

Distribución y origen de la presencia de nitrato en el sistema acuífero de la cuenca del Río Moche - Región de La Libertad (Perú)

Nitrate origin and spatial distribution in the aquifer of Río Moche - Libertad Region (Peru)

*Albert Folch Sancho¹, Milton Huanes Mariños², Joan Bach¹,
Josep Mas-Pla³, Víctor Campos Hernández²*

RESUMEN

El acuífero del río Moche, en torno a la ciudad de Trujillo en la región de La Libertad (Perú) ha sufrido una fuerte transformación de su dinámica hidrogeológica a causa de las aportaciones para uso agrícola de las aguas trasvasadas por el proyecto CHAVIMOCHIC. En este estudio se describen las modificaciones ocasionadas en el nivel freático, las consecuencias en la calidad de las aguas y, concretamente, en la contaminación nitrato. Los valores de nitrato son inferiores a 30 mg/L, por lo que no superan los umbrales definidos en la legislación europea para este tipo de polución, y su distribución espacial sugiere que su procedencia es de origen urbano.

Palabras clave: Agua subterránea, nitrato, acuíferos litorales, CHAVIMOCHIC, Trujillo, Perú.

ABSTRACT

Hydrogeological dynamics in the Río Moche aquifer, nearby Trujillo in the Libertad region (Peru) has been modified by water transfer from the CHAVIMOCHIC Project, that has promoted the use of surface water instead of groundwater resources in agriculture. This study describes changes on the water table level and on groundwater quality, in particular, on nitrate pollution, related to the new hydrological scenario. Nitrate values are below 30 mg/L, which is in agreement with concentration thresholds defined by European directives, and its spatial distribution attributes its occurrence to urban pollution.

Key words: Groundwater nitrate, coastal aquifers, CHAVIMOCHIC, Trujillo, Peru.

¹ Unitat de Geodinàmica Externa i Hidrogeologia, Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, España.

² Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú.

³ Centre de Recerca en Geologia i Cartografia Ambiental, i Àrea de Geodinàmica, Universitat de Girona, 17071. Girona, España.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la investigación hidrogeológica en la costa peruana se ha centrado en los problemas de la calidad del agua subterránea (Tovar-Pacheco *et al.*, 2006). En la mayoría de los casos no se trata únicamente de ubicar los recursos de agua, sino también estudiar cómo la cantidad y la calidad del agua subterránea se ha visto afectada por actividades humanas, predecir la evolución del problema, intentar controlarlo, o, en un caso más afortunado, simplemente adoptar las medidas oportunas para evitar un posterior deterioramiento. El progresivo urbanismo e industrialización de las ciudades ha comprometido la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas, con las consiguientes implicaciones sociales, ambientales y económicas.

Ambos efectos de la alteración de los recursos hidrogeológicos por actividades humanas es bien conocido en Europa. Concretamente, el uso intensivo de fertilizantes y unas prácticas agrícolas tradicionales, mal adaptadas a una producción masiva de cultivos, han dado lugar a elevadas concentraciones de nitrato en los acuíferos. El pro-

blema de los nitratos es probablemente el mayor factor de contaminación de las aguas que impide que muchos acuíferos alcancen los objetivos de sostenibilidad que promulga la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE). Adicionalmente, la Directiva del Agua Subterránea (Directiva 2006/118/CE) hace hincapié en el control de la concentración de nitrato, confirmando el límite aceptable de 50 mg/L en las aguas subterráneas y definiendo el valor de 37,5 mg/L como el umbral a partir del cual deben adoptarse medidas preventivas para evitar la expansión del contaminante.

La presencia de nitratos en el agua subterránea es un tópico común de muchas discusiones acerca de la calidad del agua. A menudo es difícil procesar la causa de la contaminación, debido a que puede asociarse a diversos orígenes. La entrada de los nitratos a las aguas subterráneas es un resultado de procesos naturales y del efecto directo o indirecto de las actividades humanas. Los procesos naturales incluye la precipitación, el intemperismo de los minerales y descomposición de la materia orgánica. Los nitratos provenientes de la actividad humana, en concentraciones superiores a las fuentes naturales, incluyen:

