

Elaboración de un mapa de lixiviación de nitratos mediante una metodología de acople SIG-modelo de simulación. Aplicación al acuífero de La Aldea (Gran Canaria)

C. Bejarano⁽¹⁾, M.C. Cabrera⁽²⁾, L. Candela⁽¹⁾ y J.M De Paz⁽³⁾

(1) Dpto. de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Cataluña. C/ Jordi Girona 1-3. 08034 Barcelona. España.
E-mails: Cati.bejarano@upc.es - Lucila.candela@upc.es

(2) Dpto. de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 35017-Las Palmas de Gran Canaria. España.
E-mail: ccabrera@cicei.ulpgc.es

(3) Centro de Investigaciones sobre Desertificación-CIDE. Apdo. 46470. Albal-Valencia. España.
E-mail: Jose.m.depaz@uv.es

RESUMEN

La contaminación difusa por nitrato constituye una de las mayores amenazas actuales para la calidad de las aguas subterráneas. De hecho, varias directivas europeas, nacionales y regionales se han legislado con el fin de minimizar el efecto de las prácticas agrarias en la contaminación de los acuíferos por nitratos. El acuífero de La Aldea (Gran Canaria, España) se ha declarado como vulnerable a la contaminación por nitrato según dichas normas. En este estudio se presenta una metodología para desarrollar el acople de un sistema de información geográfica-SIG con el modelo de simulación de nitrato GLEAMS. Esta herramienta permite calcular la cantidad de nitrato lixiviado procedente de los cultivos de tomate bajo invernadero y da la oportunidad de simular otros rangos de fertilización para minimizar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Se comprueba que la pérdida de nitrato por lixiviación en la zona a partir de dichos cultivos podía llegar a los 500 kg N/ha, casi un 62% del aportado como fertilizante mineral en un manejo tradicional. Por ello, se aconseja la aplicación de las recomendaciones de abonado incluidas en el código de buenas prácticas agrarias de Canarias o cualquier otro sistema de recomendación de abonado mineral para reducir estas pérdidas, minimizando de esta forma el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Palabras clave: contaminación difusa, modelo GLEAMS, Gran Canaria, nitratos, Sistema de Información Geográfica (SIG), zona no saturada

Elaboration of an-leaching map using a coupled GIS-based simulation model. Application to La Aldea (Gran Canaria) aquifer

ABSTRACT

Nitrate diffuse pollution is one of the main risks that affect the groundwater quality. Several european directives, national and regional guidelines have been enacted to protect the aquifers against the effect of the agricultural management practices. The "La Aldea" aquifer was declared nitrate vulnerable area following these laws. In this study a methodology was developed to link a Geographical Information System (GIS) with a nitrogen simulation model (GLEAMS) in this area. This tool allows to assess the amount of nitrate leaching that coming from the traditional nitrogen fertilization rates in greenhouses tomato crops, and gives the opportunity to simulate other fertilization rates to reduce the risk of groundwater pollution. The nitrate leaching reached to 500 kg N/ha in several zones of the study area, that represent the 62% of the nitrogen fertiliser apply in a traditional management. It was recommended the application of the Code of Good Management Practices or other recommendation system to decrease the nitrate leaching, in order to reduce the risk of groundwater pollution.

Key words: Geographic Information System (GIS), model GLEAMS, Gran Canaria nitrate, Non-point source pollutants, vadose zone

Introducción

El análisis de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos se ha basado principalmente en

la aplicación de indicadores como el DRASTIC (Aller, 1987) o GOD (Foster e Hirata, 1991). Estos métodos han funcionado eficientemente en la mayor parte de las zonas donde se han aplicado, si bien están muy

condicionados por los conocimientos subjetivos de la hidrogeología y del entorno del área estudiada. Una solución para evitar al máximo la subjetividad (NRC, 1993) es la utilización de los Sistemas de Información Geográfica - SIG en combinación con modelos de simulación de transporte de solutos. Gracias a la combinación de estas dos herramientas se pueden obtener de forma sencilla mapas de entrada de carga contaminante a las aguas subterráneas, y de riesgo de contaminación (Corwin *et al.*, 1998; De Paz *et al.*, 2001).

La aplicación de esta metodología es de gran interés en zonas de agricultura intensiva en la que se hayan detectado altos niveles de nitratos en sus aguas subterráneas. En estas zonas es donde el mapa de riesgo puede ser utilizado como una herramienta eficaz de ayuda a la toma de decisiones para proteger el acuífero frente a la contaminación agrícola. La sensibilización en Europa ante los problemas de contaminación de las aguas subterráneas por nitratos se ha reflejado en la Directiva CEE 676/91 de nitratos, que ha tenido su transposición en España mediante el Real Decreto 261/1996. En Canarias, la disposición 1505/2000 del Gobierno regional de Canarias recoge un listado de zonas vulnerables a la contaminación por nitratos de origen agrario, proponiendo un plan para elaborar un programa de actuación y un Código de Buenas Prácticas Agrarias (BOC, 2000).

El presente trabajo describe la metodología seguida para la elaboración de un mapa de lixiviado de nitratos mediante la utilización conjunta de un SIG acoplado al código GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems, Knisel, 1993). Además, se presenta una aplicación que ilustra las posibilidades de esta herramienta para el análisis del riesgo de contaminación por nitrato de las aguas subterráneas en la zona de la Aldea (Gran Canaria, España).

Descripción de la zona

El estudio se ha realizado en la parte final del Barranco de La Aldea, en el Municipio de San Nicolás de Tolentino (Gran Canaria) (Fig. 1), zona incluida como vulnerable a la contaminación por nitratos en el listado recogido en la disposición 1505/2000. La zona se caracteriza por la existencia de una agricultura intensiva y altos niveles de nitrato en el agua subterránea, donde se han llegado a alcanzar valores de hasta 800 mg.l⁻¹.

El Valle, abierto hacia el Oeste de la isla y rodeado por altas montañas, está dedicado a la agricultura intensiva para la exportación. La superficie agrícola cultivada total máxima es de unas 700 ha, aunque esta superficie se reduce notablemente en momentos

