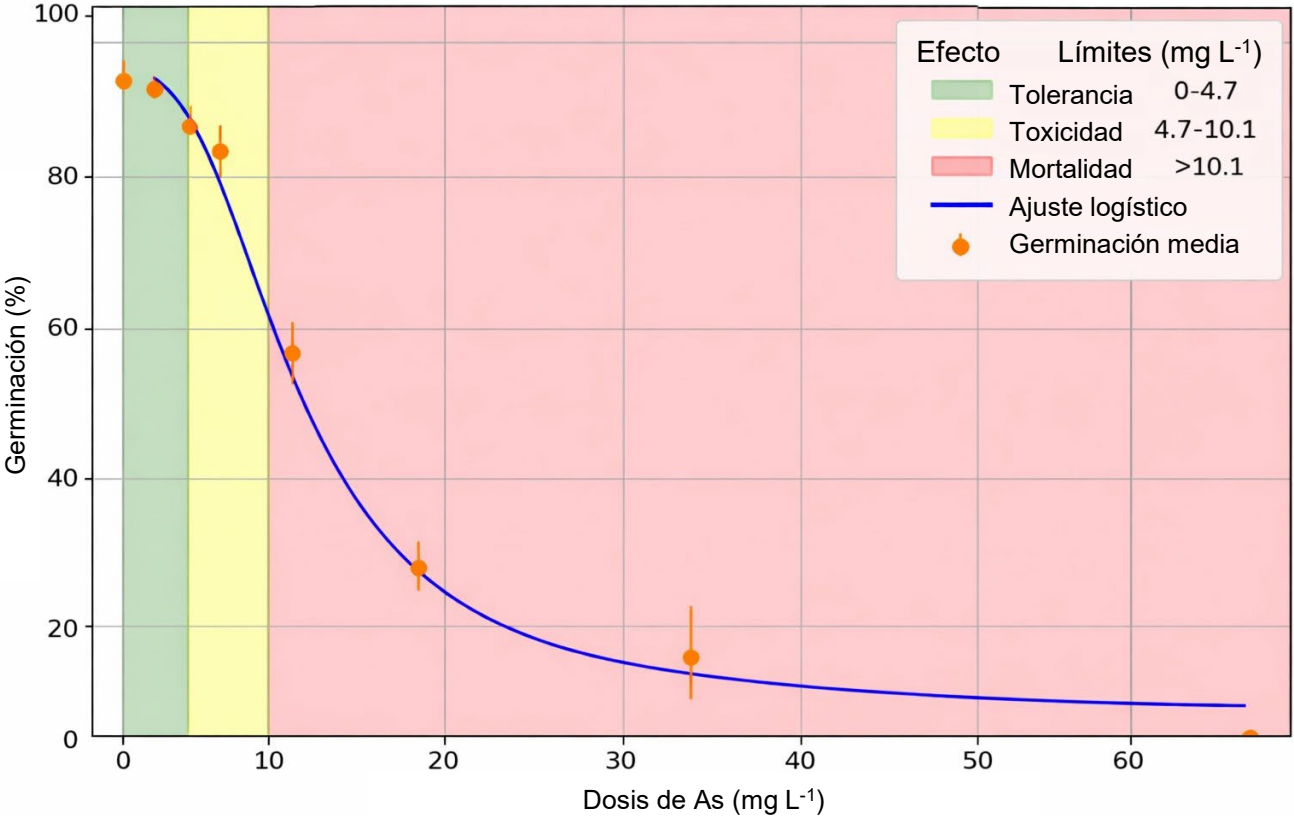


Las actividades de deshidrogenasa y fosfatasa en el suelo se evaluaron al final de un ensayo de 21 días con arsénico, utilizando rejalgar como fuente contaminante. Estas enzimas se seleccionaron porque constituyen importantes indicadores bioquímicos de las transformaciones del carbono y están directamente asociadas con el ciclo de nutrientes en el suelo.

Los resultados demostraron que la incorporación de rejalgar redujo la actividad de la deshidrogenasa en el suelo (Figura A), y que esta reducción fue proporcional a la dosis de arsénico aplicada. La disminución estimada osciló entre el 37 % y el 90 % en comparación con el tratamiento del valor de referencia con extracto de soja. Esta enzima es un importante indicador metabólico asociado con la oxidación y transformación del carbono orgánico en el suelo, ya que refleja procesos intracelulares de la microbiota. Además, la actividad de la deshidrogenasa se utiliza ampliamente como indicador de la fracción microbiana con actividad metabólica del suelo. Los resultados muestran que la incorporación de arsénico, en forma de rejalgar, afecta el metabolismo microbiano incluso con la dosis más baja aplicada ($17 \mu\text{g}$ de As por g^{-1} de suelo). La actividad de la fosfatasa (Figura B) también se vio afectada de manera significativa por la aplicación de rejalgar al suelo. Este efecto puede representar un riesgo de pérdida funcional en los procesos de mineralización y ciclo del fósforo orgánico en el suelo.

