



## Remoción de arsénico en aguas subterráneas con Moringa oleífera una alternativa sustentable para el tratamiento de acuíferos en Entre Ríos

Silvana Spizzo<sup>1\*</sup>, Maria Valeria Ormaechea<sup>1</sup>, Beatriz Rosalia Bot<sup>1</sup>, Helena Francisconi<sup>1</sup>,  
Agustin Chiarello<sup>1</sup>, Facundo Manuel Zaballo<sup>1</sup>

1. Facultad de Ciencias Agropecuarias-UNER

\*E-mail: [silvana.spizzo@uner.edu.ar](mailto:silvana.spizzo@uner.edu.ar)

### PALABRAS CLAVES

Arsénico  
Moringa oleífera  
Remoción

### RESUMEN

El arsénico de origen natural en aguas subterráneas de consumo es una problemática que afecta a la salud pública. Existen normativas que establecen límites regulatorios como el Código Alimentario Argentino (0,01 mg/L) y el Decreto 2235/02 (0,05 mg/L). Este estudio investigó la eficiencia de semilla de Moringa oleífera en la remoción de arsénico en dos pozos de agua de Colonia Ensayo (Acuífero Paraná). Se compararon dos tratamientos: Semilla de Moringa con cáscara (Tratamiento A) y sin cáscara (Tratamiento B). Los resultados mostraron una interacción significativa entre el tratamiento y el pozo ( $p < 0.001$ ), lo cual sugiere que la eficiencia de Moringa se ve influenciada por las características del agua. Esto también se observa en la correlación negativa ( $r = -0,87$ ) entre el porcentaje de remoción de arsénico y la concentración de bicarbonatos. Esto subraya la importancia de considerar las características del agua en el uso de harina de semillas de Moringa oleífera, la cual puede ser una buena opción sostenible y ecológica para disminuir el arsénico en aguas de consumo. Futuras investigaciones podrían enfocarse en optimizar los parámetros de aplicación de ésta en agua de diferentes características fisicoquímicas y una aplicación a mediana escala.

## Arsenic removal from groundwater using Moringa oleifera a sustainable alternative for the treatment of aquifers in Entre Ríos

### KEYWORDS

Arsenic  
Moringa oleifera  
Removal

### ABSTRACT

Naturally occurring arsenic in groundwater intended for human consumption represents a significant public health concern. Regulatory frameworks, such as the Argentine Food Code (0.01 mg/L) and Decree 2235/02 (0.05 mg/L), have established permissible limits for arsenic concentrations in drinking water. This study investigated the effectiveness of Moringa oleifera seeds in removing arsenic from two groundwater wells located in Colonia Ensayo (Paraná Aquifer). Two treatment methods were compared: Moringa seeds with seed coat (Treatment A) and without seed coat (Treatment B). The results revealed a significant interaction between the treatment type and the water source ( $p < 0.001$ ), indicating that the efficiency of Moringa is influenced by the specific characteristics of the water. This was further supported by a strong negative correlation ( $r = -0.87$ ) between arsenic removal efficiency and bicarbonate concentration. These findings highlight the importance of considering water chemistry when applying Moringa oleifera seed powder as a remediation method. Given its sustainable and eco-friendly nature, Moringa oleifera represents a promising alternative for reducing arsenic levels in drinking water. Future research should focus on optimizing application parameters for water sources with varying physicochemical characteristics and exploring the feasibility of medium-scale implementation.

## 1. Introducción

El 71 % de nuestro planeta está cubierto por agua, de este porcentaje, aproximadamente sólo el 1 % es agua dulce disponible para el consumo humano y actividades productivas ya que el resto se encuentra atrapado en glaciares, casquetes polares o en acuíferos de difícil acceso (National Geographic, 2022). Por lo tanto, el agua accesible para la vida representa una fracción limitada y valiosa, cuya disponibilidad y calidad se ven continuamente amenazadas por la contaminación derivada de actividades humanas.

El Acuífero Guaraní (AG) es la reserva de agua dulce subterránea más grande de Sudamérica y se ubica en los territorios de Argentina, Brasil, Uruguay y Paraguay (Custodio y Llamas, 2017). Este acuífero está compuesto por agua que se encuentra en poros y fisuras de areniscas cubiertas por potentes capas de basalto que las confinan. Constituye la principal fuente de suministro de agua potable para abastecimiento urbano, industrial y agrícola en el Brasil, Uruguay, Paraguay y Argentina.