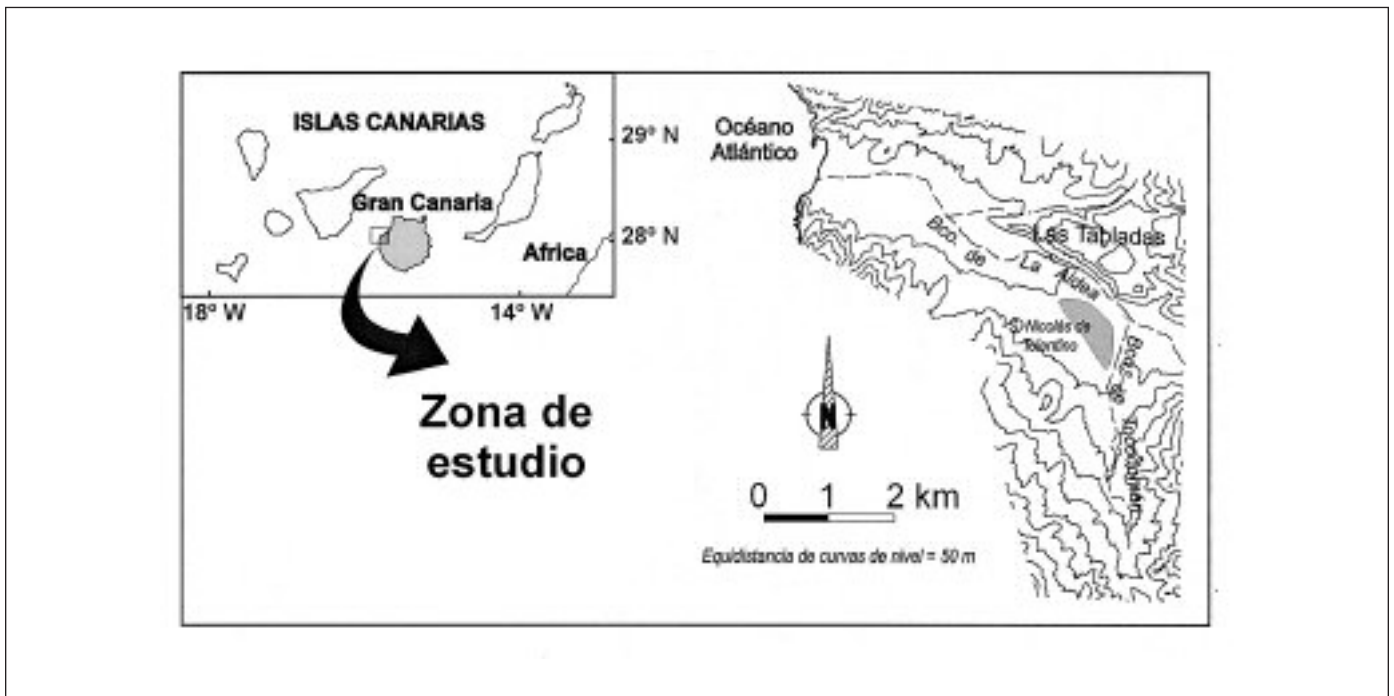


Fig. 1. Mapa de situación de la zona de estudio
Fig. 1. Location of the study area

de escasez de agua. De esta superficie, unas 300 ha están dedicadas al cultivo de tomate en invernadero, que es el principal producto agrícola de la zona y cuya comercialización se realiza por medio de Cooperativas o de Empresas agrícolas de cierta entidad. En menor medida, se cultivan pepinos y otros frutales tropicales. Mayoritariamente el abonado del tomate se hace mediante fertirrigación con dosis que no tienen en cuenta el Código de Buenas Prácticas Agrarias, y se considera que el mayor problema de contaminación es debido al lixiviado de nitratos a partir de los abonados.

Las precipitaciones en la zona son escasas y se concentran principalmente entre los meses de octubre y abril, no superando los 260 mm a⁻¹ en las cotas más elevadas, y los 130 mm. a⁻¹ en las áreas costeras. No existen cursos de agua permanentes, aunque pueden producirse avenidas de cierta importancia en épocas de lluvias torrenciales. La temperatura media mensual oscila entre los 16.5 °C en invierno y los 20.4 °C en verano.

El suministro de agua está cubierto principalmente por aguas superficiales, a partir de tres presas situadas aguas arriba del Barranco de la Aldea. Sin embargo, en épocas de sequía se utilizan en mayor medida las aguas subterráneas. Desde el año 2000 al 2003 y debido a un importante período de sequía, se han incrementado los bombeos para riego, reduciéndose paralelamente la superficie cultivada. La disminución de la recarga por agua de lluvia ha influido en el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas. En esta época de sequía la agricultura ha sobrevivido gracias a la instalación de plantas desalinizadoras de agua de pozo (Muñoz *et al.*, 2002).

Funcionamiento del acuífero de La Aldea

El modelo de flujo de la isla se puede esquematizar como un cuerpo único de agua, aunque estratificado y heterogéneo, en el que la recarga tiene lugar en las cumbres y la circulación hacia la costa, con salidas intermedias en manantiales (hoy secos y sustituidos por las extracciones de los pozos) y al mar, y descarga artificial por pozos. El flujo se canaliza preferentemente por los materiales más permeables próximos a la superficie (SPA-15, 1975). El Barranco de La Aldea, excavado en basaltos Miocenos (14.5-14.1 Ma), presenta en su lecho una capa de conglomerados aluviales, con un espesor medio de 15-20 m.

Existen en la zona más de 370 pozos de gran diámetro (entre 3 y 4 m), excavados a mano, con una profundidad media de 22.5 m. Todos los pozos situados en la parte central del acuífero explotan agua de

los conglomerados aluviales, aunque algunos atraviesan también los basaltos situados debajo, extrayendo agua conjuntamente de ambos materiales. El flujo se produce desde el Este al Oeste, siguiendo el Barranco. En la zona central del acuífero, el sistema funciona como un medio de doble permeabilidad, en el que los Basaltos Miocenos funcionan como un acuitado frente a los conglomerados, que constituyen el acuífero principal (Muñoz *et al.*, 1996), mientras que en el Barranco de Tocodomán, situado al Sur de la zona, el agua procede exclusivamente de los materiales basálticos.

Un estudio hidrogeoquímico preliminar permitió la diferenciación de varias familias de agua, al correlacionarlas con los materiales de que proceden y con los procesos modificadores que pueden haber sufrido (Cabrera *et al.*, 2000). Así, se han identificado una serie de pozos con aguas cloruradas, sulfatadas sódicas y sulfatadas cloruradas sódicas situadas en zonas con explotaciones de tomates, anómalas dentro de los rangos de composición química del acuífero debido a los altos contenidos en sulfatos y en nitratos. El contenido en nitratos puede alcanzar los 500 mg.l⁻¹ en la zona central del acuífero en épocas normales de precipitación (130 mm. a⁻¹ en la zona costera). Sin embargo, los valores medios pueden ser muy superiores cuando se produce la recuperación del acuífero aluvial después de su agotamiento en la época de sequía. Este hecho, unido a la detección de metribuzina en 1995 (Cabrera *et al.*, 1996), confirma la sospecha de que se trata de un acuífero vulnerable a la contaminación por retornos de riego.

Acople de un SIG con modelos de simulación para el estudio de la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación

Los SIG constituyen una potente herramienta de trabajo para estudios de carácter regional, y cuya utilización se ha visto incrementada en los últimos tiempos gracias a su capacidad para almacenar, manipular, analizar y visualizar datos espacialmente, además de su gran potencial a la hora de generar salidas gráficas personalizadas en forma de cartografía temática.

Los modelos de simulación y los SIG son dos herramientas que por sí mismas facilitan enormemente el estudio de problemas de contaminación de las aguas subterráneas. El acople de ambas herramientas forman un sistema de especial utilidad para el estudio a escala regional del riesgo a la contaminación difusa de los acuíferos. Los SIG gestionan datos de tipo geográfico relacionados con bases de

datos de atributos, con la finalidad de obtener mapas temáticos. A partir de la información almacenada en el SIG y en función de la interrogación planteada al sistema se pueden extraer los datos necesarios para ser utilizados en modelos de simulación. Desde el punto de vista teórico, en su forma más elemental los modelos de transporte acoplados a un SIG se caracterizan por la existencia de tres componentes fundamentales: datos, modelo de simulación y SIG (Corwin, 1996) (Fig. 2).