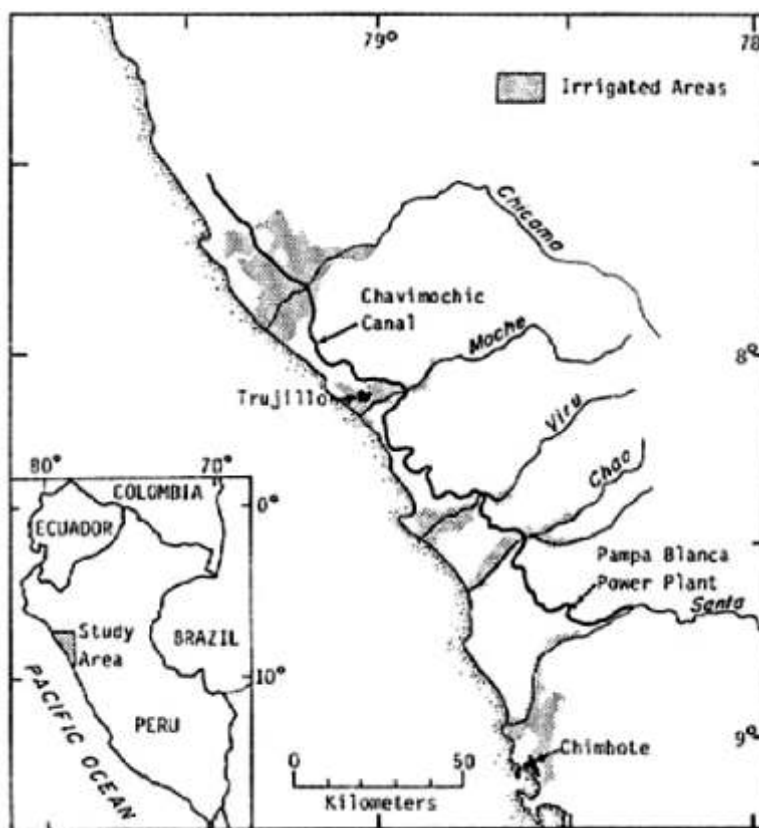


Figura 1. Situación geográfica de la zona de estudio y del contexto del proyecto Chavimochic (según Kus, J.S., <http://sites.maxwell.syr.edu/clag/Yearbook1987/kus.htm>).

la escorrentía de terrenos cultivados, efluentes de lagunas y tanques sépticos, fertilización excesiva con nitrógeno, deforestación y el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de cultivos.

El principal problema de los nitratos es que son contaminantes móviles en el agua subterránea que no son absorbidos por los materiales del acuífero y no precipitan como un mineral. Estos dos factores, permiten que grandes cantidades de nitrato disuelto permanezcan en las aguas subterráneas. Mientras que la contaminación por fuentes puntuales procede de diversos medios tales como efluentes de tanques sépticos y depósitos de excretas, la contaminación difusa se distribuye en amplias áreas donde los fertilizantes nitrogenados han sido aplicados.

El valle de Moche, donde se realizaron los estudios, integra la costa septentrional peruana y limita por el norte con la cuenca del río Chicama, por el sur con la cuenca del río Virú, por el este con la cuenca del río Santa, y por el oeste con el Océano Pacífico (Figura 1). Este valle se extiende desde el nivel del mar hasta la cadena de cumbres de la cordillera occidental de los Andes, que constituye la línea divisoria de las aguas entre su cuenca y la del río Marañón, y cuyos puntos más altos se encuentran sobre los 4 000 m s.n.m. La superficie total del valle es de 2 708 km², considerándose un área agrícola neta de 10 500 ha. Dadas las características de desarrollo urbano y agrícola relacionado con el proyecto CHAVIMOCHIC (<http://www.chavimochic.gob.pe>), el control, la vigilancia y, especialmente, la investigación de este sistema hidrogeológico es de gran relevancia para evitar los errores cometidos en Europa y preservar así la calidad del agua mediante una apropiada gestión de los recursos hídricos.

En este contexto regional, el objetivo de nuestro estudio preliminar consiste en conocer el origen y la distribución espacial de nitrato en el sistema hidrogeológico superficial de la región de La Libertad, dentro de la cuenca del Río Moche en los alrededores de Trujillo (Perú), dada la repercusión que tienen en la calidad de las aguas subterráneas. En particular, la irrigación de una gran extensión de este acuífero asociada al proyecto CHAVIMOCHIC ha conllevado modificaciones en el nivel freático, relacionadas con el riego a partir del agua trasvasada de otras regiones (valle del río Santa) y con el abandono de las captaciones tradicionales de agua subterránea. Asimismo, la calidad de estos recursos ante los nuevos usos del suelo es una de las variables que deben incluirse en la planificación de los recursos hidráulicos con el fin de minimizar los impactos en el marco de unas condiciones de sostenibilidad ambiental.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Geomorfológicamente, el río Moche en sus orígenes comprendió una gran cuenca de sedimentación donde se depositaron tanto sedimentos de facies marinas como continentales. Posteriormente, estos fueron deformados por movimientos orogénicos y epirogénicos evidenciados por el levantamiento de los Andes, fallas y pliegues geológicos observados entre Simbal y Agallpampa en la cuenca del río Moche.

Las rocas que existen en la cuenca son sedimentarias, metamórficas e ígneas (intrusivas y extrosivas). Dentro de las primeras tenemos las areniscas, líticas, calizas y conglomerados. Entre las rocas metamórficas destacan principalmente las cuarcitas. Las rocas ígneas intrusivas batolíticas son predominantemente de composición granitoide. Las rocas ígneas extrosivas son representadas por derrames andesíticos, dacíticos y riolíticos; se ha estimado que la edad de estas rocas comprende desde el Jurásico superior hasta el Cuaternario reciente.

Edafológicamente, los suelos de los valles costeros son variados, lo que concuerda con su origen geológico y grado de fertilidad natural que poseen, se extienden desde el nivel del mar hasta aproximadamente 1 000 m de altitud. En concreto, nos referimos a los suelos de los valles agrícolas de la costa de origen aluvial, con textura moderadamente fina a gruesa, y una profundidad variable.

Los suelos de las pampas eriazas tienen origen eólico y aluvial, mayormente son regosoles de textura gruesa y tiene un grado de fertilidad muy bajo. Sin embargo, existen áreas que pueden ganarse para la agricultura o forestación irrigándolos para mejorar los suelos. Por último, los suelos de los sectores bajos y próximos al mar son ligeramente depresionados y altamente salinizados debido al efecto del empantanamiento. Éstos se ubican en el valle del río Moche entre el centro arqueológico de Chan Chan y el mencionado río, comprendiendo aproximadamente 419 ha. La textura de estos suelos es gruesa y medianamente fina con un grado de fertilización natural bajo. El resto de los suelos son pampas, colinas y montañas per-áridas y con suelos litosólicos, pedregosos, esqueléticos y de bajo grado de fertilidad.

