

A-01-2023

Comunicación científico-técnica

Modelización de las reacciones de nitrificación en redes de distribución de aguas regeneradas (NITRINET)

Nitrification modelling in reclaimed water distribution networks (NITRINET)

Gómez-Lucena, Ignacio¹, Camacho, Emilio², Rodríguez-Díaz, Juan Antonio²

1 Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, g72golui@uco.es

2 Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba

Resumen:

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un modelo (NITRINET) para simular las reacciones de nitrificación en la red de distribución de la Comunidad de Regantes (CR) de Tintín (Montilla, Córdoba), que emplea aguas regeneradas para el riego. La importancia de este modelo se debe a que la composición química del agua varía espacialmente a lo largo de la red. Se ha observado que las parcelas más distantes de la impulsión reciben un agua con mayor concentración de nitrato y menor concentración de amonio, lo que indica que dentro de la red de distribución tienen lugar reacciones de nitrificación. Para llevar a cabo estrategias de fertirrigación de precisión y optimizar la cantidad de fertilizante empleado, resulta necesario conocer la concentración de los nutrientes presentes en el agua de riego que llega a las parcelas. Los nutrientes que incorporan las aguas regeneradas deben ser tenidos en cuenta a la hora de planificar la fertilización. Esto permite reducir la cantidad de fertilizante aplicado, lo que repercute de manera positiva en el medio ambiente y en la economía del agricultor. Las simulaciones realizadas con NITRINET ofrecen resultados prometedores, prediciendo la concentración de amonio y nitrato en el agua de riego con un error medio absoluto de 1,39 mg/L y 1,26 mg/L, respectivamente.

Palabras clave: nitrógeno, modelos, fertirrigación



XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



Abstract:

The present work consists of the development of a model (NITRINET) to simulate the nitrification processes in the distribution network of the Tintín Irrigation District (TID) (Montilla, Córdoba), where reclaimed water is used for irrigation. The importance of this model is due to the fact that the chemical composition of water varies spatially along the network. It has been observed that nitrate concentrations increase along the irrigation network in contrast to the reduction observed in the ammoniacal forms. It confirms that nitrification processes are occurring. In order to carry out precision fertigation strategies and optimize the amount of fertilizer applied it is necessary to determine the concentration of nutrients present in the water arriving at the farms. The nutrients that reclaimed water carries must be considered when planning fertilization. This allows for a reduction in the amount of fertiliser applied to the soil, which has a positive impact both on the environment and on the farmer's economy. Simulations performed with NITRINET have shown promising results, predicting the concentration of ammonium and nitrate in irrigation water with a mean absolute error of 1.39 mg/L and 1.26 mg/L, respectively.

Keywords: nitrogen, models, fertigation

-17-2021

Scientific-technical communication

1. Introducción

Las aguas regeneradas son aguas residuales procedentes de núcleos urbanos o actividades industriales que han sido tratadas en una estación depuradora. Este tratamiento permite que vuelvan a ser utilizadas con diversos fines, como el riego de cultivos y áreas verdes, fines industriales, la limpieza de calles o la extinción de incendios, entre otros.

Las aguas regeneradas, por su naturaleza, son muy ricas en nutrientes, entre los que destaca el nitrógeno. Por este motivo, presentan una gran aptitud para ser empleadas en el riego [1]. Las formas nitrogenadas que más abundan en las aguas regeneradas son el amonio, el ion amonio y el ion nitrato. También está presente, en menor medida, el ion nitrito. La nitrificación es un proceso bioquímico llevado a cabo por bacterias nitrificantes, que se completa en dos etapas. En el primer paso, el ion amonio (NH_4^+) se oxida a ion nitrito (NO_2^-); en el segundo paso, el ion nitrito se oxida a ion nitrato (NO_3^-). La oxidación del amonio es llevada a cabo por las bacterias oxidantes del amonio (AOB). La oxidación de nitrito a nitrato es llevada a cabo por las bacterias oxidantes del nitrito (NOB). Los procesos de nitrificación están afectados por diversos factores, destacando el pH, la concentración de oxígeno disuelto en agua y la temperatura.

Estudios previos en comunidades de regantes que emplean aguas regeneradas han demostrado que la calidad de las aguas regeneradas (haciendo referencia a su composición química) varía a lo largo del año; pero también varía a nivel espacial dentro de la red de distribución [2]. Se ha observado que los puntos más distantes de la estación de bombeo reciben agua con una mayor concentración de nitratos y una concentración menor de amonio, lo que evidencia que a lo largo de la red tienen lugar procesos de nitrificación. Para realizar una fertirrigación de precisión, es necesario conocer con exactitud la calidad del agua que llega a las parcelas. De este modo, el abonado debe tener en cuenta y complementar los nutrientes que ya incorpora el agua regenerada [1].