Los modelos más utilizados para el estudio del transporte de solutos a través de la zona no saturada son unidimensionales y deterministas (Corwin *et al.*, 1997). El procedimiento habitual consiste en la discretización de la región de interés en zonas que presenten homogeneidad en relación con los parámetros hidráulicos, prácticas agrícolas y clima, para su fácil almacenamiento en el SIG. Posteriormente, y para cada una de las unidades definidas se procede a realizar la simulación que permita estimar la cantidad de nitrato que lixivia hacia el acuífero.

Material y métodos

Material

Para implementar el sistema SIG-modelo se ha utili-

zando un ordenador Pentium III 667 con 128 MB de memoria RAM. La edición de los mapas base a partir de la cartografía digital de la zona se ha realizado mediante el programa Microstation SE. Los datos a relacionar (datos climáticos, suelo, nitratos en el agua de riego y nitratos en las aguas subterráneas, entre otros) se almacenan en diversos ficheros de Microsoft Access.

Modelo de simulación

El código elegido para evaluar el impacto de la agricultura en la zona de estudio ha sido el GLEAMS (Knisel, 1993). Su selección se realizó en base a su amplia utilización para la simulación del nitrógeno lixiviado en diferentes condiciones (Minkara *et al.*, 1995; Stone *et al.*, 1998; Bakhsh *et al.*, 2000). Se trata de un modelo determinista, con distribución espacial agregada y para flujo en régimen transitorio que permite simular a escala de parcela el movimiento tanto de productos químicos (plaguicidas, fertilizantes) como de agua y sedimentos entre la superficie y la zona radicular. Consta de 4 módulos: hidrología, nutrientes, erosión y plaguicidas (no utilizado en esta simulación). El código permite elegir diversos tipos de salidas de datos en función de las necesidades planteadas (diarias, mensuales, anuales o por even-

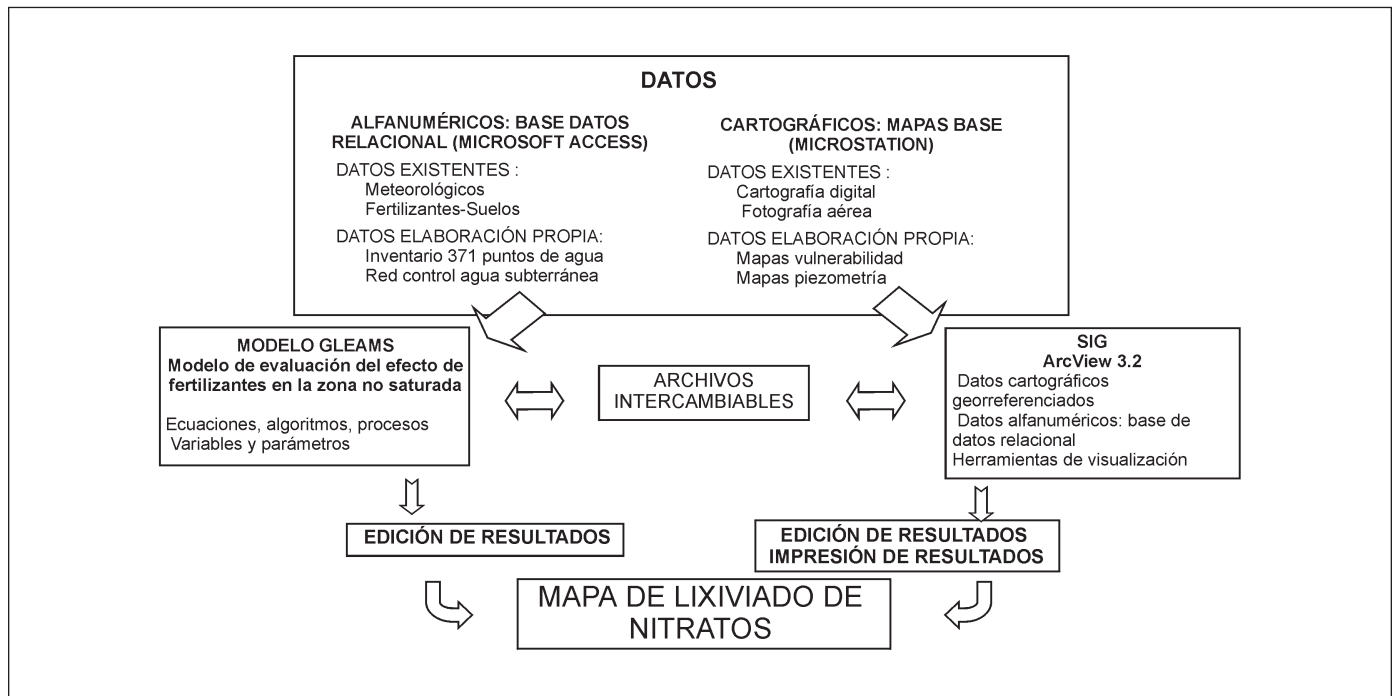


Fig. 2. Esquema de flujo de la metodología utilizada
Fig. 2. Flow chart of the defined methodology

tos). En la Figura 3 se indica el esquema general que utiliza el modelo GLEAMS.

La entrada de datos en los diferentes módulos se realiza a través de archivos en formato texto. La definición del código modelo requiere un archivo de datos de lluvia diaria. Sin embargo, debido a que el cultivo de tomate en la zona se produce en invernadero, a la escasez de lluvias en la zona (160 mm. a⁻¹ de media en los últimos 50 años) y que la principal entrada de agua en el suelo es mediante el riego, el archivo de lluvia incluye la entrada de los datos de riego.

La creación del archivo de datos de riego presenta un serio inconveniente, ya que en la zona únicamente se dispone del riego total, correspondiente a 864 l. m⁻² por período de cultivo. Para resolver este problema se consideró la distribución diaria de riego aplicada habitualmente para el cultivo de tomate en invernadero en Almería, con prácticas de riego similares a las utilizadas en la zona de La Aldea. Los datos procedentes de una parcela experimental de Almería se recogen en la Tabla 1. Los valores de riego en La Aldea se incrementaron en un 16%, al ser el consumo de agua total en La Aldea superior en este porcentaje al de Almería.

Según los datos proporcionados por las cooperativas agrícolas de La Aldea, los cultivos de tomate se plantan en la segunda quincena de agosto y la reco-

gida se realiza hacia finales de mayo, o primeros de junio. Por ello, se han seleccionado los valores de la opción B en la Tabla 1, corrigiéndolos de manera que en la Tabla 2 se encuentran los valores correspondientes a la distribución de consumo medio de agua en otoño para tomate en invernadero en la zona de La Aldea.

El archivo de datos hidrológicos requiere una gran cantidad de información tanto del desarrollo del cultivo (inicio de cultivo, parámetros de riego, índice de área foliar, etc.) como de características del suelo (capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica saturada, materia orgánica, etc.). La información ha sido obtenida a partir de estudios previos de la zona (Sánchez, 1975; Sánchez *et al.*, 1995; Muñoz *et al.*, 1996). Para los datos no disponibles o inexistentes se utilizaron aquellos incluidos en la base de datos del modelo y que se adaptaban a las condiciones reales del estudio, como son los valores de índice de área foliar, grupo hidrológico en función de la conductividad hidráulica o algunas propiedades físicas de los suelos en función de la textura obtenida y tablas que incluye el modelo.

