

# SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA ESCORRENTÍA Y LA EROSIÓN *en agricultura*

La simulación numérica en dos dimensiones permite reproducir cómo se mueve el agua sobre la superficie de una parcela y cómo arrastra el suelo fértil. Estas herramientas ayudan a anticipar encharcamientos y pérdidas de tierra, ofreciendo a agricultores y técnicos nuevas formas de planificar medidas de conservación de suelos y evitar pérdidas de productividad.

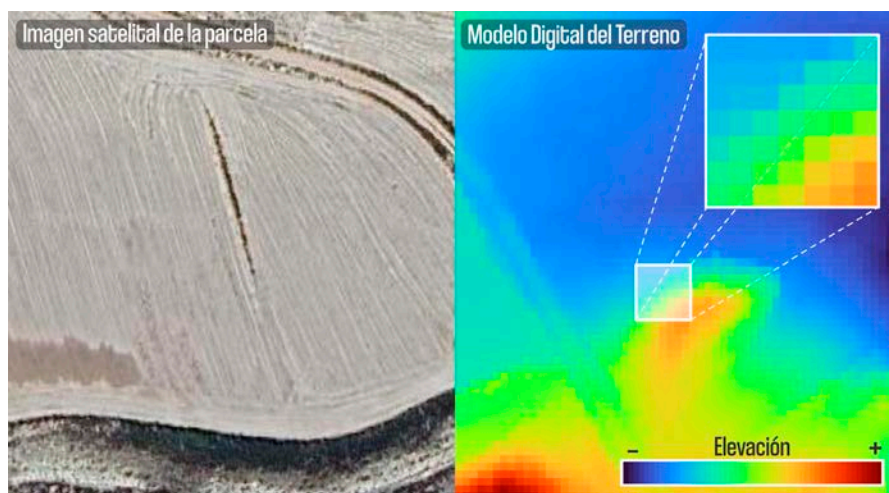
JAVIER FERNÁNDEZ-PATO<sup>1,2</sup>, NERY ZAPATA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Estación Experimental Aula Dei (EEAD)-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

<sup>2</sup>Fundación ARAID

Cada gota de lluvia que cae sobre una parcela agrícola inicia un pequeño viaje. Puede infiltrarse en el suelo y alimentar a los cultivos, quedarse temporalmente encharcada en los puntos bajos del terreno o correr pendiente abajo hasta salir de la finca. En ese camino puede arrastrar partículas de tierra, nutrientes y fertilizantes, generando un problema mucho mayor que la simple pérdida de agua: la erosión del terreno. La erosión agrícola ocurre cuando el agua de lluvia se lleva la capa más fértil del suelo, aquella que concentra los nutrientes y la materia orgánica. Esto hace que los suelos cultivables sean menos productivos y favorece problemas como la salinización o la compactación. Al mismo tiempo, el material arrastrado acaba depositándose en ríos, embalses y canales de riego, donde reduce su capacidad y dificulta el aprovechamiento del agua (García-Ruiz *et al.*, 2015).

Para cualquier agricultor, estas dinámicas son familiares. Tras una tormenta intensa aparecen surcos marcados en el terreno, charcos en



**FIGURA 1**

Imagen satelital de una finca agrícola y superposición con el modelo digital de terreno, donde se divide la parcela en pequeños cuadrados a los que se les asigna una única elevación del terreno.

las zonas bajas o manchas de barro en caminos y acequias. Son señales visibles de que el agua no se ha quedado donde debía y de que el suelo fértil puede haberse perdido en cuestión de minutos.

En las últimas décadas la agricultura se enfrenta a una doble presión. Por un lado, la necesidad de producir

más alimentos en menos superficie. Por otro, la obligación de hacerlo con menos agua disponible y bajo un clima cada vez más extremo, con lluvias torrenciales y sequías prolongadas. En este contexto, contar con herramientas que permitan anticipar cómo se moverá el agua en la parcela se vuelve fundamental.

La simulación numérica bidimensional (2D) ofrece una respuesta innovadora. Mediante programas informáticos desarrollados a medida y capaces de resolver ecuaciones hidráulicas complejas, es posible reproducir en la pantalla del ordenador lo que sucede en el campo cuando llueve con una precisión inimaginable hace unos pocos años: dónde se acumula el agua, por dónde circula, cuánto se infiltra y qué cantidad de suelo arrastra (García-Navarro *et al.*, 2019; Martínez-Aranda *et al.*, 2022). Es como disponer de un ensayo general de la lluvia antes de que caiga, un laboratorio virtual donde probar soluciones sin tener que esperar a la siguiente tormenta.