En Argentina, el AG se explota principalmente en la mesopotamia para usos termales debido a su profundidad y a la presencia de capas basálticas. Por esta razón, el abastecimiento de agua potable proviene en general de acuíferos más superficiales (Aceñolaza, 2004; Bruzzzone, 2006).

Entre Ríos realiza la extracción a partir de cuatro acuíferos principales ubicados en la parte superior de la columna estratigráfica, correspondientes a sedimentos del Cuaternario y Terciario: Paraná, Ituzaingó, Salto, Chico y El Palmar. El agua subterránea es utilizada tanto para el abastecimiento de los hogares como para riego, bebida animal y uso industrial. Uno de los aspectos que hacen particularmente útil al agua subterránea para el consumo humano es la menor contaminación por microorganismos a la que está sometida y la capacidad de filtración del suelo, que la hace generalmente más pura que las aguas superficiales. No obstante, en ocasiones los parámetros fisicoquímicos exceden los límites del Código Alimentario Argentino (CAA) y en estos casos la contaminación es más difícil de eliminar. En este sentido, la presencia de arsénico (As) en agua de consumo es un problema de salud pública (Quiroga et al., 2024). La Agencia Internacional de Investigación del Cáncer categorizó a este metaloide en el grupo I, como una sustancia con comprobada

acción carcinogénica para el ser humano, sobre la base de evidencia epidemiológica (IARC, 2012).

En aguas subterráneas la presencia se debe en un 90 % del arsénico a procesos naturales y solo un 10 % proviene de actividad humana (Bhat et al., 2024). Las fuentes naturales de As están asociadas a procesos geológicos, tales como la meteorización a partir de rocas parentales o las emisiones volcánicas (Bundschuh et al., 2008).

En la actualidad, se calcula que 14 millones de habitantes en los países latinos y 4 millones en Argentina, están expuestos a niveles superiores a este límite. En nuestro país el contenido de As en aguas de consumo recién comenzó a ser abordado por los investigadores en los últimos años a pesar de haber convivido con la misma durante aproximadamente cien años (Minaverry & Cáceres, 2016). El área con mayores problemas de arsénico en sus acuíferos coincide con la llanura pampeana hasta el norte de Santa Fe y Santiago del Estero, área de mayor producción ganadera y mayor concentración de población (Villaamil, 2015). No obstante, la concentración del As en los acuíferos difiere de región en región e incluso existen grandes diferencias dentro de una misma zona, variando incluso dentro de los departamentos y/o localidades de la misma provincia (Ministerio de Salud de la Nación, 2017).

En lo que respecta a la reglamentación vigente en Argentina, la estimación de la población expuesta puede variar ya que el Código Alimentario Argentino (CAA) propone un valor límite de 0,01 mg/L para agua potable de suministro público y/o de uso domiciliario; con la salvedad de que en regiones con suelos de alto contenido de As, la autoridad sanitaria competente podrá admitir valores mayores a 0,01 mg/L con un límite máximo de 0,05 mg/L cuando la composición normal del agua de la zona y la imposibilidad de aplicar tecnologías de corrección lo hicieran necesario (Corroto et al., 2021), este es el caso de Entre Ríos, donde la legislación provincial establece (Decreto 2235/02) dicho límite en 0,05 mg/L de As.

En este contexto, cobra relevancia la búsqueda de tecnologías sustentables para el tratamiento del agua. El tratamiento de potabilización de aguas con presencia de este metal pesado es una temática de alto interés particularmente porque los métodos para extraerlo son escasos y de un alto costo. Es por ello que es necesario encontrar alternativas sustentables y sostenibles, que permitan su

remoción a un costo que pueda ser afrontado por la población en general.

Los procesos convencionales de eliminación de arsénico incluyen sedimentación asistida por químicos, coagulación y floculación, adsorción, intercambio iónico y procesos de membrana Rashid *et al.*, (2020). Una alternativa a éste tipo de procesos es el uso de coagulantes naturales.