El tercer archivo requerido por GLEAMS es el archivo de datos de nutrientes. Incluye datos de aplicación de fertilizantes, contenido de nitrógeno y fósforo en lluvia, riego y suelo, etc. La generación de este archivo, al igual que el de riego, ha presentado cier-

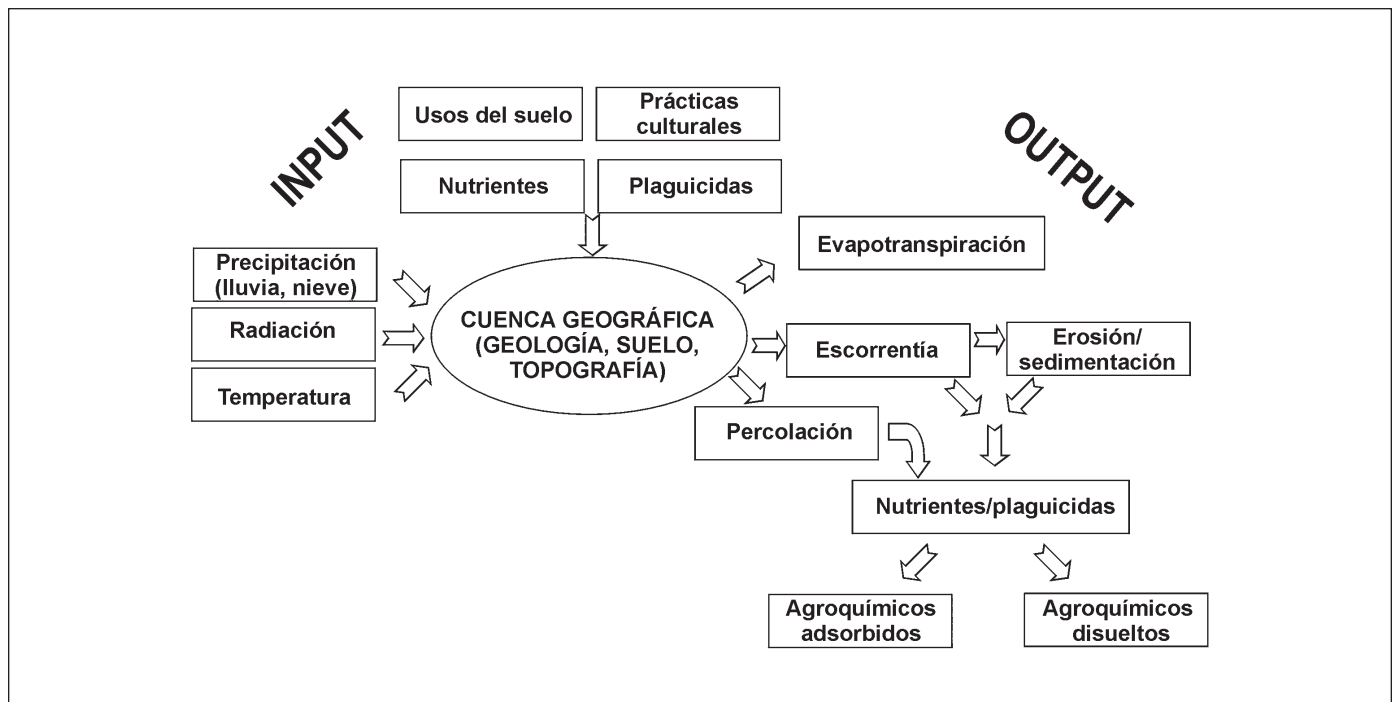


Fig. 3. Esquema utilizado por el modelo GLEAMS (versión 2.10)
 Fig. 3. Description of the GLEAMS code performance (versión 2.10)

MESES Quincenas	AGOSTO		SEPT.		OCT.		NOV.		DIC.		ENERO		FEB.		MARZO		ABRIL		MAYO	
	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª
A	1.63	2.95	3.68	3.80	4.21	3.39	2.40	2.04	1.94	1.55	1.59	1.46	1.70	1.88	2.84	2.88	3.19	3.39	3.69	4.03
B		1.48	2.75	3.04	3.51	3.39	2.40	2.04	1.94	1.55	1.59	1.46	1.70	1.88	2.84	2.88	3.19	3.39	3.69	4.03
C			1.38	2.28	2.81	2.83	2.40	2.04	1.94	1.55	1.59	1.46	1.70	1.88	2.84	2.88	3.19	3.39	3.69	4.03
D				1.14	2.11	2.26	2.00	2.04	1.94	1.55	1.59	1.46	1.70	1.88	2.84	2.88	3.19	3.39	3.69	4.03
E					1.05	1.70	1.60	1.70	1.94	1.55	1.59	1.46	1.70	1.88	2.84	2.88	3.19	3.39	3.69	4.03

Tabla 1. Consumos medios (l.m².d⁻¹) del cultivo de tomate de otoño en invernadero. (Fuente: Documentos Técnicos Agrícolas. Estación Experimental "Las Palmerillas". Caja Rural de Almería). Donde A: trasplante 1ª quincena de agosto; B: trasplante 2ª quincena de agosto; C: trasplante 1ª quincena de septiembre; D: trasplante 2ª quincena de septiembre; E: trasplante 1ª quincena de octubre. (www.nortecastilla.es/canalagro/datos/hortalizas/tomate3.htm)

Table 1. Average consumption (l m² d⁻¹) of greenhouse tomato farming in autumn. (Reference: Farming Technical Documents. Experimental Station "Las Palmerillas". Caja Rural de Almería). A: august 1st fortnight transplant; B: august 2nd fortnight transplant; C: september 1st fortnight transplant; D: september 2nd fortnight transplant; E: october 1st fortnight transplant (www.nortecastilla.es/canalagro/datos7hortalizas7tomate3.htm)

Quincenas	Riego Almería l.m ² día	Días	Riego Almería l.m ²	Riego Aldea* l.m ²	Riego Aldea l.m ² día
1ª enero	1.59	15	23.85	27.67	1.84
2ª enero	1.46	16	23.36	27.10	1.69
1ª febrero	1.7	14	23.8	27.61	1.97
2ª febrero	1.88	14	26.32	30.53	2.18
1ª marzo	2.84	15	42.6	49.42	3.29
2ª marzo	2.88	16	46.08	53.45	3.34
1ª abril	3.19	15	47.85	55.51	3.7
2ª abril	3.39	15	50.85	58.99	3.93
1ª mayo	3.69	15	55.35	64.21	4.28
2ª mayo	4.03	16	64.48	74.80	4.67
1ª junio	0	15	0	0.00	0
2ª junio	0	15	0	0.00	0
1ª julio	0	15	0	0.00	0
2ª julio	0	16	0	0.00	0
1ª agosto	0	15	0	0.00	0
2ª agosto	1.48	16	23.68	27.47	1.72
1ª septiembre	2.75	15	41.25	47.85	3.19
2ª septiembre	3.04	15	45.6	52.90	3.53
1ª octubre	3.51	15	52.65	61.07	4.07
2ª octubre	3.39	16	54.24	62.92	3.93
1ª noviembre	2.4	15	36	41.76	2.78
2ª noviembre	2.04	15	30.6	35.50	2.37
1ª diciembre	1.94	15	29.1	33.76	2.25
2ª diciembre	1.55	16	24.8	28.77	1.8
TOTAL			742.46	861.250	

(*correspondiente a 0.16 multiplicado por el Riego de Almería)

Tabla 2. Obtención de datos de riego en la zona de La Aldea a partir de valores de riego de cultivo de tomate en invernadero en Almería
Table 2. Irrigation dates in the La Aldea area from irrigation values of green house tomato farming in Almería

tas dificultades por requerir los datos del abonado en cantidades discretas, aunque en la zona los nutrientes se aplican por fertirrigación. Este problema, unido al origen variable del agua para riego (superficial y/o subterránea), ha condicionado que se opte por incluir en el apartado de N en agua de lluvia el valor medio entre nitrógeno aportado por el agua subterránea

aplicada en riego y nitrógeno aportado por el abonado. Este valor representa la aportación diaria del nitrógeno que recibe la planta. El aporte por agua de lluvia se considera despreciable en comparación con el N aportado por fertirrigación.