RESULTADOS

En el período 1983-1996 y antes de la llegada de las aguas del río Santa mediante las canalizaciones del Proyecto CHAVIMOCHIC, en el valle del Moche se encontraban en funcionamiento más de 1 000 pozos. En el año 2003, los pozos en funcionamiento se habían reducido hasta un total de 148. Actualmente se

encuentran en explotación 64 pozos a través de los moradores de la cuenca.

Ello ha conllevado la disminución del uso de recursos hídricos subterráneos, ya sea para el abastecimiento de agua potable como para la agricultura y ganadería. Ello se debe al hecho que las aguas superficiales importadas tienen un menor coste para los usuarios en general, beneficiándose de su uso a mayor escala y cantidad.

A medida que se ha ido desarrollando el proyecto, se han incrementado las zonas de cultivo. Con la creación de nuevos puestos de trabajo asociados a la agricultura también se ha producido un aumento importante de la población, que en muchos casos no dispone de tratamiento cloacal ni de gestión de residuos sólidos. Todos estos cambios en la gestión de los recursos y en la ocupación del territorio han llevado consigo toda una serie de afectaciones a las aguas del subsuelo que deben ser evaluadas.

Influencia a nivel cuantitativo

El uso de las aguas superficiales trasvasadas desde el Río Santa ha producido un aumento importante del nivel freático; es decir, una disminución de la profundidad a la que se encuentran las aguas subterráneas. Este ascenso ha da lugar a que, en algunas zonas de la cuenca, el nivel de las aguas del subsuelo haya alcanzado cotas cercanas de la superficie del terreno, llegando en algún caso a producirse empantanamiento.

Este proceso se debe principalmente a dos factores complementarios. Por un lado se ha producido un aumento de la recarga al acuífero debido a la importación de aguas superficiales y a los retornos de riego. La parte superficial de la cuenca del Moche está constituida mayoritariamente por materiales de permeabilidad media y alta (arenas y gravas), permitiendo que las aguas de riego se infiltren rápidamente al acuífero. Conjuntamente, las aguas superficiales se trasvasan mediante canales que no siempre presentan un revestimiento eficiente, ocasionando notables pérdidas de agua que pasan a recargar los recursos del subsuelo.

El segundo factor que determina el aumento del nivel freático es la tendencia a un nuevo estado estacionario como resultado del cese de la explotación de aguas subterráneas. Durante los años previos al trasvase CHAVIMOCHIC, se producía una explotación importante de las aguas subterráneas que generaba un descenso moderado del nivel freático. Al abandonarse la explotación de numerosos pozos, el acuífero tiende a un nuevo estado de equilibrio hidrológico marcado por una extracción de aguas mucho menor. Consecuentemente, se produce un ascenso del nivel hidráulico que debido a la baja explotación del acuífero tenderá a recuperar la cota ante-

rior a la transformación de este entorno. En este sentido, es importante destacar que las zonas que estuvieran empantanadas antes del uso intenso de las aguas subterráneas volverán a estarlo en los próximos años.

Otro factor a considerar es el comportamiento del río Moche. Tanto las aguas superficiales como las subterráneas forman parte del mismo ciclo hidrológico, interrelacionándose e interconectándose en varios puntos. En consecuencia, la modificación de uno de los componentes del ciclo afectará al otro, y viceversa (Winter *et al.*, 1998). Considerando que el Río Moche también recibe aguas del proyecto CHAVIMOCHIC, el tipo de comportamiento –influyente o efluente–, que se dé a lo largo de su curso también influirá en el balance de masas del acuífero.

Influencia a nivel cualitativo

Con la importación de aguas superficiales se han producido diversos cambios en el sistema hidrogeológico que han modificado la calidad de las aguas del subsuelo. Uno de los cambios más destacables detectado hasta la fecha es el aumento de la salinidad del agua en los terrenos superficiales, antes descritos.

Aunque no se ha realizado un estudio de detalle, este aumento de la concentración de sales se atribuye al ascenso del nivel freático. Esta situación facilita el incremento de la evaporación y, con ello, la acumulación de las sales en disolución en la parte más superficial de la capa freática, así como en la zona no saturada. En las zonas donde exista empantanamiento, el agua subterránea se encuentra en lámina libre, aumentando aún más los procesos de evaporación y por tanto la concentración de sales en agua.

Este proceso causa un deterioro de la calidad del agua tanto para consumo humano como para riego. Sin embargo, esta problemática afecta solo a los niveles más superficiales del agua del subsuelo. Por tanto, los pozos en funcionamiento que captan aguas a pocos metros de profundidad presentarían salinidades más bajas dado que, a su vez, captarían aguas más profundas y no sometidas a procesos de evaporación. Las malas prácticas de riego pueden contribuir, asimismo, al aumento de la salinidad en el suelo, en función del método de irrigación.