Ghebremichael *et al.*, (2005) mencionan que las semillas de esta especie contienen proteínas catiónicas solubles en agua que actúan como agentes coagulantes naturales en el tratamiento de agua. Diferentes ensayos que han utilizado como adsorbente polvo de la semilla de *Moringa oleifera* han logrado la disminución del metaloide en agua en valores de entre 65%, y un 90% (Aguilar Diaz, 2019; Marhaini, *et al.*, 2022). En la provincia de Entre Ríos, estudios preliminares de Vallecillo *et al.*, 2024 revelaron un 55 y 75% de remoción en aguas subterráneas utilizando semillas molidas de *Moringa oleifera*.

En función de lo expuesto, el presente trabajo presenta como objetivo evaluar la eficacia de la semilla de *Moringa oleifera*, en la remoción de arsénico en aguas subterráneas de la provincia de Entre Ríos, específicamente en el acuífero Paraná. Se plantea como hipótesis que su uso podría reducir de

manera significativa la concentración del metaloide en aguas subterráneas de la región.

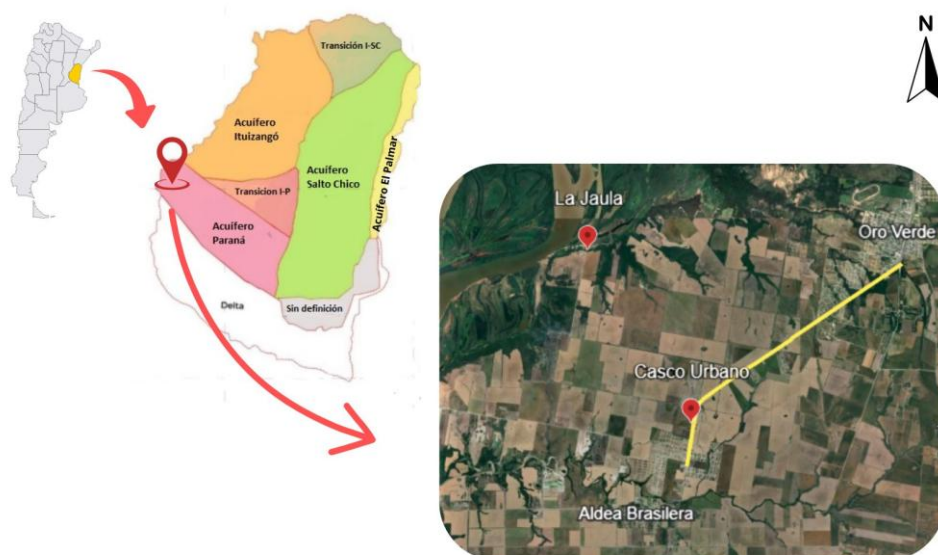
Mediante este trabajo se pretendió generar conocimiento aplicado que contribuya al desarrollo de tecnologías sustentables y accesibles para el tratamiento de agua potable en zonas con limitaciones técnicas y económicas, mejorando la calidad del recurso y reduciendo los riesgos para la salud humana y las actividades productivas locales.

## 2. Materiales y métodos

### Agua utilizada

Para evaluar la efectividad de las semillas de *Moringa oleifera* en la extracción de arsénico, se trabajó con muestras de agua subterránea de dos pozos pertenecientes al Acuífero Paraná, específicamente en la localidad de Colonia Ensayo, departamento Diamante. Con el objeto de evaluar las diferentes características fisicoquímicas del agua se muestreó un pozo del Casco Urbano (Pozo 1) con una profundidad de 15 metros y un pozo La Jaula, del área rural (Pozo 2) con una profundidad de 56 metros.

En la figura 1 pueden verse los sitios de extracción de muestras y los acuíferos a los cuales pertenecen.



**Figura 1.** Distribución de los diferentes acuíferos menos profundos de agua dulce en la Provincia de Entre Ríos. Fuente: Lorenzo M. (2024), modificado. Los marcadores rojos representan los sitios de extracción de agua subterránea para el presente estudio.

### Recolección de las muestras

Las muestras de agua se recolectaron en los dos pozos mediante bombas, en botellas de 1 litro de capacidad, se mantuvieron refrigeradas hasta llevarlas al laboratorio de aguas de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNER) para posterior análisis fisicoquímicos y aplicación de tratamientos con semillas de Moringa oleífera.