Toxicidad del trióxido de arsénico (As_2O_3) en la germinación de semillas de soja

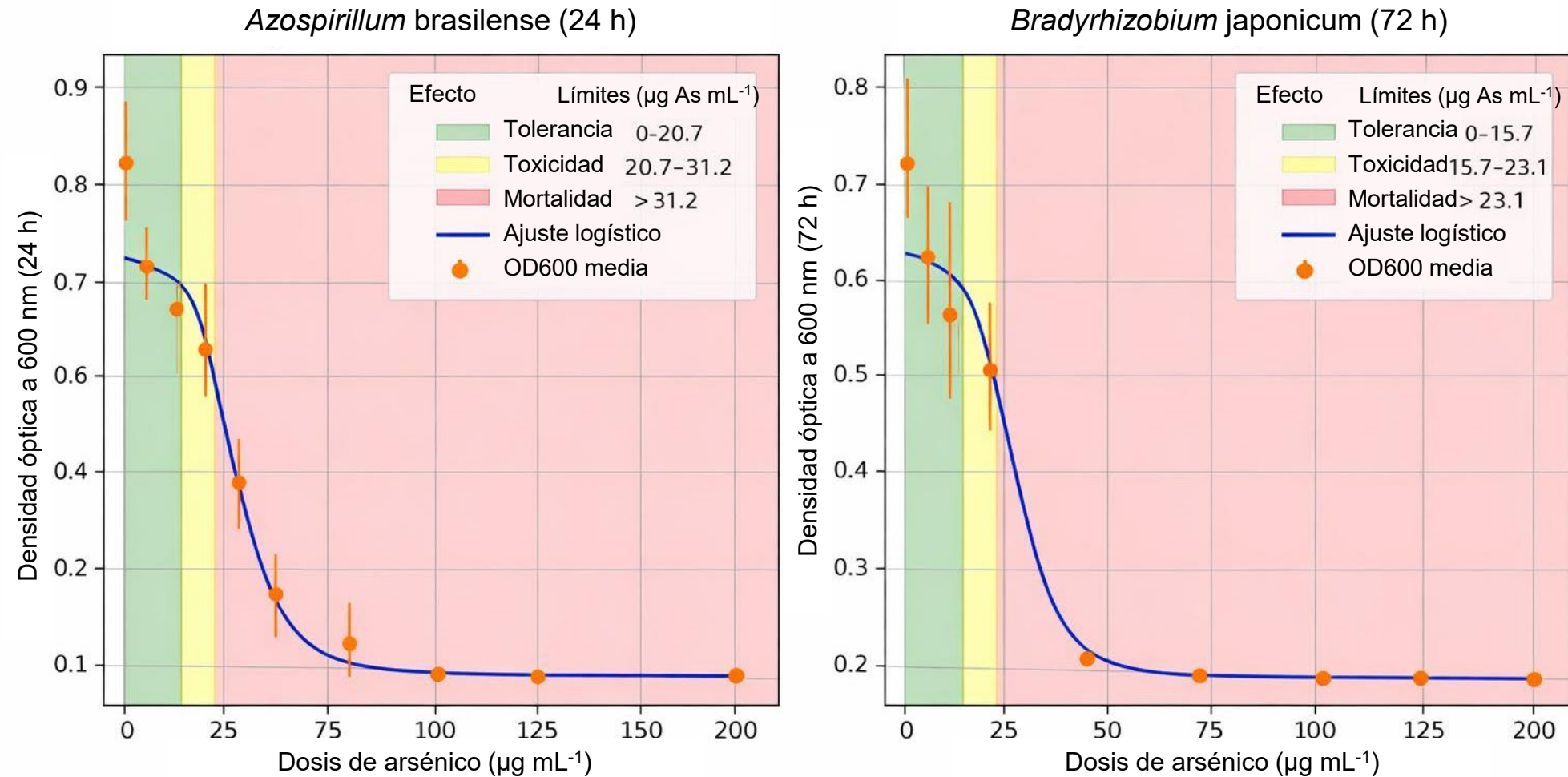
Toxicidad del As en la germinación de semillas de soja



La toxicidad del As_2O_3 sobre la germinación fue significativa y mostró una curva de respuesta típica dependiente de la dosis, lo que permitió determinar los rangos de tolerancia, toxicidad y mortalidad de las semillas. Se estimó que el límite de tolerancia al As_2O_3 corresponde a valores inferiores a 4.7 mg L⁻¹. El rango de toxicidad se situó entre 4.7 y 10.1 mg As L⁻¹ (ED50), mientras que las dosis superiores a 10.1 mg As L⁻¹ ocasionaron un marcado aumento de la mortalidad de las semillas. Además de reducir la germinación, las dosis clasificadas como tóxicas también afectaron la morfología de las plántulas, ya que promovieron anomalías significativas en el desarrollo radicular y en el eje del hipocótilo.



Toxicidad del trióxido de arsénico (As_2O_3) en *Azospirillum brasilense* y *Bradyrhizobium japonicum*



Los resultados demostraron que el As_2O_3 presentó una alta toxicidad para ambas bacterias evaluadas, ajustándose al modelo log-logístico de análisis de toxicidad. Los límites de tolerancia fueron de $20.7 \mu\text{g As mL}^{-1}$ para *A. brasilense* y de $8.2 \mu\text{g As mL}^{-1}$ para *B. japonicum*. El rango de toxicidad fue relativamente estrecho para ambas especies, y se observó mortalidad funcional por encima de $31.2 \mu\text{g As mL}^{-1}$ para *A. brasilense* y de $17.6 \mu\text{g As mL}^{-1}$ para *B. japonicum*.