Las reacciones de nitrificación en redes de distribución de agua han sido estudiadas por diversos autores [3–9]. Sin embargo, la mayor parte de estos trabajos se ha centrado en estudiar el proceso de nitrificación y sus consecuencias, poniendo el foco en los organismos responsables de llevarlo a cabo, y los factores que afectan a su desarrollo. Pocos autores han tratado de desarrollar modelos que simulen el proceso de nitrificación [3, 7, 10, 11]. La escasa literatura al respecto se compone de modelos que simulan las reacciones de nitrificación en corrientes libres [10], en reactores de biomasa [11], y en sistemas de agua potable cloraminados [7]. Arminski et al. [3] desarrollaron un modelo para determinar la calidad del agua en sistemas de distribución de agua potable. Sin embargo, el modelo es extremadamente complejo, contiene numerosas variables, y su aplicación resulta difícil.

Otros trabajos, como los de Jiménez-Bello et al. [12], tienen en cuenta el nitrógeno en la red de distribución, realizando un balance de entradas y salidas. Sin embargo, no consideran las

transformaciones químicas que este experimenta. Consideran el nitrógeno total como una única entidad, sin tener en cuenta la concentración de las distintas formas nitrogenadas presentes en la solución ni las reacciones de nitrificación.

Por este motivo, se ha desarrollado NITRINET, un modelo que permite simular las reacciones de nitrificación en la red de distribución de una comunidad de regantes y determinar tanto el pH del agua, como las concentraciones de las dos principales formas nitrogenadas (amonio y nitrato) en el agua de riego que llega a cada parcela.

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

El modelo NITRINET se ha desarrollado a partir de los datos de calidad de agua tomados en los años 2018, 2019 y 2023 en la red de distribución de la Comunidad de Regantes (CR) de Tintín (Montilla, Córdoba). Esta CR recibe el agua depurada procedente de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) de Montilla, donde se aplica un tratamiento secundario mediante aireación prolongada. La CR cuenta con una extensión de 650 ha, en las que predomina el cultivo del olivo. El riego se realiza mediante goteo subterráneo, con goteros autocompensantes con un caudal de 2,2 L/h, espaciados a 1 metro y enterrados a una profundidad de 40 cm.

El agua procedente de la EDAR recibe un tratamiento terciario o de regeneración en la CR, que mejora su aptitud para el riego. El agua depurada es conducida inicialmente a una balsa de decantación, y posteriormente, a una balsa de almacenamiento. Con el fin de controlar el desarrollo de algas, en la balsa de almacenamiento se aplican periódicamente tratamientos de ultrasonidos y se añade permanganato de potasio (KMnO_4). A continuación, el agua pasa al sistema de impulsión, que se encarga de dotar a la corriente de la energía suficiente para alcanzar todas las parcelas de la CR, satisfaciendo los requisitos de presión mínima. La filtración del agua se realiza mediante un sistema de filtros de mallas con un tamaño de mesh de 120 (125 μm).

2.2. Modelización hidráulica

La red de distribución de la CR Tintín se ha modelizado en Epanet [13], para estudiar su comportamiento hidráulico. A cada nodo de la red se le ha asignado su demanda base (en L/h), y los turnos de riego se han modelizado mediante un patrón de demanda. La implantación de la red en este software ha sido necesaria para calcular los tiempos de viaje del agua. La calidad del agua que llega a cada parcela es función del tiempo que tarda el agua en llegar desde el sistema de impulsión hasta el hidrante en cuestión [2]. Para trabajar con las funciones del software Epanet en el lenguaje de programación Python, se ha empleado la librería Epanet Python Toolkit (*EPyT*), que permite realizar simulaciones hidráulicas y calcular los tiempos de viaje del agua desde el sistema de impulsión hasta los nodos que conforman la red de distribución.

2.3. Modelización de la nitrificación

Para simular los procesos de nitrificación en la red de distribución se ha adaptado el modelo desarrollado por Le et al. [10] para corrientes libres. Este modelo es aplicable únicamente en

cauces en condiciones de temperatura óptima y unos valores de pH discretos. Como principal novedad, el modelo desarrollado en este trabajo (NITRINET) modeliza las reacciones de nitrificación en redes de distribución de agua a presión en condiciones no óptimas de temperatura y en un rango de valores de pH continuo. Además, incorpora el efecto que la propia reacción de nitrificación tiene sobre el pH del agua, ya que la oxidación del amonio libera protones al medio, lo que provoca una acidificación del agua.

La influencia de los factores que afectan a la velocidad de la nitrificación se modeliza mediante unos parámetros adimensionales θ (Figura 2). Estos parámetros toman valores de 0 a 1; donde 0 implica una inhibición total de la nitrificación, y 1 implica que las condiciones son óptimas para el desarrollo de la reacción. Para determinar estos valores se ha revisado y adaptado bibliografía al respecto [11], [14–17] en la que se estudia el efecto de cada uno de estos factores sobre la velocidad de la nitrificación por separado.

El modelo NITRINET se compone de las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dNH_4}{dt} = -k_a * \theta_{pH} * \theta_T * \theta_{NH_4} * NH_4 \quad (1)$$

$$\frac{dNO_3}{dt} = -\frac{dNH_4}{dt} = k_a * \theta_{pH} * \theta_T * \theta_{NH_4} * NH_4 \quad (2)$$

$$\frac{dpH}{dt} = c * \frac{dNH_4}{dt} \quad (3)$$

Donde NH_4 es la concentración de amonio (mg/L); k_a es la constante de oxidación del amonio (h^{-1}); θ_{pH} es el factor de inhibición por pH para las bacterias oxidantes del amonio; θ_T es el factor de inhibición por temperatura para las bacterias oxidantes del amonio; θ_{NH_4} es el factor de inhibición por concentración de sustrato para las bacterias oxidantes del amonio; NO_3 es la concentración de nitrato (mg/L), pH es el valor de pH del agua; y c es un parámetro adimensional que relaciona la variación del pH con la oxidación del amonio.