Las muestras sin tratar y tratadas fueron enviadas al laboratorio de la Cámara Arbitral de Cereales de Entre Ríos para determinar al contenido de As por espectrometría de absorción atómica con equipo

Persee 990; en todos los casos se siguió el protocolo de normas APHA-AWWA-WPCF(1992).

### Análisis realizados

Al agua sin tratar se le realizaron los análisis detallados en la Tabla 1, siguiendo técnicas normalizadas para conocer las características generales del agua y la concentración inicial de As.

A las muestras tratadas se les analizó el contenido de As, con el fin de evaluar la eficiencia de remoción del polvo de Moringa oleífera.

**Tabla 1.** Análisis de agua realizados a las muestras de agua de Colonia Ensayo y técnicas utilizadas, según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2023).

| Análisis            | Técnica utilizada                                 |
|---------------------|---|
| pH (unidades de pH) | Potenciometría 4500 H-B                           |
| Arsénico (mg/L)     | Espectrofotométrico de absorción atómica (3500 B) |
| Alcalinidad         | Método titulación (2320 B)                        |

La determinación de alcalinidad se realizó mediante el método de titulación (2320 B) según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2023), modificando la expresión del resultado que se realizó como mg/L de bicarbonato en su reemplazo de carbonato de calcio.

### Tratamientos de remoción de arsénico

Para realizar esta investigación se utilizó un diseño experimental factorial con dos factores (Tratamiento y Pozo). Para los ensayos se utilizaron semillas de Moringa oleífera, cosechada en el año 2019 para todas las pruebas realizadas. Las mismas fueron sometidas a una limpieza manual y acondicionadas en un lugar seco y fresco con una temperatura entre 13 y 18 °C para su conservación.

Para su utilización se tomaron muestras, acorde a la cantidad necesaria, según los análisis a realizar semanalmente, éstas semillas se colocaron en estufa durante 48 h a 60 °C, posteriormente a una parte de las mismas se les retiró la cáscara y se las trituró en mortero de porcelana hasta obtener una harina ligeramente fina de color blanco amarillento, aspecto grasoso y de olor característico. Las restantes fueron trituradas en mortero sin extraerles la cáscara.

De esta manera, en la Figura 2 se observa el polvo de semillas utilizado en dos tratamientos diferentes:

Tratamiento A: Semilla molida con cáscara y Tratamiento B: Semilla molida sin cáscara.



**Figura 2.** Semillas de Moringa oleífera molida. En la imagen se observa el polvo de los tratamientos A: Semilla molida con cáscara; B: Semilla molida sin cáscara.

En ambos tratamientos se realizaron cinco repeticiones. Estas tareas fueron realizadas en el laboratorio de Aguas de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNER. En todos los casos se agregó una dosis de Moringa al 1% con una agitación de 10 minutos, posteriormente se procedió al filtrado utilizando filtros Quanyt de un tamaño de poro de 28 micrómetros. Se procedió a hacer una dilución al 5, ya que en el equipo se produce espuma por algún componente que presenta la Moringa.

## Procesamiento de los datos

Una vez analizadas las muestras de agua y realizados los ensayos, los valores fueron sistematizados en tablas. El porcentaje de remoción de arsénico se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de remoción de As} = \frac{A_{\text{TOTAL}}(s/\text{tratar}) - A_{\text{en muestra tratada}}}{A_{\text{TOTAL}}(s/\text{tratar})} \times 100 \quad (1)$$

Se utilizó el test de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad y homocedasticidad de los datos. Los resultados de porcentaje de remoción de As fueron analizados mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías para determinar los efectos de los tratamientos (Tratamiento A y B), de la calidad fisicoquímica del agua (Pozos 1 y 2) y su interacción sobre la variable respuesta, el "Porcentaje de Remoción de As". En todos los casos se utilizó un nivel de significancia de  $\alpha=0,05$ .

Para todo el tratamiento estadístico se utilizó el programa Infostat en su versión libre (Rienzo et al., 2016) para realizar los análisis de correlación entre variables.

## 1. Resultados y Discusión

Las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk para los porcentajes de remoción en relación a los tratamientos y pozos presentaron una distribución

normal ( $p>0,05$ ). Sin embargo, F de igualdad de varianzas, reveló heterocedasticidad por lo que el supuesto de igualdad de varianzas no se cumple ( $p<0,05$ ). No obstante, los datos se analizaron mediante un ANOVA de dos vías ya que el mismo es bastante robusto a desviaciones moderadas de este supuesto. Dado que el diseño experimental planteado es balanceado (con igual número de repeticiones por grupo), podemos confiar razonablemente en las inferencias estadísticas derivadas.