### Escorrentía superficial en parcelas

Las lluvias intensas son cada vez más frecuentes en climas mediterráneos y semiáridos. Cuando la intensidad de precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo, el exceso de agua se transforma en escorrentía. El resultado son encharcamientos en las partes bajas, pérdidas de nutrientes solubles y, en algunos casos, daños directos en los cultivos por asfixia radicular. Aunque el agua que corre por una parcela parece obedecer a un patrón caótico, en realidad responde a leyes físicas muy bien conocidas. Siempre fluye de las zonas altas a las bajas, busca el camino más favorable y en su trayecto interactúa con la topografía del terreno, la rugosidad y la capacidad de infiltración del suelo o la vegetación, entre otros factores. La simulación numérica en dos dimensiones consiste en trasladar esas leyes a un modelo que divide la parcela en pequeñas celdas de cálculo, normalmente obtenidas a partir de un modelo digital de terreno (Figura 1). Cada una de esas celdas tiene características propias: elevación, textura del suelo, cobertura vegetal, etc. El modelo trabaja independientemente en cada una de ellas y calcula en cada instante de tiempo cómo se reparte el agua de lluvia (o de un exceso de riego) entre infiltración, almacenamiento y

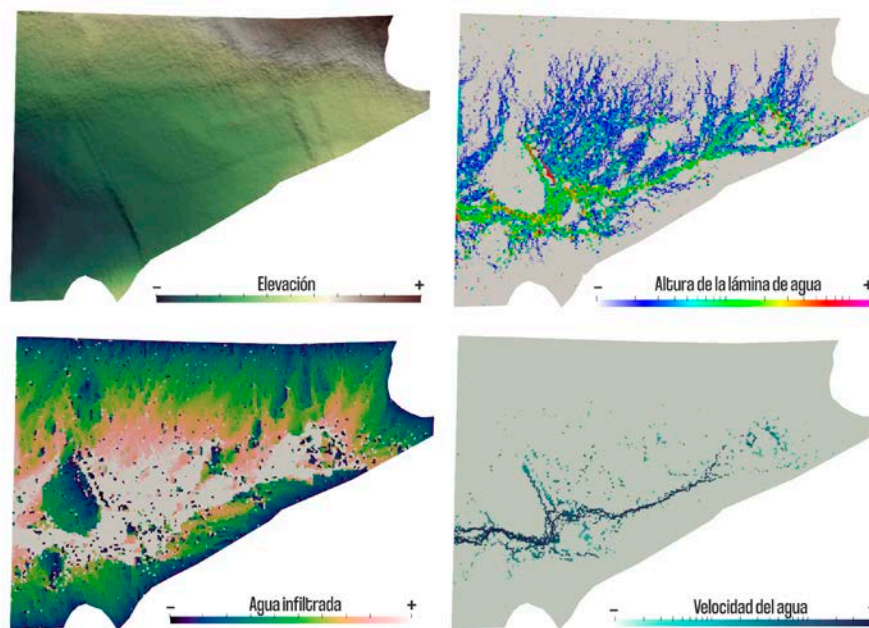


FIGURA 2

Ejemplo de resultados numéricos obtenidos de la simulación de una finca agrícola sometida a un evento de lluvia. En cada punto de la finca se pueden obtener valores instantáneos de la altura del agua superficial, cantidad de agua infiltrada y velocidades del agua, entre otras variables.

escorrentía hacia las celdas vecinas. Así se obtiene un mapa dinámico de la parcela que muestra no solo cuánta agua hay, sino también hacia dónde se mueve y con qué velocidad o cuánta agua se ha infiltrado en el suelo (Figura 2).

La gran diferencia respecto a los métodos tradicionales, basados en balances globales, es que el enfoque bidimensional capta la variabilidad espacial. No se limita a decir “en esta parcela se infiltrarán quince milímetros y se perderán cinco como escorrentía”, sino que localiza con precisión dónde se concentran esas pérdidas: quizás en un rincón concreto o a lo largo de una línea de máxima pendiente.

La simulación en 2D se convierte en una herramienta muy útil para que el agricultor evalúe los riesgos de daños localizados que puedan comprometer el rendimiento de la finca y se anticipe a ellos. Antes de invertir en drenes, caballones o setos de retención, el agricultor o el técnico pueden comprobar virtualmente cuál sería su eficacia a la hora de reconducir el agua. Del mismo modo, es posible compa-

rar el comportamiento de un suelo desnudo frente a otro con cubierta vegetal y cuantificar las diferencias en acumulación de agua.

### Erosión del suelo y transporte de sedimentos

La erosión es uno de los enemigos silenciosos de la agricultura. Cada año se pierden millones de toneladas de suelo fértil, lo que reduce la productividad y colmata embalses y canales. En una parcela agrícola, perder apenas dos milímetros de suelo por año equivale a unas veinte toneladas por hectárea, una pérdida que a simple vista puede parecer insignificante pero que, acumulada a lo largo del tiempo, resulta devastadora.

Los signos visibles como surcos, cárcavas o acumulaciones de barro en los caminos, son solo la parte más evidente del problema (Figura 3). En realidad, la erosión supone también la pérdida de nutrientes, la disminución de la capacidad de retención de agua y una mayor vulnerabilidad de los cultivos frente a la sequía. Cuando la capa fértil desaparece, el suelo se



**FIGURA 3**

Ejemplo de surco generado por erosión del terreno a causa de la escorrentía superficial en una parcela agrícola.

empobrece y se vuelve más difícil de manejar, lo que compromete la sostenibilidad a largo plazo de la parcela. Los modelos de erosión en 2D permiten dar un paso más allá. Combinan la dinámica de la escorrentía superficial con ecuaciones que describen cómo las partículas de suelo se desprenden y son arrastradas en función de la velocidad del flujo y de las propiedades del terreno (estructura, textura, compactación, cobertura vegetal, etc.). De esta forma, no solo muestran por dónde fluye el agua, sino también cuánto suelo se lleva consigo y dónde acaba depositado.

