

# Aplicaciones SIG a la representación de la Distribución Espacial de Valores de Concentración de Arsénico en Aguas Subterráneas

Prieto Villarroya, Jorge<sup>1,2</sup>; Moyano, Miguel Ángel<sup>3</sup>; Carreras, Rocío<sup>1</sup>; Farias, Héctor Daniel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Estudios Ambientales y Desarrollo Rural de la Llanura Chaqueña, Universidad Nacional de Santiago del Estero

<sup>2</sup> Instituto de Recursos Hídricos IRHi. FCEyT - UNSE

<sup>3</sup> MAAySP – Secretaría de Recursos Hídricos. Provincia de Córdoba

Contactos: [jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar](mailto:jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar) (1)

## RESUMEN

El presente trabajo muestra la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica, y más específicamente de las técnicas de interpolación espacial, a la representación territorial de la distribución espacial de valores de concentración natural de arsénico en aguas subterráneas de las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Córdoba.

En el trabajo se indican las características de la información empleada, y se describe el método empleado (Kriging).

Como resultado se elaboraron mapas con la zonificación espacial de concentraciones de arsénico en tres estratos de profundidad (menor de 30 m, desde 30 hasta 80 m y más de 80 m) y cinco categorías o niveles (> 10 ug/l, 10 – 30 ug/l, 30 – 50 ug/l, 50 – 100 ug/l, > 100 ug/l) y se obtuvieron representaciones de aproximación a la impronta territorial en el espacio geográfico interprovincial a partir de datos de niveles puntuales de concentración de arsénico en aguas naturales.

Palabras clave: Hidroarsenicismo, Geoestadística, Hidrología Subterránea

## 1. Introducción

Garantizar la accesibilidad a recursos hídricos, adecuados en cuanto a calidad, cantidad y disponibilidad para la población, constituye uno de los principales factores condicionantes para asegurar el desarrollo socio-económico de la población.

En este sentido, la región de Santiago del Estero padece históricamente dos problemas característicos, que en ocasiones se potencian entre sí, como son (1) la escasez de disponibilidad de agua y (2) la presencia de agua contaminada con elementos perjudiciales para la salud como es el caso del arsénico (As).

El Arsénico, representa uno de los principales contaminantes que se encuentra en los acuíferos de algunas regiones de la provincia, pudiendo llegar al agua por vía natural (desintegración y lixiviación de rocas procesos geoquímicos naturales) o por vía antropogénica (actividad de minería, productos plaguicidas, conservantes de madera).

La ingesta continuada de agua con sales de arsénico por un espacio de tiempo prolongado (crónico), que afecta a gran parte de la población (endémico) de una región (regional), deriva en la enfermedad conocida como HACRE (Hidro-arsenicismo Crónico Regional Endémico), caracterizada por la aparición, tras años de consumo, de lesiones características en piel y alteraciones sistémicas cancerosas y no cancerosas.

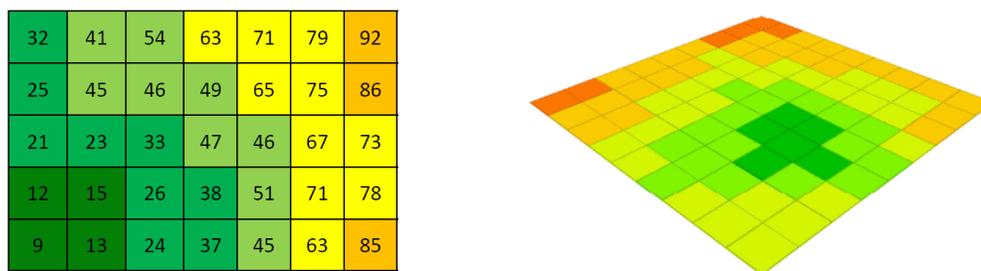
La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un valor guía de 10 µg/l que propone para el arsénico en aguas de consumo humano, si bien reconoce que este puede estar sobreestimando el riesgo real. En base a ello, el límite vigente actual para el parámetro arsénico en aguas de consumo humano en el Código Alimentario Argentino (CAA) es de 50 µg/l.