Los resultados obtenidos del agua sin tratamiento se presentan en la tabla 2. El agua de ambos pozos se caracterizó por presentar un pH ligeramente alcalino. De acuerdo a los límites establecidos por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, (2023), el pozo 1 presentó un nivel de bicarbonato que la clasifica como, fuertemente bicarbonatada (379 ppm), en tanto el pozo 2 se clasificó como agua moderadamente bicarbonatada (283 ppm).

En cuanto al contenido de As el agua de ambos pozos reveló la presencia de As por encima de los límites establecidos por el CAA pero por debajo de la reglamentación provincial (Decreto 2235/02) mostrando valores en el Pozo 1 de 0,0448 mg/L y el Pozo 2 una concentración de 0,0353 mg/L.

**Tabla 2.** Resultado de análisis de pH, bicarbonatos y concentración de arsénico del agua del Pozo 1 (Casco Urbano) y Pozo 2 (La Jaula) en muestras de agua sin tratar.

| Muestra | pH   | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L) | As (mg/L) |
|---------|------|--------------------------------------|-----------|
| POZO 1  | 7,3  | 379                                  | 0,0448    |
| POZO 2  | 7,15 | 283                                  | 0,0353    |

Considerando que ambos se encuentran en el Acuífero Paraná, específicamente en la localidad de Colonia Ensayo, la presencia del metaloide es esperable debido a las características geológicas particulares de la unidad geomorfológica en la que se encuentran, denominada "Colinas Loésicas de Crespo" (Rodríguez, 2006).

En la tabla 3 se muestran los resultados de la concentración en ppm de As con los dos tratamientos en ambas muestras, con sus respectivos porcentajes de remoción. Los porcentajes de remoción hallados en ambos pozos superaron los reportados por Vallecillo et al., (2024) en el área de Colonia Ensayo. Estos autores lograron remover el 55 y 27 % del As utilizando polvo de

Moringa oleífera con y sin cáscara, respectivamente. En el mismo estudio, se menciona haber removido un 70 y 86 % del metaloide en agua subterránea extraída de la localidad de Feliciano.

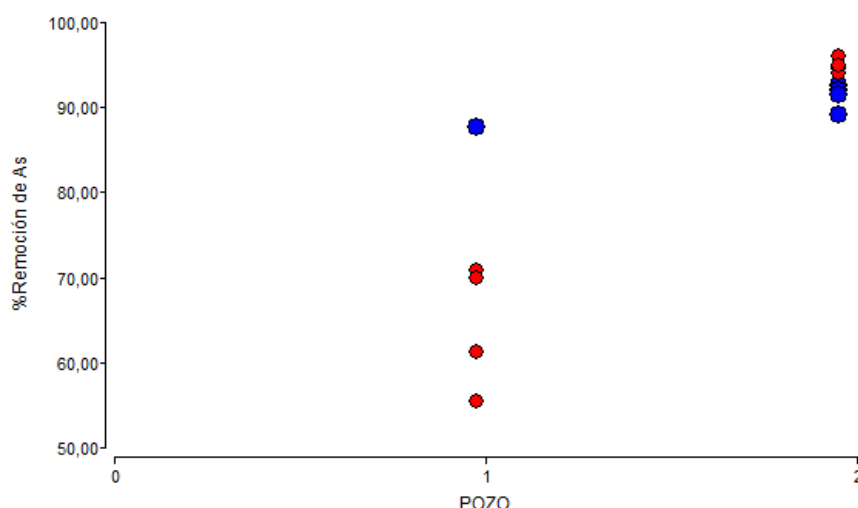
En la figura 5 se muestra el gráfico de dispersión de los datos. El tratamiento A en todas sus repeticiones en el pozo 1 obtuvo el mismo % de remoción de arsénico (87,7 %), mientras que en el pozo 2 el mismo tratamiento presentó valores superiores (entre 89,2 y 92,1 %).

El tratamiento B en agua del pozo 1 presentó una menor remoción de As (entre 55,4 y el 70,8 %) en comparación al Pozo 2 (entre 94,1 y 96 %).