Estas ecuaciones han sido implementadas en el lenguaje de programación Python. Para facilitar el manejo de los datos se han empleado las librerías *numpy* y *pandas*. Para graficar los resultados y las curvas se ha empleado el módulo *matplotlib.pyplot*. En la resolución de las ecuaciones diferenciales que componen NITRINET se ha empleado el módulo *scipy.integrate*.

2.4. Calibración del modelo

Para calibrar las ecuaciones y los parámetros del modelo se han empleado datos de calidad de agua tomados en diferentes puntos de la red de distribución de la CR Tintín a lo largo de tres campañas de riego (2018, 2019, 2023).

Los parámetros de calidad de agua que se han analizado para desarrollar el modelo son los siguientes:

- Concentración de amonio (NH_4^+) en mg/L
- Concentración de nitrato (NO_3^-) en mg/L

- Concentración de oxígeno disuelto en mg/L
- pH
- Temperatura del agua en °C

Con los datos reales de calidad de agua se ha calculado la variación de estos parámetros entre el sistema de impulsión y cada nodo de la red. Estas variaciones se han relacionado con el tiempo de viaje del agua (previamente calculado) y, de este modo, se han calibrado las ecuaciones que integran el modelo.

Para calibrar los parámetros k_a y c se ha empleado la librería pyMCMCstat de Python [18]. Esta librería integra los métodos de Monte Carlo basados en Cadenas de Markov (MCMC). Los métodos MCMC son una clase de algoritmos utilizados para simular y analizar modelos estadísticos y matemáticos complejos. Estos algoritmos se basan en la combinación de los métodos de Monte Carlo y las cadenas de Markov.

Los métodos de Monte Carlo son técnicas estadísticas y computacionales que permiten modelar variables complejas mediante la generación de números aleatorios. Estos métodos se emplean para obtener soluciones numéricas aproximadas de problemas cuya resolución resulta muy compleja o computacionalmente costosa. Entre las principales aplicaciones de estos métodos destacan la aproximación de integrales y el cálculo de áreas y volúmenes complejos.

Las cadenas de Markov son procesos estocásticos que describen una secuencia de eventos, donde la probabilidad de que ocurra un evento futuro x_{n+1} depende exclusivamente del evento actual x_n y no de los anteriores. Una cadena de Markov se compone de los posibles estados visitables por la cadena en cada evento y la matriz de transición, que recoge las probabilidades de pasar de un estado a otro. Las cadenas de Markov tienen importantes aplicaciones en el desarrollo de modelos de predicción climáticos y en el procesamiento del lenguaje natural, entre otros.

De la combinación de los métodos de Monte Carlo y las cadenas de Markov surgen los métodos MCMC. Entre sus múltiples aplicaciones destaca el muestreo de funciones de densidad complejas y la estimación de parámetros en modelos mediante inferencia bayesiana. A la hora de calibrar parámetros en un modelo, los métodos MCMC consideran a éstos como variables aleatorias con una función de densidad de probabilidad determinada, que se desea conocer.

El objetivo principal de los métodos MCMC es aproximar la función de densidad de probabilidad del parámetro que se está estimando, mediante la generación de suficientes muestras aleatorias de la misma. Para ello, es necesario disponer de datos reales, con los que se comparan las predicciones realizadas por el modelo, y se ajustan los valores que toman los parámetros.

La idea central de los métodos MCMC es construir una cadena de Markov que se aproxime gradualmente a la distribución de probabilidad del parámetro en cuestión. En cada paso de la cadena, se propone un nuevo estado (un nuevo valor para el parámetro), que se acepta o se rechaza comparando el error de las predicciones obtenidas con el último valor propuesto (n-1) y el valor actual (n). Si el valor actual (n) se ajusta mejor que el valor anterior (n-1) a los datos reales, se descarta el valor anterior y se toma como válido el nuevo valor propuesto para

el parámetro. Si el ajuste del nuevo valor ofrecido es peor, se aceptará el nuevo valor con una probabilidad inferior a 1, que será menor cuanto mayor sea la diferencia entre ambos ajustes.

Esto implicaría que la cadena, en determinados momentos, se desplace hacia regiones de menor densidad de probabilidad. Si bien, esto es una gran ventaja de los métodos MCMC, ya que aceptar estos movimientos permite que se explore todo el espacio de los parámetros y el proceso de optimización no se estanque en mínimos locales. No obstante, cuando el nuevo valor propuesto para el parámetro ofrece un error inferior que el anterior, siempre se acepta el movimiento. Como consecuencia, la cadena se desplaza hacia regiones de mayor densidad de probabilidad. Si este proceso se repite a lo largo de numerosas iteraciones, la cadena acaba convergiendo en torno a la distribución de probabilidad real del parámetro.