Este tipo de herramientas permite a agricultores y técnicos responder preguntas clave para la gestión de sus parcelas, como, por ejemplo: ¿qué diferencia hay en la pérdida de suelo entre el laboreo convencional y el mínimo laboreo? ¿Cómo varía la erosión si se siembra en curvas de nivel en lugar de hacerlo en línea recta? ¿Cuál es la eficacia real de una terraza, un seto o una franja de vegetación protectora? Los resultados de estas simulaciones ofrecen una base objetiva para tomar decisiones que antes se apoyaban solo

en la experiencia. Con ellas es posible anticipar los beneficios de las prácticas de conservación y cuantificar, en números y mapas, el impacto de cada medida sobre la pérdida de suelo y la calidad del agua.

### Bibliografía

[García-Ruiz et al., 2015] José M. García-Ruiz, Santiago Beguería, Estela Nadal-Romero, José C. González-Hidalgo, Noemí Lana-Renault, Yasmina Sanjuán (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology* 239, 160-173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>

[García-Navarro et al., 2019] García-Navarro, P., Murillo, J.; Fernández-Pato, J.; Echeverribar, I.; Morales-Hernández, M. (2019). The shallow water equations and their application to realistic cases. *Environmental Fluid Mechanics* 19, 1235-1252. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-09657-7>

[Martínez-Aranda et al., 2022] Martínez-Aranda, S.; García-Navarro, P. (2022). Efficient Simulation Tools (EST) Sediment-Laden for Shallow

## RETOS Y FUTURO

Aunque las ventajas son claras, todavía existen barreras para que estas herramientas se generalicen. Se necesita información detallada sobre el terreno y el suelo, y aunque hoy los drones y satélites facilitan estos datos, no siempre están disponibles con el nivel de detalle necesario. Los modelos también requieren cierta potencia de cálculo y formación técnica para su uso.

Sin embargo, la tendencia apunta a una adopción creciente, incorporando estos modelos a plataformas web y aplicaciones móviles que simplifican la simulación y la acercan a técnicos y comunidades de regantes. Además, la integración con predicciones meteorológicas abre la puerta a simulaciones en tiempo real, adaptadas a cada parcela y cada tormenta.

La simulación 2D no sustituye la experiencia del agricultor, sino que la complementa. Permite comprobar en cuestión de minutos lo que de otro modo solo se vería tras años de observación y ensayo. Nos ofrece la posibilidad de anticipar y comprender los procesos del agua con un nivel de detalle hasta hace poco impensable. Cada parcela, cada cultivo y cada tormenta son distintos, pero un modelo 2D permite transformar la incertidumbre en conocimiento, y el conocimiento en decisiones más seguras.

Gestionar bien el agua y el suelo no es solo un deber ambiental, es también una inversión directa en el futuro de la agricultura. La simulación nos ofrece la oportunidad de ver lo invisible y de actuar antes de que la próxima tormenta nos recuerde, con surcos y pérdidas, lo valioso que es cada centímetro de tierra fértil.

*Flows Book Chapter, In: Modeling of Sediment Transport, IntechOpen Limited, London. ISBN: 978-1-80355-868-4, 2022.*

# SUSCRÍBETE A NUESTRA REVISTA



Descubre mes a mes lo más relevante de la actualidad agrícola de mano de la publicación de referencia en el país: Agricultura.

Entre sus secciones los agricultores, técnicos y profesionales del medio rural encontrarán la información más trascendente para su actividad, llegando a su vez a todos los rincones del campo español.

/ 11 NÚMEROS / AÑO

ESPAÑA  
**70€**

EUROPA  
**100€**

RESTO  
**150€**

Por cada suscripción anual a **Agricultura**, tendrás derecho a un VALE DE 50€, a canjear por libros de la editorial en el Kiosko Agrario (gastos de envío incluidos en la promoción)\*.

\*Condiciones de la promoción:

- Promoción válida únicamente para suscriptores de pago en territorio peninsular.
- Promoción válida únicamente para suscriptores directos (que no reciban la revista a través de librerías, agencias de suscripción, etc.).
- Cheque a canjear por cualquier libro de la editorial (sujeto a fin de existencias y no siendo válidos los libros de otros fondos editoriales que distribuye la editorial a través de su página web [www.editorialagricola.com](http://www.editorialagricola.com))
- El cheque podrá canjearse a partir de 50 días hábiles desde la domiciliación del recibo (en caso de pago por banco) y únicamente durante el año de la suscripción.

 **grupo hénar  
comunicación**

Para más información: [libreria.editorialagricola.com](http://libreria.editorialagricola.com) / Tlf. 91 521 16 33 / [administracion@editorialagricola.com](mailto:administracion@editorialagricola.com)