**Tabla 3.** Concentración (ppm) de As y % de remoción obtenido con ambos tratamientos para los dos pozos evaluados.

| POZO 1               |          |            | POZO 2               |          |            |
|----------------------|----------|------------|----------------------|----------|------------|
|                      | As (ppm) | % Remoción |                      | As (ppm) | % Remoción |
| <b>Valor inicial</b> | 0,0448   | -          | <b>Valor inicial</b> | 0,0353   | -          |
| Tratamiento A        | 0,0055   | 87,7       | Tratamiento A        | 0,0026   | 92,6       |
| Tratamiento A        | 0,0055   | 87,7       | Tratamiento A        | 0,003    | 91,5       |
| Tratamiento A        | 0,0055   | 87,7       | Tratamiento A        | 0,0028   | 92,1       |
| Tratamiento A        | 0,0055   | 87,7       | Tratamiento A        | 0,0038   | 89,2       |
| Tratamiento A        | 0,0055   | 87,7       | Tratamiento A        | 0,003    | 91,5       |
| <b>Tratamiento B</b> | 0,0174   | 61,2       | <b>Tratamiento B</b> | 0,0019   | 94,6       |
| <b>Tratamiento B</b> | 0,0131   | 70,8       | <b>Tratamiento B</b> | 0,0021   | 94,1       |
| <b>Tratamiento B</b> | 0,0131   | 70,8       | <b>Tratamiento B</b> | 0,0018   | 94,9       |
| <b>Tratamiento B</b> | 0,0135   | 69,9       | <b>Tratamiento B</b> | 0,0014   | 96,0       |
| <b>Tratamiento B</b> | 0,02     | 55,4       | <b>Tratamiento B</b> | 0,0018   | 94,9       |



**Figura 5.** Distribución de los porcentajes de remoción de arsénico obtenida en agua del Pozo 1: Casco urbano y Pozo 2: área rural. Los círculos azules corresponden al tratamiento A: polvo de Moringa oleífera con cáscara y los círculos rojos al tratamiento B: polvo de Moringa oleífera sin cáscara.

Esto se refleja en el análisis estadístico de los porcentajes de remoción de As en los diferentes Pozos y para cada tratamiento (Tabla 4). Se observó que el Tratamiento A alcanzó un promedio de remoción de As superior (89,74 %) y menor variabilidad ( $DE= 2,15$ ) comparado con el Tratamiento B (80,26 %;  $DE=16,13$ ). Asimismo, el Pozo 2 mostró un porcentaje de remoción promedio más alto (93,14 %) y con menor dispersión ( $DE= 2,10$ ) en sus datos que el Pozo 1.

La tabla 5 muestra el análisis ANOVA de dos vías donde se encontró un efecto estadísticamente significativo del "Tratamiento" sobre el porcentaje de remoción de As ( $F=33,66$ ,  $p<0,001$ ). Asimismo, el análisis mostró un efecto estadísticamente significativo entre los Pozos ( $F = 106,14$ ,  $p < 0,001$ ), lo cual indicaría que la calidad de agua influye notablemente en la remoción de As.

**Tabla 4.** Estadísticas descriptivas del porcentaje de remoción para cada nivel de tratamiento y pozo.

| Factor      | Nivel         | Media ( $\bar{X}$ ) | Desviación Estándar (DE) |
|-------------|---------------|---------------------|--------------------------|
| Tratamiento | Tratamiento A | 89,74               | 2,15                     |
|             | Tratamiento B | 80,26               | 16,13                    |
| Pozo        | Pozo 1        | 75,43               | 12,65                    |
|             | Pozo 2        | 93,14               | 2,10                     |

**Tabla 5.** Análisis ANOVA de dos vías realizado para el análisis del efecto del Tratamiento y el Pozo en el % de remoción de As.

| Fuente de Variación | Suma de Cuadrados (SC) | Grados de Libertad (gl) | Valor F | P-valor (p) |
|---------------------|------------------------|-------------------------|---------|-------------|
| Tratamiento         | 430,59                 | 1                       | 33,66   | <0,001      |
| Pozo                | 1357,95                | 1                       | 106,14  | <0,001      |
| Tratamiento x Pozo  | 819,20                 | 1                       | 64,03   | <0,001      |
| Residual            | 204,70                 | 16                      |         |             |

Este efecto también puede observarse en la interacción estadísticamente significativa entre el "Tratamiento" y el "Pozo" ( $F=64,03$ ,  $p<0,001$ ). Esto indicaría que, si bien existe un efecto entre el tratamiento aplicado en el porcentaje de remoción de As, el mismo no es constante entre los pozos, lo que permite deducir que la eficiencia de remoción de As depende de las características específicas del agua de los pozos a tratar.