Adicionalmente, también se observó la presencia local de sales en los sedimentos de la cuenca (Figura 2), atribuibles a oscilaciones, especialmente descensos, del nivel freático. Estas sales, se disuelven en contacto con el agua aumentando su salinidad. Por consiguiente, y aunque no existe todavía un estudio de detalle, es de esperar una acumulación mayor de sales disueltas en las zonas donde el nivel freático se encuentre más cerca de la superficie.

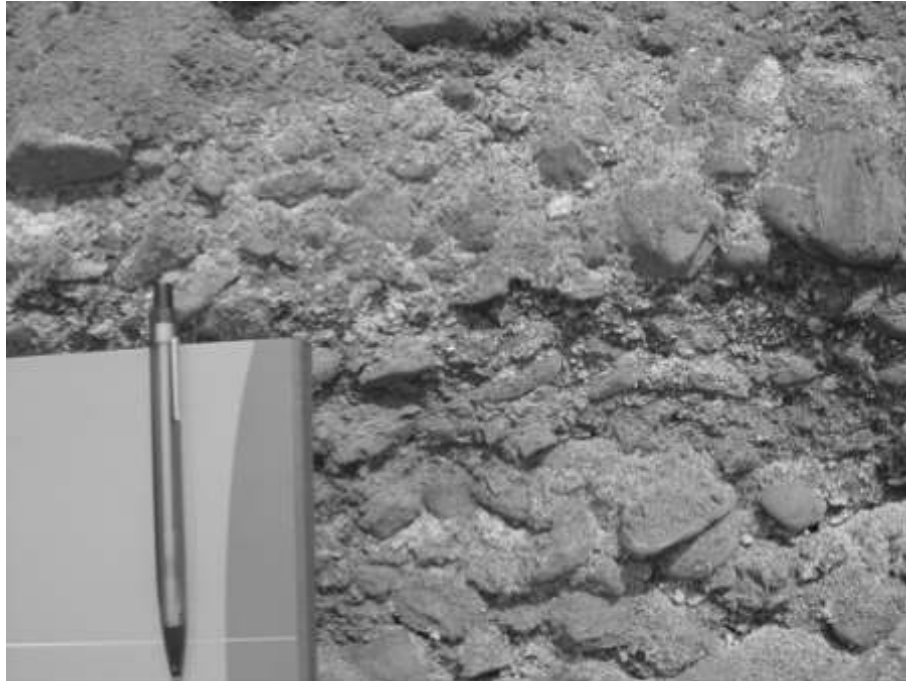


Figura 2. Afloramiento en el que se puede ver la presencia de sales en el sedimento.

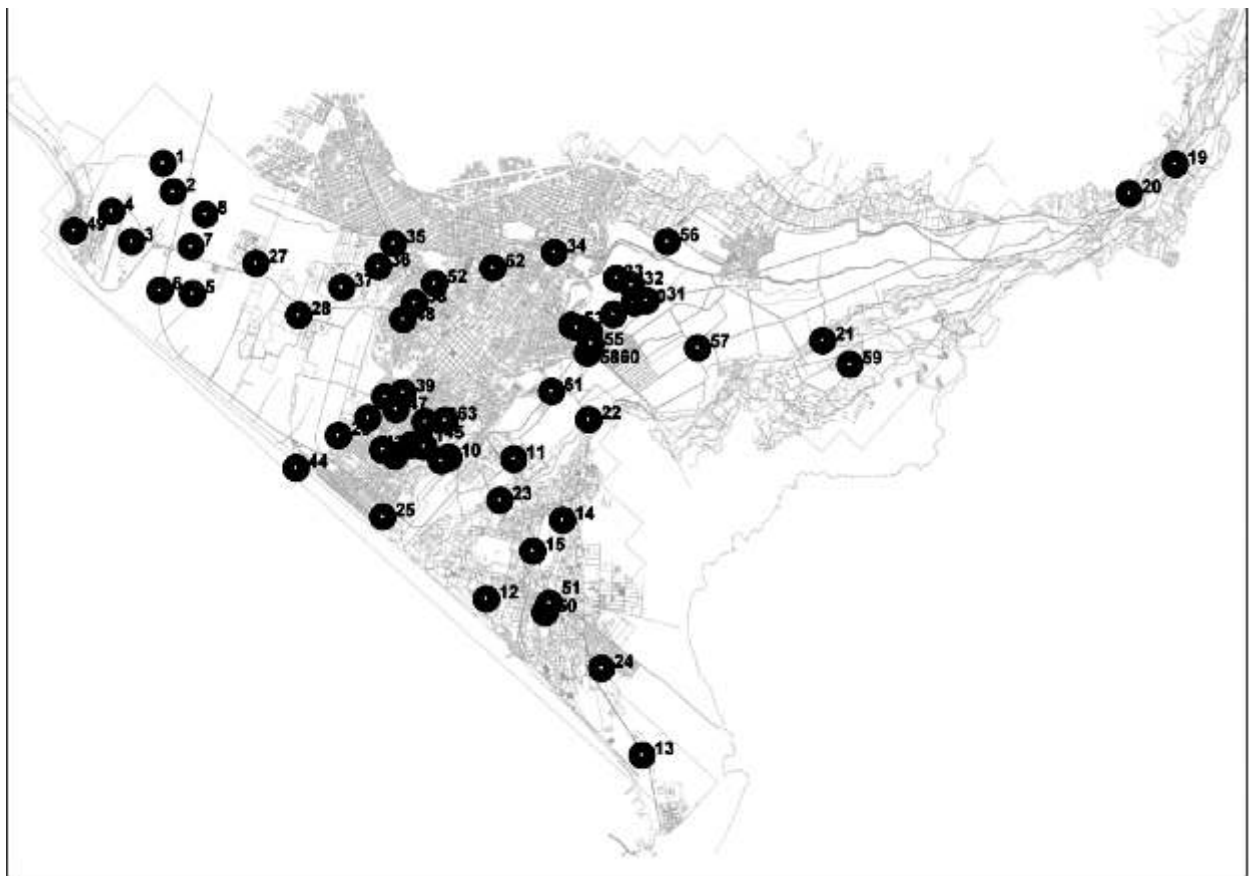


Figura 3. Situación de los puntos de muestreo en el acuífero del Río Moche, en Trujillo.