El tratamiento de aguas contaminadas con arsénico para consumo humano es un problema de difícil solución, sobre todo en poblaciones rurales dispersas o de baja densidad. Los principales factores limitantes son los costos de acceso a la tecnología, la complejidad de operación y la aceptabilidad social, en un contexto de herencia y creencias populares.

Es por ello, por lo que en este contexto resulta de especial importancia la generación de cartografía temática específica que permita realizar una caracterización territorial basada en la concentración de arsénico, para que a partir de ellas pueda zonificarse el territorio y priorizar posibles líneas de actuación.

## 2. Materiales

Se define como Modelo Digital del Terreno a la representación espacial de una variable cuantitativa y continua sobre una superficie bidimensional XY, por medio de un conjunto de valores Z. El término, tiene aparentemente su origen en el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachussetts, en la década de los años 50. En el trabajo pionero de Miller y Laflamme (1958) se establecen ya los primeros principios del uso de los modelos digitales para el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares. La definición del MDT que se menciona en sus trabajos es "una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas (x, y, z) conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario" (Felicísimo, Ángel M)



**Fig. 1.** Definición conceptual de un Modelo Digital del terreno

Un modelo digital del terreno consiste en una malla rectangular de celdillas cuadradas o píxeles. Cada uno de los píxeles tiene asignado un valor numérico. Este número, es el utilizado para la modelización de un aspecto concreto del medio. El valor Z, puede corresponder a diferentes variables como puede ser la temperatura, cota, precipitación, concentración de un contaminante, etc... en el caso del presente documento, el valor de la variable Z del MDT corresponde a Concentración de Arsénico.

La cartografía se ha elaborado en base a información de valores naturales de arsénico en las Provincias de Chaco, Santiago del Estero y Córdoba. Con la totalidad de la información disponible se ha elaborado una Base de Datos alfanumérica con los siguientes contenidos:

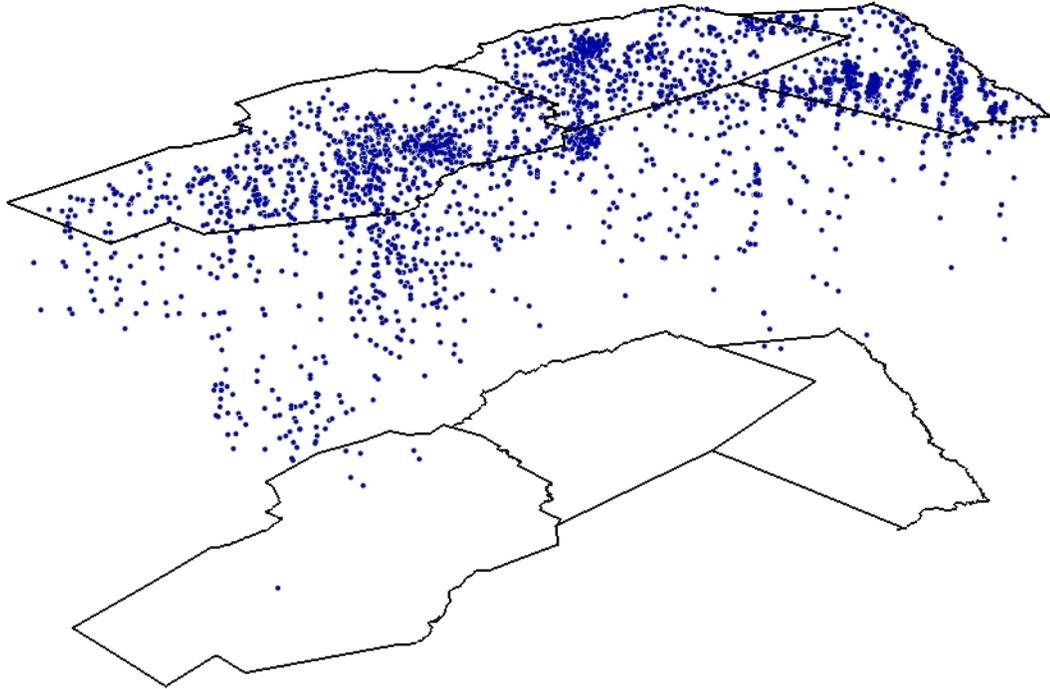
- ID: Código identificador alfanumérico
- X: Coordenada X representada en el Sistema Posgar 94, Faja 4.
- Y: Coordenada Y representada en el Sistema Posgar 94, Faja 4.
- Z: Profundidad del pozo en el que se ha tomado la muestra (m)
- As: Valor de Concentración de Arsénico expresado ug/l
- DATO: Organismo de la administración pública en la que se originó el dato
- PROV: Provincia en la que se encuentra situado el dato.