Los métodos MCMC son muy utilizados en diversas áreas, como la estadística, la física, la biología o la informática, entre otras. Estos métodos requieren de alta capacidad de computación, ya que el algoritmo converge a partir de un número elevado de iteraciones (500, 1000, 10000...). Pero si el algoritmo se implementa correctamente, y los datos tienen capacidad explicativa, la convergencia de la cadena está garantizada.

3. Resultados y discusión

3.1. Modelización hidráulica

Tras implementar la red de distribución de la CR Tintín en el software Epanet, se obtiene una vista general de la misma, y se puede proceder a realizar simulaciones hidráulicas en período extendido para calcular el tiempo de viaje del agua, desde el sistema de impulsión hasta cada uno de los nodos que conforman la red de distribución de la CR.

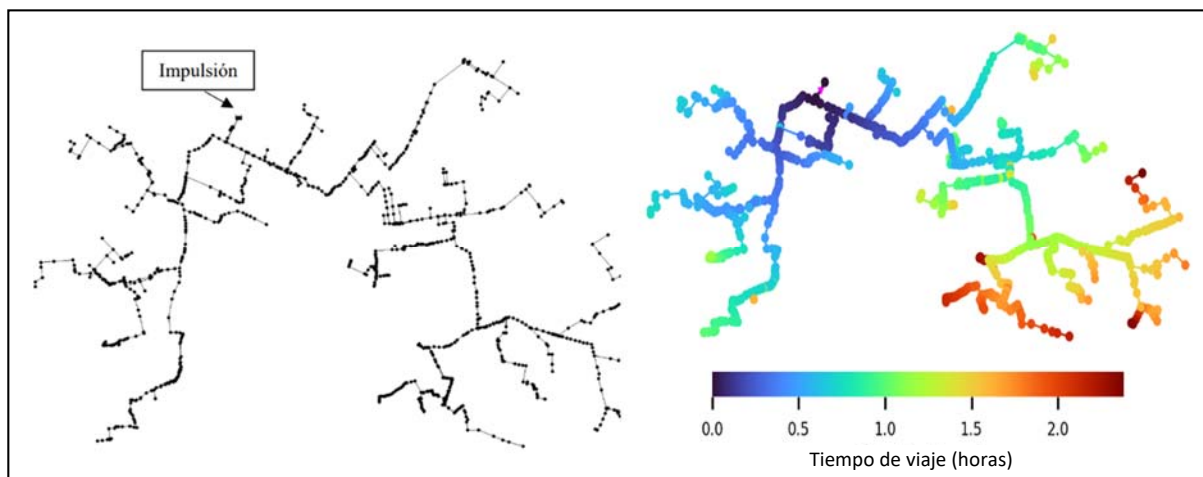


Figura 1. Red de distribución de la CR Tintín y tiempos de viaje

Los mayores tiempos de viaje se encuentran en las parcelas del sector sureste de la CR, donde alcanzan tiempos superiores a 2,2 horas, mientras que las parcelas más próximas a la impulsión tienen tiempos de viaje que apenas superan los 30 minutos. Esto tiene importantes

implicaciones en la calidad del agua que reciben los regantes, como evidencian los análisis de calidad de agua practicados en las parcelas de la comunidad.

3.2. Modelización de la nitrificación

El modelo NITRINET simula las reacciones de nitrificación en el tiempo, y calcula para cada instante de tiempo las concentraciones de amonio y nitrato, además del pH del agua. Esto, combinado con el cálculo del tiempo de viaje en la CR, permite determinar la calidad del agua que llega a cada parcela durante un episodio de riego. Para simular las reacciones de nitrificación, NITRINET requiere que la calidad inicial del agua (a la salida del sistema de filtración) sea introducida manualmente. Los parámetros de entrada son los siguientes:

- Concentración de amonio (mg/L)
- Concentración de nitrato (mg/L)
- pH
- Temperatura del agua.

NITRINET asume que todo el amonio oxidado se transforma en nitrato, sin tener en cuenta la oxidación intermedia a nitrito. Esto se debe a que la molécula de nitrito es altamente inestable y, en condiciones normales, es rápidamente oxidada a nitrato. Según [19] y [20], la nitrificación se inhibe con concentraciones de oxígeno inferiores a 0,5 mg/L. Los estudios de [21], [22] demostraron que con concentraciones de oxígeno disuelto en agua superiores a 2 mg/L la nitrificación se desarrolla en condiciones óptimas. [23] llevaron a cabo ensayos de nitrificación en reactores con diferentes concentraciones de oxígeno disuelto, y no hallaron diferencias importantes entre reactores con concentraciones de 3 mg/L y reactores con concentraciones de 0,5 mg/L de oxígeno disuelto.

En los análisis de calidad de agua practicados en las diferentes parcelas de la CR durante los 3 años del ensayo, en el 92,3% de las mediciones el nivel de oxígeno disuelto en agua se situó por encima de 2 mg/L, y en todas las mediciones superó los 0,5 mg/L. Por este motivo, el modelo considera que las condiciones aeróbicas favorecen la oxidación completa del nitrito a nitrato, y la concentración del primero es despreciable.