Como parte de la simulación se han llevado a cabo los siguientes pasos previos:

1- Análisis de sensibilidad

Tiene como objetivos: *i)* identificar los parámetros que condicionan en mayor medida los resultados de la simulación *ii)* su ajuste, que permita obtener resultados que se asemejen a la realidad, *iii)* indicar la incertidumbre que se genera debida a la aplicación del modelo.

El análisis realizado (Figuras 4 y 5) ha permitido determinar que los parámetros más influyentes para la estimación del drenaje y profundidad de percolación son: temperatura, porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez e índice foliar-LAI. Con respecto a la lixiviación de nitrato, los parámetros con mayor incidencia son la cantidad de fertilizante aplicado y el C1 que relaciona el nitrógeno extraído por la planta y la producción.

2- Calibración del modelo

El objetivo de la calibración consiste en la estimación de los parámetros desconocidos del modelo y sensibles para el cálculo del nitrato lixiviado. Dada la falta de datos reales procedentes de otros estudios o de parcelas experimentales de la zona es prácticamente imposible la calibración del modelo.

3- Validación del modelo

La validación de las hipótesis previstas en el modelo mediante datos reales es muy importante. Como se ha comentado en el apartado anterior, la falta de datos reales hace prácticamente imposible la validación para parcelas del terreno. Si bien en este caso no se puede proceder a su validación, la validación del modelo en otras zonas ha sido realizada por diversos autores y para distintas condiciones agronómicas (De Paz y Ramos, 2002; Webb *et al.*, 2001; Bakhsh *et al.*, 2000, Dukes y Ritter 2000).

Utilización del SIG

La elección del SIG más apropiado es un trabajo complejo al tener que seleccionar aquel que mejor se ajuste al proceso a simular y a las necesidades de la zona. De forma general, los SIG basados en técnicas ráster son más versátiles para la superposición de mapas; sin embargo en comparación con los vectoriales, el requerimiento de memoria es superior teniendo una la capacidad inferior para gestionar la información y realizar cálculos.

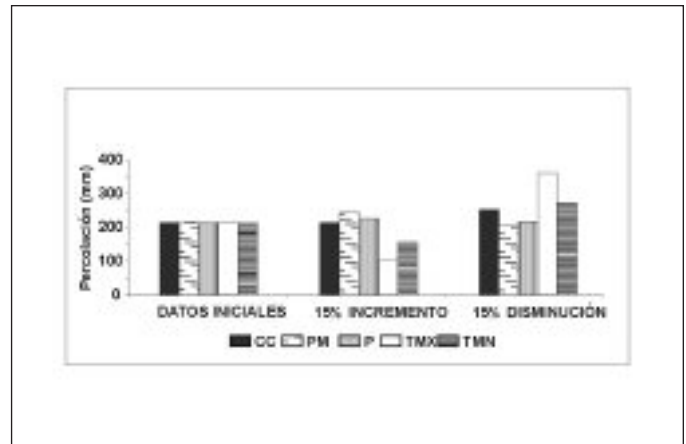


Fig. 4. Gráfico del análisis de sensibilidad de algunos parámetros del medio relacionados con la profundidad de percolación, drenaje, para un incremento y un descenso del 15% respecto a los valores iniciales. (CC: capacidad de campo; PM: punto de marchitez; P: porosidad; TMX: temperatura máxima; TMN: temperatura mínima)
 Fig. 4. Sensitivity evaluation of N leaching for some selected parameters according to a 15% variation of the initial values (CC: field capacity; PM: yielding point; P: porosity; TMX: maximum temperature; TMN: minimum temperature)

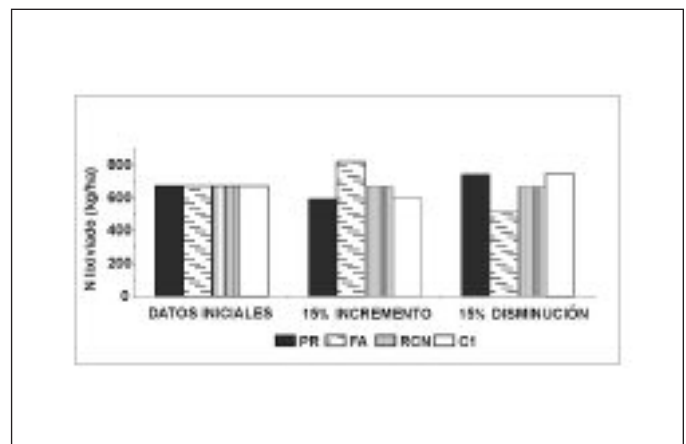


Fig. 5. Gráfico del análisis de sensibilidad de algunos parámetros de los cultivos relacionados con el N lixivado, para un incremento y un descenso del 15% respecto a los valores iniciales. (PR: producción; FA: fertilizante aplicado; RCN: relación C/N; C1: C1)
 Fig. 5. Sensitivity evaluation of N leaching for some selected parameters according to a 15% variation of the initial values. (PR: production, FA: fertilization rate, RCN: relation C/N, C1: crop uptake parameter)

Se seleccionó el ArcView 3.2, desarrollado por la empresa ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.). Este SIG es de tipo vectorial con salida gráfica de alta calidad y que genera estructuras de datos más compactas que los modelos ráster. El programa permite explorar, consultar y analizar datos distribuidos espacialmente mediante un interface gráfico, que almacena datos espaciales y tabulares (a

través de bases de datos relacionales) para posteriormente presentarlos en forma de mapas, tablas y diagramas. El programa ofrece además la posibilidad de personalizar distintas aplicaciones a través de un lenguaje de programación orientado a objetos llamado AVENUE.

Los SIG requieren dos tipos de datos: geográficos (Temas) y alfanuméricos (Bases de datos relacionales).

1- Datos geográficos (Temas)

Los datos geográficos (*Temas*) se agrupan en diferentes capas de información de tipo polígono que contienen la información digital necesaria para la utilización del SIG. En la zona se crearon tres *Temas*: *Clima*, *Parcelas* y *Suelo*.

Para la elaboración de estos temas se partió de la cartografía digital de la zona en formato MicroStation. Se transformó esta información geográfica en formato de shapefile para Arcview y se completaron las tablas de atributos con datos obtenidos mediante fotointerpretación y datos aportados por los técnicos de las cooperativas y de la Agencia de Extensión Agraria de la Aldea.

Definición de los *Temas*

a- *Tema Clima*.

En la zona existe solamente una estación meteorológica automatizada, situada en la localidad de San Nicolás de Tolentino, que controla temperatura máxima y mínima diaria, humedad máxima y mínima diaria, velocidad y recorrido del viento. Los datos de esta estación se extrapolaron para toda el área. La temperatura y la radiación solar son los parámetros que más influyen en la estimación de la evapotranspiración de los cultivos.

b- *Tema Parcelas*.