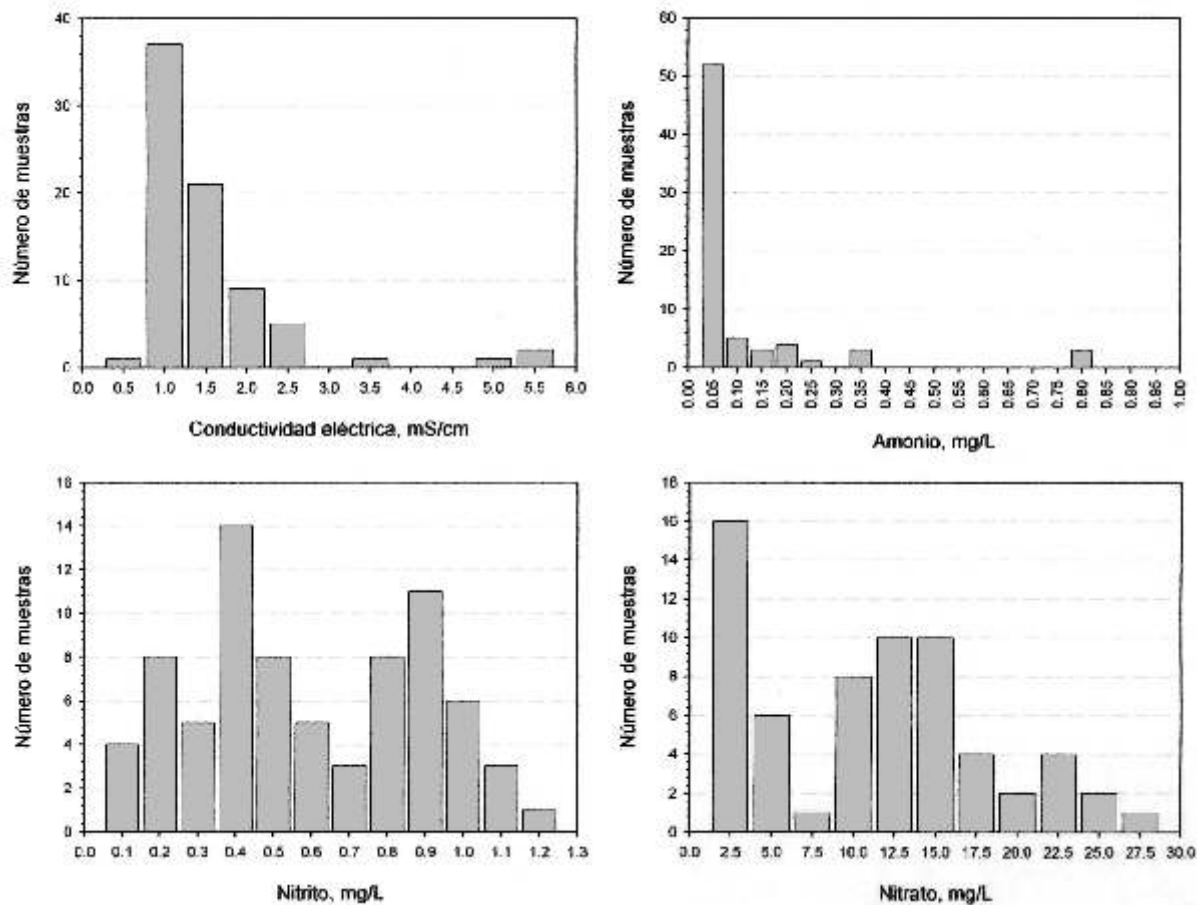


Figura 4. Histogramas de los valores de conductividad eléctrica y de las concentraciones de amonio, nitrito y nitrato en el acuífero del río Moche (Agosto 2007).

Cuadro 1
MATRIZ DE CORRELACIONES ENTRE LOS DATOS HIDROQUÍMICOS
Matriz de correlaciones^a

		pH	Conductividad eléctrica	Amonio	Nitratos	Nitritos
Correlación	pH	1,000	-,141	-,220	-,106	,147
	Conductividad eléctrica	-,141	1,000	,486	-,194	,253
	Amonio	-,220	,486	1,000	,109	,098
	Nitratos	-,106	-,194	,109	1,000	,071
	Nitritos	,147	,253	,098	,071	1,000
Sig. (Unilateral) pH			,157	,057	,224	,147
	Conductividad eléctrica		,157	,000	,082	,034
	Amonio			,057	,000	,242
	Nitratos				,224	,306
	Nitritos					,147