A continuación, en la Figura 2 se muestra los valores que toman los diferentes parámetros θ , que representan la influencia de las variables pH, temperatura y concentración de sustrato sobre la reacción de nitrificación.

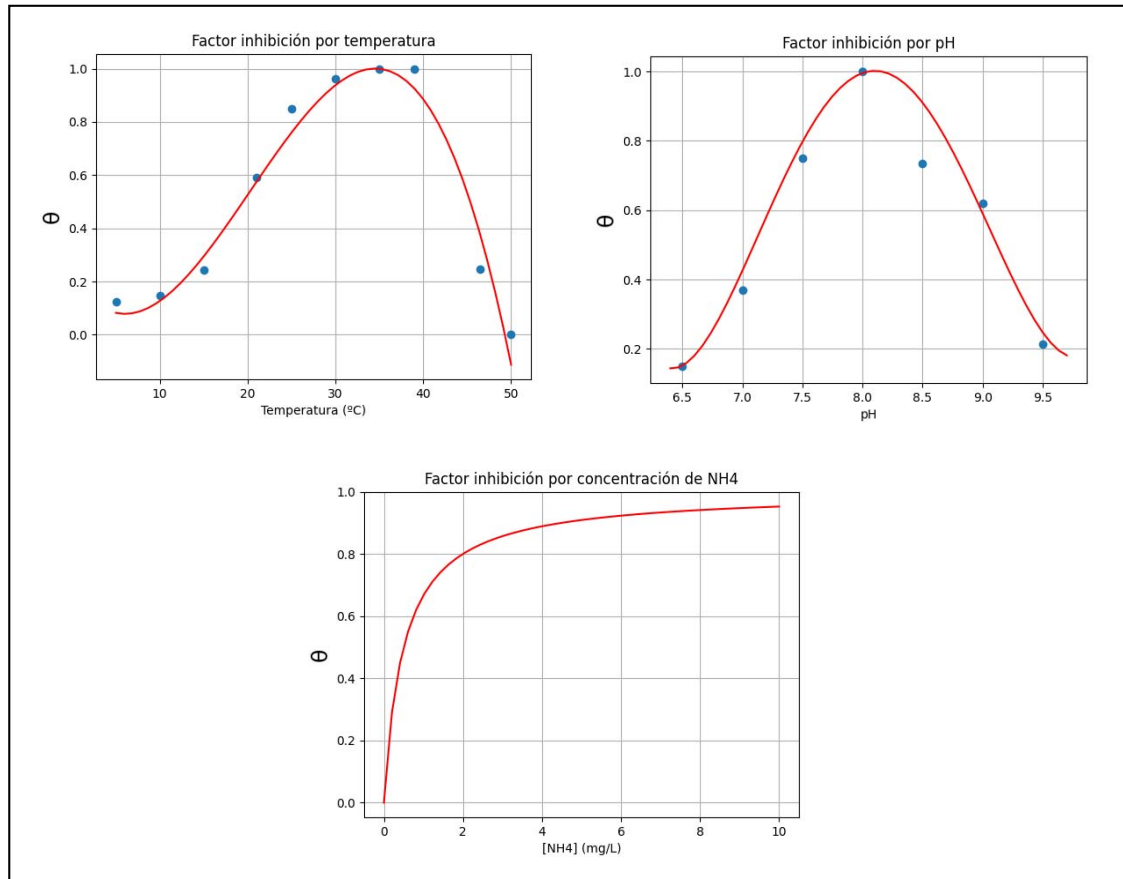


Figura 2. Parámetros del modelo

Como se muestra en la Figura 2, los diferentes parámetros, que son factores de inhibición adimensionales, toman valores entre 0 y 1. Las bacterias nitrificantes se desarrollan bien en condiciones ligeramente alcalinas; el pH óptimo se sitúa en torno a 8. La temperatura óptima es de 35 °C. No obstante, las bacterias nitrificantes se desarrollan bien en un amplio intervalo de temperaturas.

La respuesta de la nitrificación frente a la concentración de sustrato ha sido modelizada mediante la ecuación de Monod, que simula la respuesta de la velocidad de una reacción química frente a la concentración del reactivo. Mientras mayor es la disponibilidad del sustrato, mayor es la velocidad de la reacción. Sin embargo, la respuesta es asintótica, ya que cuando aumenta la concentración de los reactivos, las enzimas responsables de llevar a cabo la nitrificación acaban saturándose y, aunque aumente la disponibilidad del sustrato, la velocidad de la reacción ha alcanzado su valor máximo y no puede incrementarse más.

3.3. Calibración

En la Tabla 1 se muestra el resultado de la calibración de los parámetros k_a y c mediante los métodos MCMC. En la Figura 3 se muestran las funciones de densidad de probabilidad de ambos parámetros, así como el proceso de convergencia de las cadenas de Markov tras 1000 iteraciones. La línea vertical roja indica que las primeras 200 iteraciones se descartan, ya que los primeros valores no son representativos. Consideramos que a partir de la iteración 200 la cadena ha convergido en torno al valor más probable, que se calcula como el promedio de las 800 iteraciones restantes.