Del total de superficie cultivada en la zona para el período a simular (1998-2000), cifrada en 700 ha en épocas de abundancia de agua, únicamente se han analizado unas 230 ha, correspondientes a áreas dedicadas a cultivo de tomate en suelo dentro de invernadero. La mayoría de las parcelas no simuladas no estaban en cultivo en los años de la simulación, dada la sequía existente, mientras que otras están constituidas por cultivos de tomate hidropónico en invernadero, otros cultivos en invernadero y cultivos realizados al aire libre.

Este tema estaba formado por 4 *Temas de Parcelas* que representan a las diferentes Cooperativas

Agrícolas (que agrupan los cultivos más importantes de la zona): COAGRISAN, COPAISAN, HORTÍCOLA ALDEANA y MATÍAS MARRERO. Para facilitar la combinación con el resto de los temas que componen el SIG y previamente al almacenamiento de los mapas, los 4 temas se reunificaron en uno sólo denominado *Tema Parcelas*. Así, la información final contiene en su tabla de atributos asociados un nuevo campo indicativo del *Tema Parcelas* donde se detalla la cooperativa a la que pertenece.

c- *Tema Suelos*.

La definición de los tipos de suelo existentes en la zona se realizó en base a estudios existentes de la isla (Fig. 6), definiéndose así el *Tema suelos*. Los estudios, realizados por Sánchez (1975), Sánchez *et al.* (1995) y Muñoz *et al.* (1996), aportaron la mayoría de los datos necesarios para el modelo y su distribución espacial en la zona de estudio. A partir de los tipos de suelo de la zona se calcularon los parámetros hidráulicos requeridos por el modelo GLEAMS: capacidad de campo, punto de marchitez y conductividad hidráulica. Dicho cálculo se realizó a partir de las funciones de pedotransferencia incluidas en el modelo SOILPAR (Donatelli *et al.*, 1996) (Tabla 3).

Combinación de Temas

Una vez definidos los temas requeridos (*Tema Parcelas* y *Tema Suelo*), y dado que el *Tema Clima* es homogéneo para toda la zona, se pasó a su superposición e intersección para obtener un solo tema, representativo de las unidades homogéneas existentes de manejo del cultivo, y tipo de suelo. Esta operación se llevó a cabo con las utilidades de análisis geográfico propias del SIG ArcView.

2- Datos alfanuméricos (Base de datos)

Para cada uno de los *Temas* (*Suelos*, *Parcelas*) existe una tabla que incluye los datos alfanuméricos que requiere el modelo (capacidad de campo, punto de marchitez, tipo de cultivo, dosis de fertilizante etc.).

La relación entre el *Tema Parcelas-Suelo* y sus atributos se realiza a partir de un código identificador (ID). Dicho código permite asociar a cada parcela simulada con las diferentes bases de datos generadas. A partir de este proceso y para la zona de La Aldea finalmente se generaron 352 parcelas resultantes, donde se aplicó el modelo de simulación.

TIPO DE SUELO	PROFUNDIDAD DE MUESTREO (m)	PUNTO DE MARCHITEZ (m/m)	CAPACIDAD DE CAMPO (m/m)
ENTISOL ARENT	0.1	0.08	0.22
ENTISOL ARENT	0.3	0.3	0.18
ENTISOL ARENT	0.4	0.1	0.16
ENTISOL ORTHENT	0.2	0.14	0.27
INCEPTISOL OCHREPTS	0.2	0.18	0.29
INCEPTISOL OCHREPTS	0.6	0.18	0.29
INCEPTISOL OCHREPTS	1	0.18	0.28
VERTISOL XERERT	0.4	0.17	0.27
VERTISOL XERERT	0.7	0.32	0.36
VERTISOL XERERT	1	0.28	0.34
VERTISOL XERERT	1.35	0.31	0.36
ALFISOL XERALF	0.4	0.19	0.28
ALFISOL XERALF	0.6	0.31	0.36
ALFISOL XERALF	0.8	0.32	0.36

Tabla 3. Capacidad de campo y punto de marchitez a diferente profundidad de los principales suelos de la zona de La Aldea calculados mediante el código SOILPAR (Donatelli *et al.*, 1996) y basado en el método de Rawls

Table 3. Field capacity and giolding point of principle soils at different depth in the La Aldea area. They were calculated by SOILPAR code (Donatelly et al., 1996), based in the Rawls method

Acople SIG-modelo

Se pueden distinguir diversos tipos de acople siendo el máximo la total integración del modelo en el SIG (Tim 1996, Corwin 1996). En este caso, se seleccionó un acople ligero por su facilidad de implementación y por no ser necesaria una interfaz programada ni del modelo ni del SIG. Sin embargo, es el más laborioso al requerir la entrada manual de datos, a diferencia de los acoples fuerte e integral.

Mediante la explotación del SIG se reorganizaron y trataron los temas geográficos, con el objeto de obtener la discretización del número total de polígonos en los que se aplicó el modelo. El modelo utiliza los datos almacenados en el SIG (número de parcelas) y proporciona un conjunto de resultados que posteriormente, y a través del ID son relacionados con cada una de las parcelas. En este tipo de acople el modelo y el SIG permanecen independientes y únicamente tienen en común los diferentes archivos de intercambio de datos (número de parcelas y resultados del modelo).

Resultados y discusión

El resultado de la aplicación de la metodología SIG-GLEAMS a la zona de La Aldea para el período simulado (1998-2000) se recoge en la Figura 7, en la que se han representado los valores medios anuales de nitrato lixiviado a partir de la zona radicular en parcelas de cultivo de tomate en invernadero con superficie superior a 0.5 ha.

Así, el acople SIG- GLEAMS permite determinar la

cantidad de nitrato transportado hacia capas profundas del suelo en las diferentes parcelas estudiadas y plantea la posibilidad de variar los parámetros de entrada del modelo, ya sean agrícolas o climáticos, obteniendo soluciones relativamente rápidas para diferentes escenarios de estudio. El papel fundamental del SIG en este tipo de aplicaciones se centra, fundamentalmente, en proporcionar una visualización espacial y gráfica de los resultados obtenidos del modelo, que siempre es más ilustrativa que la solución numérica.

El acople planteado para el estudio realizado tiene la ventaja de la simplicidad en su utilización, dado que se ha obviado la programación de la interface SIG-modelo. Sin embargo, se puede decir que pese a ser el más sencillo, requiere de un laborioso proceso de introducción de datos. Este hecho sería fácilmente evitado si se reprograma el modelo para poder obtener una salida directamente asimilable por el SIG.

Una primera limitación de resultados de la aplicación presentada en el acuífero de La Aldea se refiere a que se han considerado exclusivamente los cultivos de tomate bajo invernadero, que constituyen el 54% de los cultivos totales de la zona. Sin embargo, dado que la escasez de agua en los años de la simulación fue muy importante, el total de superficie cultivada en estos años no fue mucho mayor de la considerada, por lo que el lixiviado de N en dicho período debe aproximarse al valor real.