a. Determinante = ,574

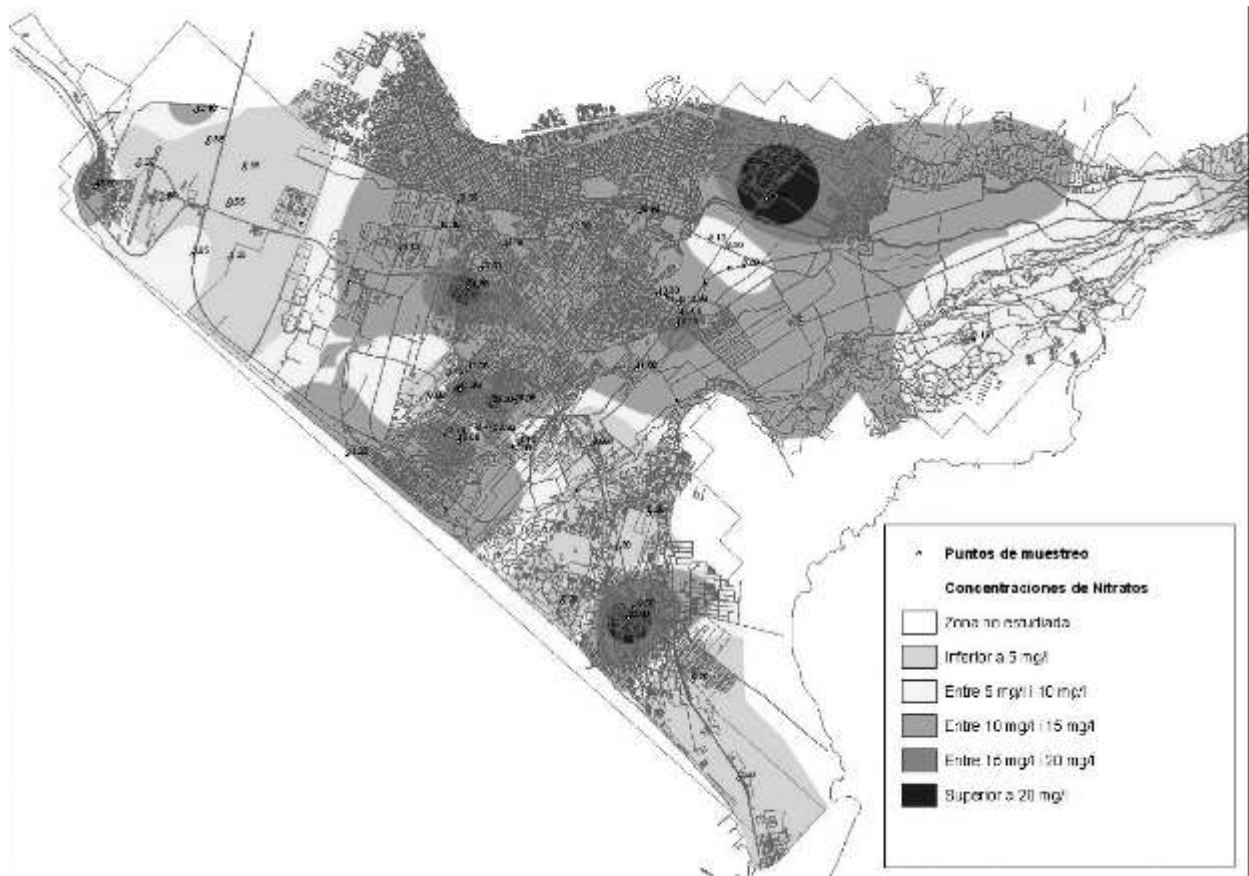


Figura 5. Distribución espacial de la concentración de nitrato en el acuífero del río Moche (Agosto 2007).

A parte del aumento de sales disueltas observado, hay otros factores que pueden estar afectando a la calidad del agua. Se ha producido un cambio importante en los usos del suelo pasando de zonas desérticas a zonas agrícolas. Para el mantenimiento de estas zonas productivas es necesario el uso de diversos productos químicos, especialmente fertilizantes y plaguicidas. Además, y como se ha comentado anteriormente también se ha producido un aumento importante de población que en algunas zonas a dado lugar a nuevos asentamientos humanos. Estas nuevas zonas no siempre disponen de los servicios cloacales adecuados pudiéndose producir filtraciones de aguas residuales al subsuelo.

Análisis de los datos hidro químicos el acuífero del río Moche.

Las muestras de aguas subterráneas fueron tomadas dentro y fuera de establecimientos rurales y en la propia ciudad de Trujillo, durante agosto 2007. El área de muestreo incluyó las zonas del Valle de Moche, Poroto, Meno-cucho, Quirihuac, Laredo, Esperanza, San Isidro, Corti-

jo, Santa Inés, San Salvador, El Golf, Huamán, Covirt, California, Vista Alegre, Arboleda, Vista Hermosa, Huanchaco, Cerro Pesqueda, Barraza, Santo Dominguito, Salaverry y Monserrate (Figura 3).

Se tomaron un total de 77 muestras en las cuales se realizaron determinaciones como pH, conductividad eléctrica y contenidos de amonio, nitritos y nitratos. La conductividad eléctrica (CE) de la mayoría de las muestras se halla entre 0,5 y 2,0 mS/cm, con un valor medio de $1,26 \pm 0,11$ mS/cm. Por consiguiente, se pueden catalogar como una mineralización media-alta.