Tabla 1. Resultados de la calibración de las constantes

Parámetro	Media	Unidad	Error estándar
k_a	0,2	h^{-1}	0,009
c	0,1	Adimensional	0,03

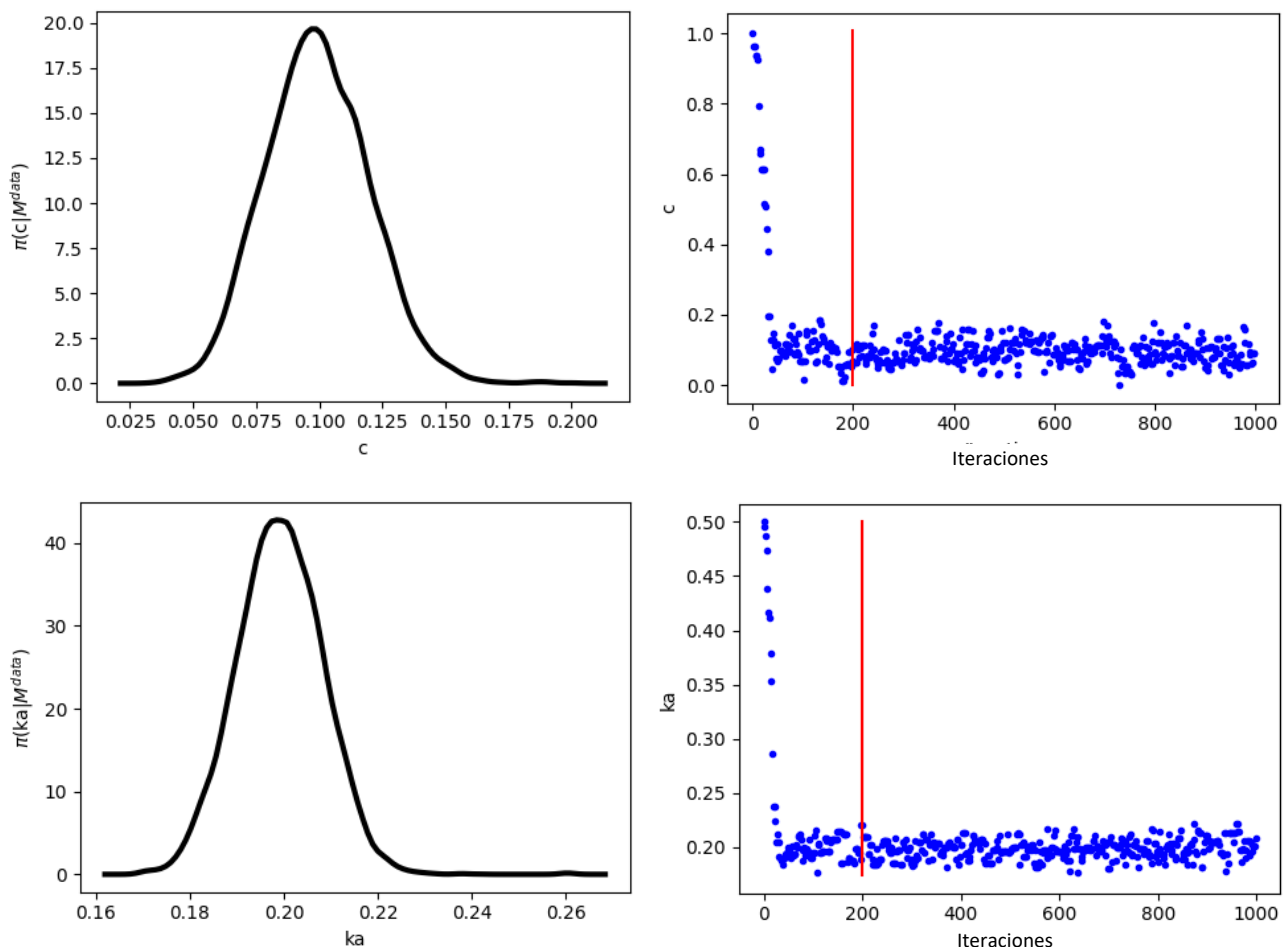


Figura 3. Funciones de densidad de probabilidad y cadenas de Markov de los parámetros k_a y c

3.4. Ajuste del modelo

En la Figura 4 se muestran cuatro simulaciones realizadas con NITRINET, contrastadas con los datos reales de calidad de agua, tomados en parcelas de la CR con diferentes tiempos de viaje. Las líneas coloreadas muestran los datos simulados por el modelo, mientras que los puntos estrellados se corresponden con datos reales de muestras de agua de riego tomadas en la CR.

Para determinar la bondad del ajuste del modelo se ha calculado el Error Medio Absoluto (MAE), obteniendo unos valores de 1,39 mg/L, 1,25 mg/L y 0,38 para el amonio, el nitrato y el pH, respectivamente.