Si bien la utilización de un SIG no plantea mayores problemas que los asociados a la disponibilidad de información y lo más o menos arduo que pueda ser su tratamiento, la simulación mediante GLEAMS presenta mayor complejidad. En general, una limitación

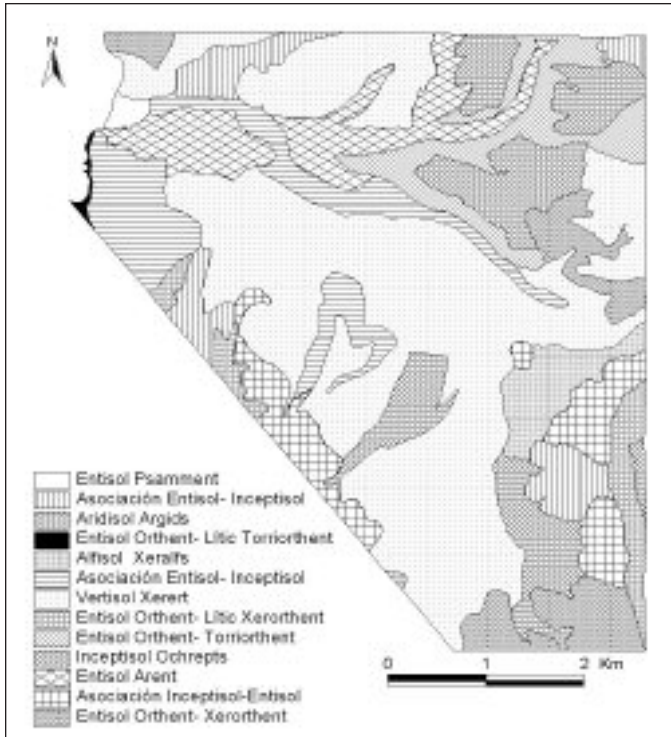


Fig. 6. Mapa de distribución espacial de los diferentes suelos de la zona, según la clasificación de la *Soil Taxonomy* de 1992 (Sánchez, 1975; Sánchez et al., 1995)
 Fig. 6. Soil map of the study area according to the *Soil Taxonomy* - 1992 classification (Sánchez, 1975; Sánchez et al., 1995)

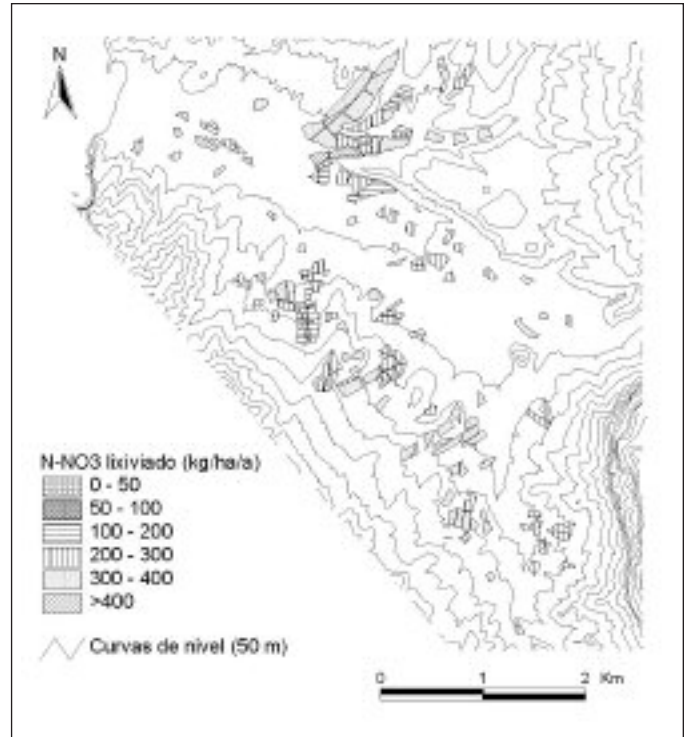


Fig. 7. Mapa resultado de N-NO₃ lixiviado en las parcelas de más de 0,5 ha. utilizadas en la simulación
 Fig. 7. N-NO₃ leaching map simulated by GLEAMS model (farms smaller than 0.5 ha. were discarded)

importante a la validez de los resultados procede de la generalizada carencia de datos reales tanto regionales como locales en condiciones reales que debe subsanarse a partir de parcelas experimentales o estudios hidrogeológicos. Para la aplicación del modelo GLEAMS se precisaría disponer de datos que permitieran caracterizar el terreno, como son contenido de humedad del suelo a capacidad de campo, punto de marchitez y porosidad. Del mismo modo, serían necesarios datos relacionados con los cultivos como son las aportaciones de fertilizantes y la cantidad y procedencia del agua de riego, la producción obtenida y el período de cultivo, entre otras.

Si en general, el número de parámetros necesarios para la puesta a punto de esta metodología plantea grandes incertidumbres respecto a los resultados obtenidos, además en el caso de La Aldea se desconocen los valores meteorológicos necesarios en invernadero. La aproximación al análisis de sensibilidad realizado en el trabajo muestra la gran influencia de estos datos en el resultado final, por lo que se considera fundamental realizar una comparación entre los resultados obtenidos en las condiciones actuales y aquellos producidos al ajustar los datos meteorológicos

al efecto de invernadero. Asimismo, sería importante controlar el riego, aunque sea de forma mensual, lo que permitiría utilizar directamente datos de la zona sin necesidad de realizar estimaciones con el riego en otras áreas.

Conclusiones

El acople SIG-GLEAMS permite determinar la cantidad de nitrato transportado hacia capas profundas del suelo en las parcelas dedicadas al cultivo de tomate en invernadero pertenecientes a varias cooperativas del Valle de La Aldea, al Oeste de Gran Canaria. La superficie total sometida a simulación asciende a 230 ha, aproximadamente un 50% de la superficie total cultivada en la zona en épocas de abundancia de agua.

Según la simulación realizada, las pérdidas de nitrato hacia las zonas profundas del suelo son bastante elevadas debido a la excesiva dosis de fertilizante mineral aplicado al cultivo. Aunque el método utilizado es fertirrigación, que mejora considerablemente la eficiencia del abonado, los altos requeri-

mientos de nutrientes del cultivo intensivo de tomate para obtener altas producciones conducen a que el agricultor aplique elevadas dosis de abono mineral nitrogenado, llegando incluso a superar los 800 kg N/ha/a. El nitrato lixiviado, que puede alcanzar hasta casi 500 kg N/ha/a en las zonas situadas principalmente en la parte noroccidental de la zona de estudio, representa casi el 37% del N aplicado. En consecuencia, es en esta zona donde se debería llevar un control más exhaustivo de las aportaciones de N en forma de fertilizante mineral y en el nitrato en agua de riego, aplicando de forma estricta el Código de Buenas Prácticas Agrarias, que limita el aporte de abono nitrogenado a 310-350 kg N/ha/a distribuidos mensualmente durante la cosecha (BOC, 2000). Otra posibilidad es utilizar un sistema de abonado más racional como el Nmin (Neeteson, 1995), en el que se tiene en cuenta el Nitrógeno mineral en el suelo antes del cultivo, el N aplicado en el agua de riego y la extracción por el cultivo.

El mapa obtenido ilustra de forma aproximada las zonas de mayor riesgo de contaminación del acuífero de La Aldea por nitrato debido a los cultivos de tomate en invernadero, dado que no ha sido posible realizar una calibración y validación del modelo a partir de datos reales en parcelas experimentales. Sin embargo, se considera que los resultados obtenidos reflejan el lixiviado producido en las parcelas analizadas.