En relación con la presencia de amonio, las concentraciones de este compuesto nitrogenado son inferiores a 0,1 mg/L (valor medio $0,07 \pm 0,02$ mg/L). En relación al nitrato y nitrito (valores medios de $0,54 \pm 0,06$ mg/L NO_2^- , y $9,61 \pm 1,20$ mg/L NO_3^-), los histogramas muestran un amplio espectro de concentraciones que indica una distribución muy variable de ambos compuestos, habiéndose detectado áreas de baja, media y alta concentración por igual (Figura 4).

Finalmente, los resultados muestran que las concentraciones de nitratos en las diferentes muestras varían desde 0,0 a 26,9 mg/L, lo que nos indica que no hay exceso de nitratos, según los límites de aceptación definidos por las directivas europeas. Sin embargo, se observa una tendencia puntual de contaminación urbana en algunas zonas de la ciudad de Trujillo (Figura 4).

El análisis estadístico y los histogramas que muestran los diferentes resultados nos reportan que no existen correlaciones entre los factores estudiados, salvo, la correlación mínima entre el amonio y la conductividad eléctrica. Concretamente, esta correlación se obtiene debido a la generalización del rango de CE y de los valores bajos en amonio. El análisis de los elementos/compuestos hidroquímicos mayoritarios en próximas campañas permitiría asociar los valores de CE a elementos/compuestos concretos (Cuadro 1).

La cartografía de distribución de nitratos muestra las mayores concentraciones en las zonas urbanas de Trujillo y áreas adyacentes, lo cual induce a pensar que la contaminación por nitratos pueda tener un elevado compo-

nente de carácter urbano (Figuras 5). Al compararlo con el mapa de distribución de conductividades (Figura 6), se observa que no presentan una correlación clara. Esta distribución, junto con las bajas concentraciones de amonio nos indica que no se trata de grandes vertidos puntuales. Además, se puede apreciar que las altas salinizaciones anteriormente comentadas se dan en zona cercanas a la costa, que es dónde el nivel freático se encuentra en la superficie del terreno o pocos centímetros de ésta.

Finalmente, se representó la distribución de nitrato en función del eje probabilística normal con el objetivo de diferenciar las concentraciones umbrales de nitrato, es decir aquellas procedentes de una fuente natural, o bien aquellas mayormente dispersas y diferenciadas de las infiltraciones puntuales de nitrato. Según el gráfico adjunto, se observan dos poblaciones de concentración de nitrato, con tendencia a la distribución normal o gaussiana, y ello permite establecer un umbral alrededor de la concentración de 5 mg/L NO_3^- , según las metodologías de Matschullat (2000) y Panno (2006).