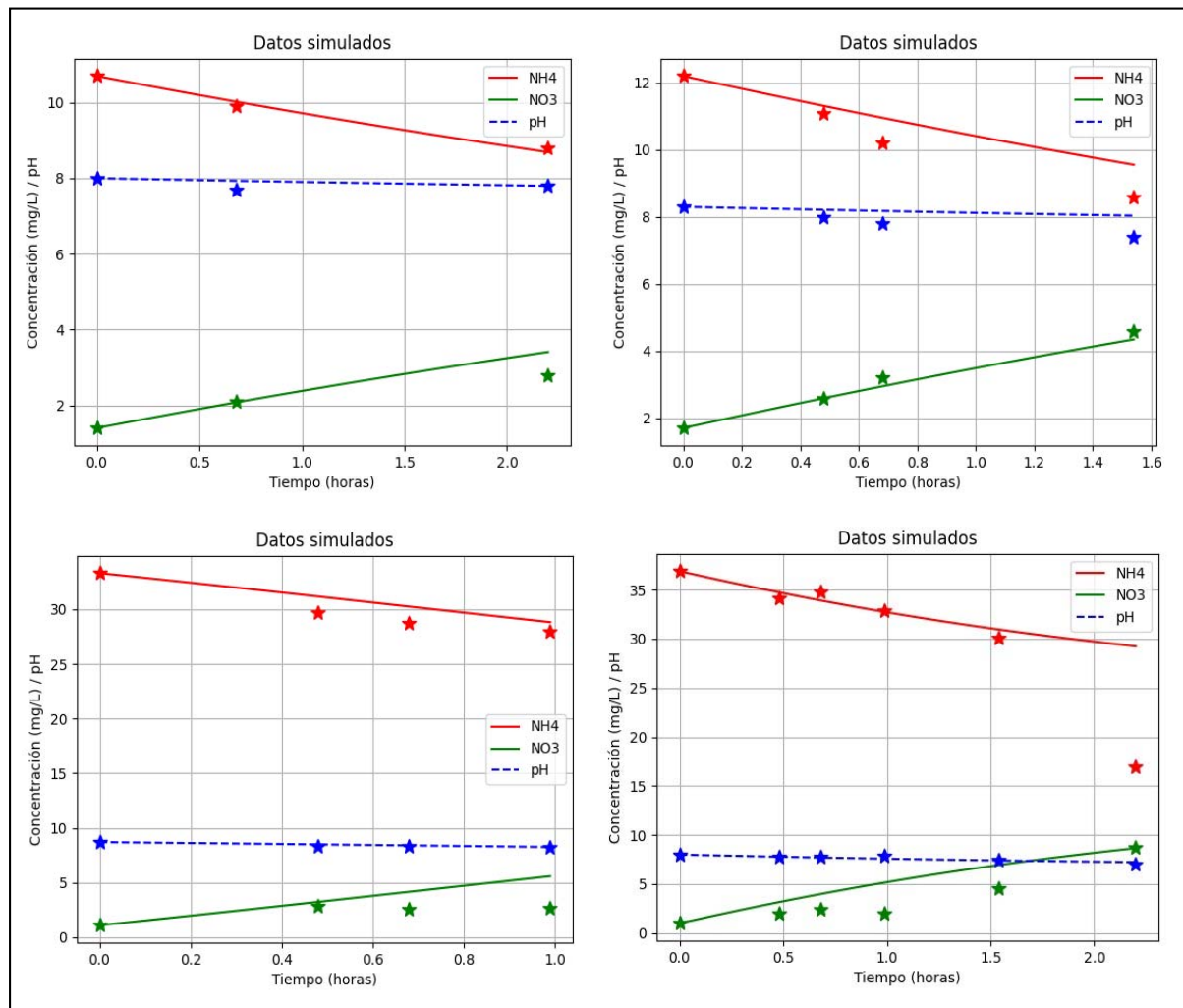


Figura 4. Ajuste del modelo

El objetivo principal de NITRINET es que pueda ser empleado como una herramienta que facilite el proceso de toma de decisiones y ayude a los regantes a conocer la concentración de amonio y nitrato en el agua de riego que reciben y, en base a ello, puedan ajustar su plan de fertilización nitrogenada. Esto permitiría reducir el uso de nitrógeno en la fertilización, lo que repercutiría de manera positiva sobre el medio ambiente y la economía del agricultor.

4. Conclusiones

Modelizar los procesos de nitrificación en redes de riego resulta de vital importancia para determinar la calidad del agua que llega a cada regante dentro de una comunidad. Esto permite ajustar el plan de fertilización.

Las reacciones de nitrificación son extremadamente complejas y dinámicas, influenciadas por diversos factores y difíciles de modelizar con precisión.

El modelo desarrollado constituye una primera aproximación para simular las reacciones de nitrificación en redes de riego que emplean aguas regeneradas. Este modelo continuará en desarrollo y se perfeccionará con los datos de calidad de agua que se tomarán en futuras campañas de riego.