La información, de carácter puntual, procede de un total de 2.858 datos de pozos y perforaciones, con la siguiente distribución por provincias:

**Tabla 1.** Distribución de la información espacial según provincia y estrato de profundidad (P)

Provincia	$P \leq 30 \text{ m}$	$30 \text{ m} < P \leq 80 \text{ m}$	$P > 80 \text{ m}$	Subtotal	Provincia
<b>S. ESTERO</b>	329	111	261	701	24,5 %
<b>CHACO</b>	756	105	116	977	34,2 %
<b>CÓRDOBA</b>	396	335	449	1.180	41,3 %
<b>Subtotal</b>	1.481	551	826	2.858	(100%)
<b>Profundidad</b>	51,8 %	19,3 %	28,9 %	(100%)	

Como consecuencia de la disponibilidad de información anterior, se muestra la representación 3D de la información disponible, en las tres provincias analizadas, y representando la profundidad e Z de cada uno de los valores



**Fig. 2.** Representación 3D de la base de datos utilizada

### 3. Metodología

El procedimiento metodológico seguido ha sido desarrollado para el trabajo “*Impronta Territorial del Arsénico en el Espacio Geográfico Chaco-Santiagoño-Cordobés*” (Moyano, 2018) presentado en el XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología. Se denomina interpolación a la obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto discreto de punto. La interpolación predice valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Puede utilizarse para predecir valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, tales como: elevación, precipitaciones, concentraciones químicas, niveles de ruido. En el caso del presente informe, los valores interpolados corresponden a valores Naturales de Concentración de Arsénico.

Para ello, se ha procedido al análisis y valoración de los datos obtenidos y al cálculo de estadísticos integradores para cada el conjunto de las ubicaciones medidas.

La utilización de modelos matemáticos da como resultado mapas en los que se obtiene el valor de concentración natural de arsénico, a diferentes profundidades de la zona estudiada.

El fundamento estadístico de la interpolación realizada se basa en las pautas marcadas por los manuales de referencia técnica de ESRI Environmental Systems Research Institute <https://desktop.arcgis.com>

En estadística la interpolación es usada para estimar valores desconocidos a partir de una serie de datos conocidos y ponderados. Cada técnica busca determinar una

función que represente adecuadamente el fenómeno bajo estudio y así disminuir la cantidad de información a recolectar en campo.

Existen varias técnicas o métodos diferentes de interpolación espacial (Spline, Inverso del Cuadrado de la Distancia IDW, Kriging, etc....),

Las herramientas de interpolación IDW (Distancia inversa ponderada) y Spline son consideradas métodos de interpolación determinísticos porque están basados directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante.

Hay una segunda familia de métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como kriging, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

Tras una fase de pruebas, ensayos preliminares y testeos, se optó en el presente trabajo, por la elección del Método de Kriging como el más adecuado, por ser el método que mejores resultados ofrece en cuanto a error cuadrático medio EMC, unido a la opinión de expertos en hidrogeología consultados, que visualmente consideraban que la delimitación por zonas obtenidas con Kriging representaba mayor similitud con los valores regionales de distribución espacial de arsénico en base a su conocimiento de la región.

Los métodos de "Kriging" (o kriging), se encuentran respaldados por modelos matemáticos y estadísticos. Por ello, debido a su componente estadístico, incluyen un análisis de probabilidad. Debido a la componente probabilística, los valores no son completamente predecibles, de modo que las predicciones se encuentran asociadas al posible error asociado a la predicción.