La herramienta utilizada se considera que tiene una alta utilidad para la gestión agrícola que minimice el riesgo de contaminación de los acuíferos por nitrato procedente de las actividades agrarias y al mismo tiempo reduzca costes de producción de cultivo al reducir los aportes de fertilizante mineral nitrogenado. Se plantea, pues, la posibilidad de utilizar este tipo de metodología para determinar la cantidad de abonado óptima más acorde con el Código de Buenas Prácticas Agrarias, y que proporcione el menor lixiviado de nitrato hacia el acuífero particularmente para cada caso concreto de condición climática, suelo y práctica agraria. La aplicación continuada de estas cantidades de abonado óptimo permitirá a largo plazo disminuir la contaminación del acuífero, dadas las escasas posibilidades de poder realizar acciones de descontaminación del mismo.

Agradecimientos

Los trabajos presentados en esta comunicación se han llevado a cabo dentro del proyecto CICYT 1FD97-0525, financiado en parte por el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria; la Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias; el Exmo.

Ayuntamiento de San Nicolás de Tolentino; Coagrisan; Copaisan y Romertor. Agradecemos la colaboración desinteresada de Don Agustín Naranjo Cigala y Don Luis Hernández Calvento, profesores de la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y la colaboración de los Técnicos de las diferentes Cooperativas Agrarias. Agradecemos también los acertados comentarios realizados por los revisores.

Referencias

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. y Hackett, G. 1987. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. U.S. Environmental Agency, Ada, OK, EPA/600/2-87-036, 455 pp.
- Bakhsh A., Kanwar R.S., Jaynes D.B., Colvin T.S. y Ahuja L.R. 2000. Prediction of NO₃-N losses with subsurface drainage water from manured and UAN-fertilized plots using GLEAMS. *Trans ASAE* 43, 69-77.
- BOC- Boletín Oficial de Canarias (2000): *Orden de 27 de octubre de 2000, por la que se establece el Programa de Actuación a que se refiere el artículo 6 del Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, con el objeto de prevenir y reducir la contaminación causada por los nitratos de origen agrario*. BOC nº 149, 17276-17286.
- Cabrera, M.C., Muñoz, R., Poncela, R., Socorro, A.R., González, G. y Hernández, F. 1996. Metodología para el estudio de la contaminación por plaguicidas en la zona no saturada y el acuífero de Gran Canaria y Tenerife (Islas Canarias). (Methodologies to study the pesticide contamination in vadose zone and Gran Canaria and Tenerife aquifer). *Geogaceta*, 20 (6), 1288-1290.
- Cabrera, M.C., Delgado Mangas, F., Muñoz Sanz, J., Pérez Torrado, F.J. y La Moneda, E. 2000. Caracterización de las familias hidrogeoquímicas en el acuífero de La Aldea (Gran Canaria). (Characterization of hidrogeochemical families in La Aldea aquifer (Gran Canaria). *Geotemas*, 1(2), 47-50.
- Corwin D.L. 1996. GIS applications of deterministic solute transport models. En ASA-CSSA-SSSA: *"Applications of GIS to the modelling of non-point source pollutants in the vadose zone"*, Winconsin, Madison. Special publication 48, 69-100.
- Corwin D.L., Vaughan, P.J. y Loague, K. 1997. Modeling nonpoint source pollutants in the vadose zone with GIS. *Environmental Science and Technology*. 31(8), 2157-2175.
- Corwin, D.L., Loague, K. y Ellsworth, R. 1998. GIS-based modeling of non-point source pollutants in the vadose zone. *Journal of Soil Water Conservation*, 53, 34-38.
- De Paz, J.M. y Ramos, C. 2001. The use of a GIS-N model system to assess nitrate leaching in agricultural areas. *Acta of Horticulturae* 563, 225-231.
- De Paz, J.M. y Ramos, C. 2002. Linkage of a geographical information system with the GLEAMS model to assess

- nitrate leaching in agricultural areas. *Environmental Pollution*, 118 (2), 249-258.
- Donatelli M., Acutis, M. y Kosova, S. 1996. Evaluation of methods to estimate soil water content at field capacity and wilting point. (http://www.cahe.wsu.edu/~soilsim/research/SP_index.htm).
- Dukes, M.D. y Ritter W.F., 2000. Validation GLEAMS nutrient component for wastewater application in the Mid-Atlantic region. *Bioresource Technology* 74, 89-102.
- Foster, S. y Hirata, R. 1991. *Determinación del riesgo de contaminación en aguas subterráneas*. CEPIS, Lima, Peru, 81pp.
- Knisel, W.G. (ed) 1993. *GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems, Version 3.0*. University of Georgia, Coastal Plain Experiment Station, Biological and agricultural Engineering Department, Publication N°5, 260 pp.
- Minkara, M.Y., Wilhoit, J.H., Wood, C.W. y Yoon, K.S. 1995. Nitrate monitoring and GLEAMS simulation for poultry litter application to pine seedlings. *Trans ASAE* 38, 147-152.
- Muñoz, R., Cabrera, M.C., Hernández, F. y Socorro, A.R. 1996. Development of Analytical and Sampling Methods for Priority Pesticides and Relevant Transformation Products in Aquifers. *Final Project Report. EU Contract EV5V-CT93-0322-Group 4*. 87 pp. + Appendix.
- Muñoz, J., Cabrera, M.C., Antón, A. y Pérez Torrado, F.J. 2002. Efectos del uso de aguas subterráneas para riego en el acuífero de La Aldea (Gran Canaria). *XXXII Congreso de la AIH y VI Congreso de ALHSUD: Aguas subterráneas y desarrollo humano*. Libro de abstracts, 462-471.
- National Research Council US (NRC).1993. Groundwater vulnerability assessment-predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. In: *Committee on Techniques for Assessing Groundwater Vulnerability*. National Research Council, National Academy Press, Washington DC. 204 pp.
- Neeteson, J.J. 1995. Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. En P.E. Bacon (ed): *Nitrogen fertilization in the Environment*. Marcel Dekker, Inc., New York, 295-325.
- Sánchez Díaz, J. (1975): Caracterización y distribución de los suelos en la Isla de Gran Canaria. (Characterization and distribution of soils in Gran Canaria Island). *Tesis Doctoral*, Universidad de La Laguna (Tenerife).
- Sánchez Díaz, J. y Ríos, C. 1995. *Cartografía del potencial del medio natural de Gran Canaria*. Cabildo Insular de Gran Canaria, Universidad de Valencia y Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- SPA-15. 1975. *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515)*. (Scientific study of water resources in Canary Islands). Minist. Obras Públ, Dir. Gral. Obr. Hidr. UNESCO.Las Palmas de Gran Canaria, Madrid. 3 vol.+ mapas.
- Stone, K.C., Hunt, P.G., Johnson, M.H. y Coffey, S.W., 1998. GLEAMS simulation of groundwater nitrate-N from row crop and swine wastewater spray fields in the eastern coastal plain. *Trans ASAE* 41, 51-57.
- Tim, U.S. 1996. Coupling vadose zone models with GIS: Emerging trends and potential bottlenecks. *Journal of Environmental Quality*, 25, 535-544.
- Webb, T.H., Lilburne, L.R. y Francis, G.S. 2001. Validation of GLEAMS simulation model for estimating net nitrogen mineralisation and nitrate leaching under cropping in Canterbury, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research*, 39, 1015-1025.

Recibido: Enero 2003

Aceptado: Junio 2003