Para conocer con mayor profundidad las diferencias halladas se aplicaron las pruebas post-hoc de Tukey HSD con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  se encontró que pese a existir significancia estadística en el efecto principal del tratamiento empleado, no existe diferencia a nivel global entre los tratamientos A y B. En relación a la calidad de agua, representada por la variable "Pozo" se confirmó que existe diferencia significativa en los porcentajes de remoción de As en el Pozo 1 y el Pozo 2, siendo este último significativamente más eficiente.

Asimismo, al correlacionar los porcentajes de remoción de As con el contenido de bicarbonatos utilizando el coeficiente de correlación de Spearman éste reveló una fuerte correlación negativa ( $r=-0,87$ ) entre ambas variables.

Estos resultados son consistentes con lo planteado por Smedley & Kinniburgh, (2002); John, et al., (2018) y Chou et al., (2025) quienes mencionan que en aguas, levemente alcalinas o alcalinas y con mayor contenido de bicarbonatos disminuye la eficiencia de remoción del As en materiales adsorbentes, debido a la competencia de éstos aniones por los sitios de adsorción en los óxidos de aluminio y hierro.

Esta competencia en los sitios de adsorción es particularmente relevante considerando que el arsénico en aguas subterráneas se encuentra principalmente como arseniato ácido o diácido (As V), cuando las condiciones son oxidantes. En condiciones reductoras predomina en forma de arsenito (As III) o en formas menos cargadas o incluso neutras. Tanto el As V como el As III pueden ser adsorbidos en los óxidos de hierro y aluminio presentes naturalmente en los suelos, sedimentos o en materiales adsorbentes de origen natural como lo es el polvo de semillas de *Moringa oleifera*.

## 2. Conclusiones

Este estudio demuestra que tanto el tipo de tratamiento como las características fisicoquímicas

del agua de cada pozo influyen en el porcentaje de remoción de arsénico. Asimismo, los resultados muestran que el polvo de semilla de Moringa presenta buena eficiencia para adsorber el metaloide en aguas subterráneas, sin embargo, deben considerarse las características de pH y bicarbonatos para decidir utilizar semillas con cáscara y sin cáscara. Esto implica que la elección del tratamiento óptimo para la remoción de arsénico no puede hacerse de forma generalizada, sino que debe considerarse en el contexto de las condiciones específicas de cada pozo.

Este estudio no solo profundiza en la comprensión de los factores que influyen la eficiencia de la remoción de arsénico mediante el uso de Moringa oleifera, sino que también aporta conocimiento de gran impacto al desarrollo de tecnologías de tratamiento de agua sustentables y accesibles.