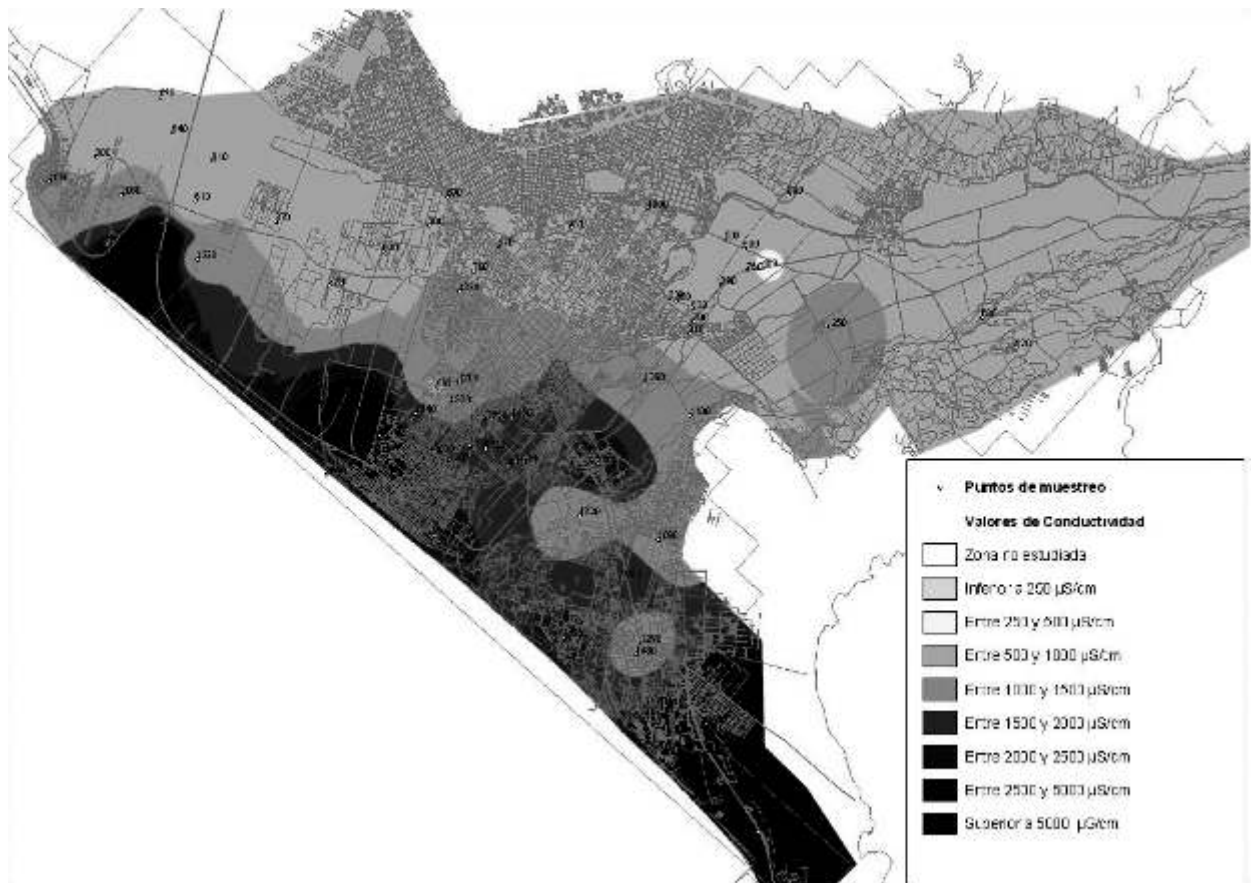


Figura 6. Distribución espacial de los valores de conductividad en el acuífero del río Moche (Agosto 2007).

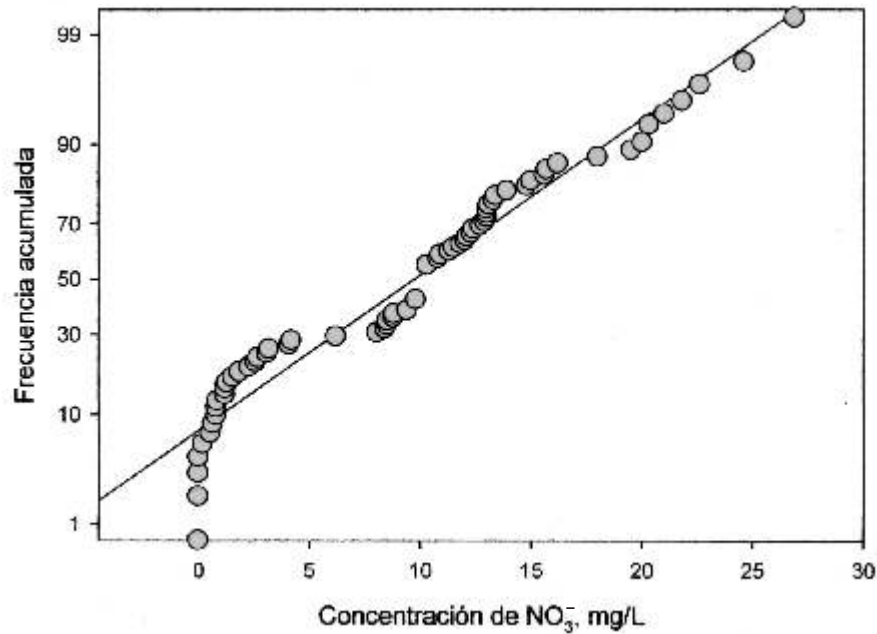


Figura 7. Diagrama de distribución normal de la concentración de nitrato en el acuífero del río Moche (Agosto 2007).

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que en las muestras de aguas tomadas de los diferentes pozos, no existen concentraciones elevadas de nitratos que se aproximen a los valores paramétricos dictados por la legislación europea.

Sin embargo, las concentraciones más altas se observan en la zona urbana y no en la zona agrícola, lo que nos hace suponer una posible contaminación puntual que puede darse por posibles deficiencias del servicio cloacal ó posible influencia de algunos pozos sépticos presentes en la zona.

En base a todo lo expuesto, sugerimos los siguientes aspectos a desarrollar en futuras investigaciones:

1. Continuar con las campañas de muestreo, por lo menos dos años más, con una periodicidad semestral. Juntamente a la toma de muestras hidroquímicas se debe realizar la medida de nivel hidráulico (piezometría).
2. Los análisis deben considerar los elementos mayoritarios (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Si) así como los valores físico-químicos de CE, pH y potencial redox. Obviamente, ello incluye los análisis de los compuestos nitrogenados: NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+ .
3. Corroborar las hipótesis sobre el origen y la evolución de la contaminación del acuífero.
4. Promover un convenio de transferencia de conoci-

miento entre la universidad y las entidades de la administración de agua, favoreciendo la sinergia entre academia y empresa.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del proyecto ELANCAM: *European and Latin America Network on Coastal Area Management*. Proyecto UE ALFA, Number EU Grant: AML/19.0902/97/0666 (II-0419-FA-FCD-FI). Los autores agradecen al Dr. Alfredo Valle Riestra, Jefe de Relaciones Exteriores de UPAO, por las gestiones realizadas para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Matschullat, J., R. Ottenstein, C. Reimann (2000). Geochemical background can we calculate it?. *Environmental Geology*, 39 (9): 990-1000.
- Panno, S.V., W.R. Kelly, A.T. Martinsek, and K.C. Hackley (2006). Estimating background and threshold nitrate concentrations using probability graphs. *Ground Water*, 44(5): 697-709.
- Tovar Pacheco, J.A., J.L. Sayán Miranda, G. Pérez Verástegui y A. Guzmán Martínez (2006). Estado del conocimiento de la hidrogeología en Perú. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (1): 147-161
- Winter, T.C., J.W. Harvey, O.L. Franke, and W.M. Alley (1998). *Ground Water and Surface Water A Single Resource*. USGS Circular, 1139.