El método de Kriging se basa en la autocorrelación espacial de las variables (no debe confundirse con el término correlación) es decir, la correlación de una variable con ella misma. Kriging es un estimador lineal insesgado que busca generar superficies continuas a partir de puntos discretos. Asume que la media, aunque desconocida, es constante y que las variables son estacionarias y no tienen tendencias. Permite transformación de los datos, eliminación de tendencias y proporciona medidas de error. Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación.

La fórmula general es:

$$Z(S) = \mu(S) + \varepsilon(S) \quad (1)$$

En el cual  $Z(S)$  es la variable de interés,  $\mu(S)$  es una constante desconocida,  $\varepsilon(S)$  son errores aleatorios de estimación y  $S$  son coordenadas espaciales  $(x, y)$ .

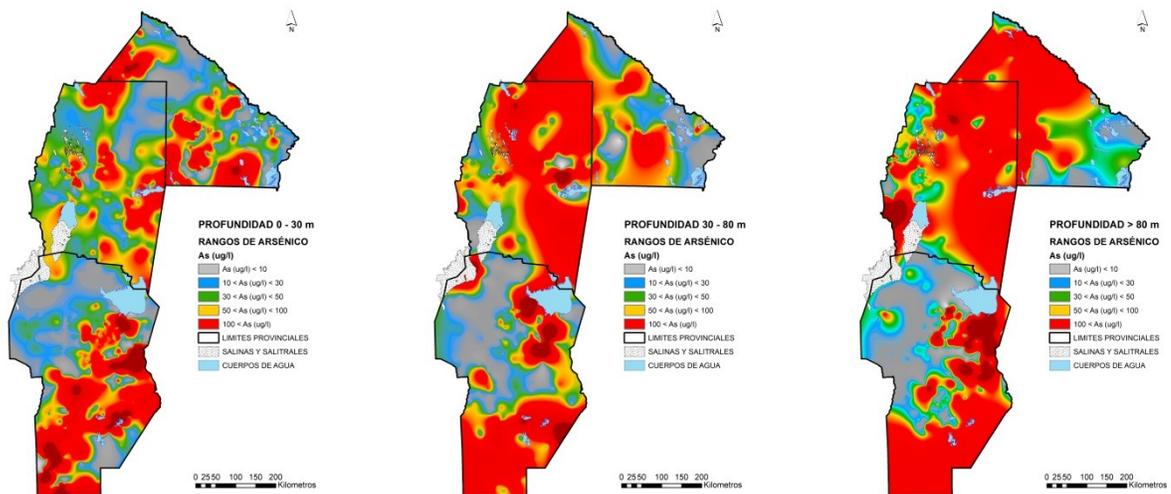
En función de lo anterior, el método considera que la predicción del valor de un punto está dada por la siguiente expresión:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i) \quad (2)$$

En el cual  $Z(S_0)$  es el valor predicho,  $\lambda_i$  es el peso de cada valor observado y  $Z(S_i)$  es el valor medido en un lugar.

#### 4. Resultados y conclusiones

La metodología aplicada permitió generar una superficie representando la distribución espacial del arsénico en las provincias de Chaco, Santiago del Estero y Córdoba, mediante una superficie continua que incorpora las propiedades estadísticas de los datos muestrales empleados.



**Fig. 3.** Distribución espacial de arsénico en el estrato de profundidad <math>< 30\text{ m}</math> (izquierda), desde <math>30\text{ a }80\text{ m}</math> (centro), y mayor de <math>30\text{ m}</math> de profundidad (derecha)

#### Referencias

Miguel A. Moyano; Delia Vera; Laura Noguera; Alfredo Martín; Claudia García; Jorge P. Villarroja; Dagni Schneider; Oriel Romero. (2018). Impronta territorial del arsénico en el espacio geográfico Chaco – Santiagueño – Cordobés. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología

ESRI *Environmental Systems Research* Institute. Vista General del Conjunto de Herramientas de Interpolación Ráster.

<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/kriging.htm>