Referencias

- [1] C. Alcaide Zaragoza, R. González Perea, I. Fernández García, E. Camacho Poyato, and J. A. Rodríguez Díaz, "Open source application for optimum irrigation and fertilization using reclaimed water in olive orchards," *Comput Electron Agric*, vol. 173, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105407.
- [2] C. Alcaide Zaragoza, I. Fernández García, I. Martín García, E. Camacho Poyato, and J. A. Rodríguez Díaz, "Spatio-temporal analysis of nitrogen variations in an irrigation distribution network using reclaimed water for irrigating olive trees," *Agric Water Manag*, vol. 262, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.agwat.2021.107353.
- [3] K. Arminski, T. Zubowicz, and M. A. Brdys, "A biochemical multi-species quality model of a drinking water distribution system for simulation and design," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 23, no. 3, pp. 571–585, Sep. 2013, doi: 10.2478/amcs-2013-0043.
- [4] T. C. Bradley, C. N. Haas, and C. M. Sales, "Nitrification in premise plumbing: A review," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/w12030830.
- [5] F. A. Digiano, W. Zhang, A. Travaglia, D. E. Francisco, and M. Wood, "OCCURRENCE OF BACTERIAL REGROWTH AND NITRIFICATION IN THE RALEIGH DISTRIBUTION SYSTEM AND DEVELOPMENT OF AN EPANET MODEL FOR FUTURE ASSESSMENTS."
- [6] M. T. T. Lipponen, M. H. Suutari, and P. J. Martikainen, "Occurrence of nitrifying bacteria and nitrification in Finnish drinking water distribution systems," 2002.
- [7] S. Liu, J. S. Taylor, A. A. Randall, and J. D. Dietz, "Nitrification modeling in chloraminated distribution systems," *Journal / American Water Works Association*, vol. 97, no. 10. American Water Works Association, pp. 98–108, 2005. doi: 10.1002/j.1551-8833.2005.tb07499.x.
- [8] Y. Wang, W. H. Wang, and R. Q. Wang, "Simultaneous nitrification and denitrification in biofilm of a model distribution pipe fed with disinfected reclaimed water," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 35, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101207.



XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



- [9] Y. Zhang, A. Griffin, and M. Edwards, "Nitrification in premise plumbing: role of phosphate, pH and pipe corrosion," *Environ Sci Technol*, vol. 42, no. 12, pp. 4280–4284, 2008.
- [10] T. T. H. Le, J. Fettig, and G. Meon, "Kinetics and simulation of nitrification at various pH values of a polluted river in the tropics," *Ecohydrology and Hydrobiology*, vol. 19, no. 1, pp. 54–65, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ecohyd.2018.06.006.
- [11] V. Pambrun, E. Paul, and M. Spérandio, "Modeling the partial nitrification in sequencing batch reactor for biomass adapted to high ammonia concentrations," *Biotechnol Bioeng*, vol. 95, no. 1, pp. 120–131, 2006.
- [12] M. Á. Jimenez-Bello, F. Martínez, V. Bou, and H. Bartolín, "Analysis, assessment, and improvement of fertilizer distribution in pressure irrigation systems," *Irrig Sci*, vol. 29, pp. 45–53, 2011.
- [13] L. Rossman, H. Woo, F. Tryby, R. Shang, and T. Haxton, "EPANET 2.2 User Manual." U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, 2020.
- [14] H. Daebel, R. Manser, and W. Gujer, "Exploring temporal variations of oxygen saturation constants of nitrifying bacteria," *Water Res*, vol. 41, no. 5, pp. 1094–1102, Mar. 2007.
- [15] C. Grunditz and G. Dalhammar, "Development of nitrification inhibition assays using pure cultures of Nitrosomonas and Nitrobacter," *Water Res*, vol. 35, no. 2, pp. 433–440, 2001.
- [16] R. Jones *et al.*, "Simulation for operation and control of reject water treatment processes," *Proceedings of the Water Environment Federation*, vol. 2007, no. 14, pp. 4357–4372, 2007.
- [17] T. T. H. Le, "Entwicklung eines detaillierten Modells zur prozessbasierten Simulation der Nitrifikation in Gewässern und Einbindung in ein hydrodynamisches Gewässergütemodell."
- [18] P. R. Miles and R. C. Smith, "Parameter Estimation Using the Python Package pymcmcstat," 2019. [Online]. Available: <https://mjlaine.github.io/mcmcstat/>
- [19] W. Bae, S. Baek, J. Chung, and Y. Lee, "Optimal operational factors for nitrite accumulation in batch reactors," 2002.
- [20] M. K. Bansal, "Nitrification in natural streams," *Journal of Water Pollution Control Federation*, pp. 2380–2393, 1976.
- [21] F. Chen, J. Ling, and J. P. Blancheton, "Nitrification kinetics of biofilms as affected by water quality factors," *Aquac Eng*, vol. 34, no. 3, pp. 179–197, 2006.
- [22] F. W. Wheaton, J. N. Hochheimer, G. E. Kaiser, M. J. Krones, G. S. Libey, and C. C. Easter, "Nitrification filter principles," in *Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering Design and Management*, 1994, pp. 101–126.
- [23] M. Bellucci, I. D. Ofițeru, D. W. Graham, I. M. Head, and T. P. Curtis, "Low-dissolved-oxygen nitrifying systems exploit ammonia-oxidizing bacteria with unusually high yields," *Appl Environ Microbiol*, vol. 77, no. 21, pp. 7787–7796, Nov. 2011, doi: 10.1128/AEM.00330-11.