### 3. Referencias

- Aceñolaza, F. G. (2004). Paleobiogeografía de la región mesopotámica. Temas de la biodiversidad del litoral fluvial argentino (Miscelánea INSUGEO 12, pp. 25–30). Tucumán: INSUGEO.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2023). Standard methods for the examination of water and wastewater (24th ed.).
- Bhat, A., Ravi, K., Tian, F., & Singh, B. (2024). Arsenic contamination needs serious attention: An opinion and global scenario. *Pollutants*, 4(2), 196–211. <https://doi.org/10.3390/pollutants4020013>
- Bruzzzone, E. M. (2006). El agua potable – Nuevo recurso estratégico del siglo XXI: El caso particular del acuífero Guaraní. Realidad Económica, (204). Instituto Argentino para el Desarrollo Económico. <https://iade.org.ar/noticias/el-agua-potable-nuevo-recurso-estrategico-del-siglo-xxi-el-caso-particular-del-acuifero>
- Bundschuh, J., Armienta, M. A., Birkle, P., et al. (2008). Natural arsenic in groundwaters of Latin America. CRC Press.
- Chou, P. I., Wu, X., Gao, Z., Zhu, Y., & Jun, Y.-S. (2025). Bicarbonate concentrations affect arsenic release from arsenopyrite and nanoscale iron(III) (hydr)oxide formation: importance of unconfined aquifer carbonate chemistry. *Environmental Science: Nano*, 12, 3047–3060.
- Corroto, C., Iriel, A., Fernández-Cirelli, A., & Pérez-Carrera, A. L. (2021, junio). Metodologías de remoción de arsénico y flúor y su aplicabilidad en el mejoramiento de la calidad del agua destinada a producción pecuaria [Revisión bibliográfica]. *InVet*, 23(1), artículo 9. Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires. <https://www.fvet.uba.ar/archivos/publicaciones/invet/vol23-1-2021/art9/index.html>
- Custodio, E., & Llamas, R. (2017). El Acuífero Guaraní: la mayor reserva de agua subterránea de Sudamérica. *Revista de Hidrogeología*, 25(2), 45–58.
- Decreto N.º 2235/02. (2002) Valores Guía para la Calidad del Agua Potable y de Efluentes Cloacales (Anexo I). Gobierno de la Provincia de Entre Ríos.
- Ghebremichael, K. A., Gunaratna, K. R., Henriksson, H., Brumer, H., & Dalhammar, G. (2005). A simple purification and activity assay of the coagulant protein from Moringa oleifera seed. *Water Research*, 39(11), 2338–2344. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.012>
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2012). Arsenic, metals, fibres, and dusts (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Hazards to Humans, Vol. 100C). Lyon, France: International Agency for Research on Cancer.
- John, Y. J., Emery, D. V., & Daniel, M. (2018). A comparative study on removal of hazardous anions from water by adsorption: a review. *International Journal of Chemical Engineering*, 2018, 1–21.
- Lorenzo, M. (2024, 30 de abril). Las aguas subterráneas, un tesoro escondido. WordPress. <https://marcelolorenzo.wordpress.com/2024/04/30/las-aguas-subterranas-un-tesoro-escondido/>
- Marhaini, ., Legiso, ., & Mutiara, . (2022). The utilization of moringa (Moringa



- oleifera) seed powder as a biocoagulant and flocculant in wastewater treatment coal mining industry. *International Journal of Advanced Chemistry*, 10(1), 36–39.  
<https://doi.org/10.14419/ijac.v10i1.32068>
- Minaverry, C. M., & Cáceres, V. L. (2016). La problemática del arsénico en el servicio de agua en la provincia de Buenos Aires, Argentina: análisis de casos jurisprudenciales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(1), 69–76.
- National Geographic. (2022). Clean Water Crisis Facts and Information. Recuperado el 23 de junio de 2025, de National Geographic.
- Quiroga, A. M., Colussi, C. L., Odetti, L. M., Loteste, A. E., Paonessa, A. M., Mastandrea, C. R., Grigolato, R. A., Poletta, G. L., Sigrist, M., & Simoniello, M. F. (2024). Evaluation of oxidative damage and genotoxicity in populations exposed to arsenic in drinking water from Santa Fe province, Argentina. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 897, 503787.  
<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2024.503787>
- Rashid, E. E. U., Saini-Eidukat, B., & Bezbaruah, A. N. (2020). Modeling arsenic removal using zero-valent iron nanoparticles. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1–7.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-8075-y>
- Rodríguez, J. J. (2006). Estudio sedimentológico y mineralógico del loess en perfiles de la Formación Tezanos Pinto (Pleistoceno tardío-Holoceno temprano), provincia de Entre Ríos [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional CONICET Digital.  
<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/1093>
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517–568.
- [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Vallecillo, S. M., Ormaechea, M. V., Dragán, A. N., Spizzo, S. R., Trossero, J. A., Mugherli Bohl, F., Della Giustina, Z., & Perusset, A. (2024). Evaluación de la capacidad de mejora de parámetros de calidad de aguas superficiales, subterráneas y residuales mediante el uso de semillas de Moringa oleifera. *Ciencia, Docencia y Tecnología Suplemento*, 14(16).  
<https://pcient.uner.edu.ar/index.php/Scdyt/article/view/1922>
- Villaamil Lepori, E. C. (2015). Hidroarsenicismo crónico regional endémico en Argentina. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 49(1), 83–104. Recuperado el 23 de junio de 2025, de SciELO.