

Rainfall-Induced Terrain Erosion Simulation Using a Static Agent-Based Model

Santiago Santana Martínez

Máster en Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI)

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

santiago.santana115@alu.ulpgc.es

Resumen—Este trabajo presenta un modelo basado en agentes estáticos para simular la erosión del terreno provocada por lluvia, incorporando procesos de transporte, deposición y pérdida de sedimento en los bordes del dominio. Se propone un criterio de estabilización basado en la evolución temporal de la altura media y su varianza, y se analizan distintos regímenes de precipitación y erosión mediante experimentos controlados.

I. INTRODUCTION

La erosión del terreno inducida por la lluvia es un proceso geomorfológico complejo que resulta de la interacción entre el relieve, el flujo de agua y la redistribución de sedimentos. La modelización de estos fenómenos es relevante tanto en estudios medioambientales como en simulaciones de paisaje, gestión de cuencas y análisis de estabilidad del terreno.

Los modelos basados en agentes, y en particular aquellos centrados en parches estáticos, permiten representar de forma explícita la interacción local entre celdas del terreno, facilitando la incorporación de reglas simples que generan dinámicas emergentes a escala global. Este trabajo explora un modelo de este tipo implementado en *NetLogo*, centrado en la evolución temporal del relieve bajo ciclos de lluvia y evaporación.

II. STATE OF THE ART

Diversos trabajos han abordado la simulación de procesos de erosión mediante modelos discretos. En [1], se presentan modelos celulares para la evolución del paisaje bajo procesos fluviales. Otros enfoques emplean modelos basados en agentes o autómatas celulares para capturar la dinámica local del transporte de sedimentos [2].

El uso de criterios de estabilización basados en estadísticas globales ha sido aplicado en sistemas dinámicos y modelos complejos para detectar estados estacionarios o quasi-estacionarios [3]. En el contexto de modelos ambientales, métricas como la altura media y la varianza del relieve proporcionan indicadores robustos de convergencia del sistema.

III. CHALLENGE

El principal reto abordado en este trabajo consiste en definir un criterio objetivo y reproducible para determinar cuándo un sistema de erosión basado en reglas locales alcanza un estado estabilizado. A diferencia de modelos continuos, los sistemas discretos presentan fluctuaciones persistentes debidas a la aleatoriedad del entorno y a la naturaleza local de las interacciones.

Asimismo, resulta necesario evitar comportamientos no físicos, como la acumulación ilimitada de sedimento o el crecimiento artificial de la altura media del terreno.

Para ello, se introducen un nivel base no erosionable y condiciones de contorno tipo sumidero que permiten la pérdida de agua y sedimento por los bordes del dominio.

IV. EXPERIMENTATION

Esta sección describe el diseño experimental y la implementación del modelo de erosión empleado para analizar la evolución del terreno bajo distintos regímenes de precipitación, erosión y deposición. El objetivo es caracterizar el comportamiento dinámico del sistema, su estabilidad temporal y la influencia de los parámetros físicos considerados.

IV-A. Experimental Design

El entorno se modela como una cuadrícula bidimensional de parches que representan celdas del terreno. Cada parche $p_{i,j}$ se caracteriza por un conjunto de variables de estado:

- Altura del terreno $h_{i,j}(t)$.
- Cantidad de agua superficial $w_{i,j}(t)$.
- Sedimento acumulado $s_{i,j}(t)$.
- Coeficiente local de erosionabilidad $k_{i,j}$.

La dinámica del sistema se rige por la interacción de los siguientes procesos físicos discretizados:

- Precipitación periódica.
- Erosión dependiente de la pendiente local.
- Transporte de agua y sedimento hacia parches vecinos de menor altura.
- Deposición proporcional al sedimento transportado.
- Evaporación del agua.
- Condiciones de contorno ‘sumidero’ en los bordes del dominio.

La pendiente local entre dos parches vecinos se define como:

$$\nabla h_{i,j \rightarrow m,n}(t) = h_{i,j}(t) - h_{m,n}(t), \quad (1)$$

y gobierna tanto el flujo de agua como la capacidad erosiva del sistema.

La erosión en un parche se modela como:

$$\Delta h_{i,j}^{eros}(t) = -k_{i,j} \cdot w_{i,j}(t) \cdot \max(0, \nabla h), \quad (2)$$

mientras que la deposición se define de forma proporcional al sedimento transportado:

$$\Delta h_{i,j}^{dep}(t) = \alpha \cdot s_{i,j}(t), \quad (3)$$

donde α es un coeficiente de deposición.

Se diseñan tres experimentos diferenciados, cada uno con un conjunto fijo de parámetros asociados a precipitación, erosión y deposición. Para cada experimento se realizan diez ejecuciones independientes, variando únicamente

la semilla aleatoria, con el fin de analizar la variabilidad inducida por el carácter estocástico del sistema.

El sistema se considera estabilizado en el primer instante temporal t_s tal que, durante una ventana temporal deslizante de tamaño W , las desviaciones medias de la altura media $\mu_h(t)$ y de la varianza $\sigma_h^2(t)$ cumplen:

$$|\mu_h(t) - \mu_h(t - \tau)| < \varepsilon_\mu, \quad |\sigma_h^2(t) - \sigma_h^2(t - \tau)| < \varepsilon_\sigma, \quad (4)$$

para todo $\tau \in [0, W]$.

Las hipótesis que guían la experimentación son:

- **H1:** Un aumento de la tasa de precipitación reduce el tiempo hasta la estabilización del sistema.
- **H2:** Mayores tasas de erosión incrementan la varianza del terreno en el estado estabilizado.
- **H3:** Regímenes con mayor deposición tienden a conservar mayores alturas medias finales.

IV-B. Implementation

El modelo se ha implementado en *NetLogo* utilizando entidades de tipo *patch* para representar el terreno. Cada parche almacena sus variables locales de altura, agua y sedimento, que se actualizan de forma síncrona en cada iteración del modelo.

En cada tick de simulación se ejecutan secuencialmente las siguientes fases:

1. Aplicación de la precipitación.
2. Cálculo de pendientes locales.
3. Erosión del terreno en función del agua y la pendiente.
4. Transporte de agua y sedimento hacia parches vecinos más bajos.
5. Depósito del sedimento transportado.
6. Evaporación del agua.
7. Aplicación de condiciones de contorno absorbentes.

Las condiciones de contorno se implementan mediante parches sumidero en los bordes del dominio. Cuando el agua o el sedimento alcanzan un parche de borde, ambos son eliminados del sistema, evitando acumulaciones artificiales y permitiendo una pérdida neta de masa coherente con sistemas abiertos reales.

En cada ejecución se registran las siguientes métricas globales:

- Tiempo de estabilización t_s .
- Altura media del terreno en estabilización μ_h .
- Varianza de la altura del terreno σ_h^2 .
- Agua media acumulada A_w .

Estas métricas permiten caracterizar la evolución temporal del sistema, así como comparar de forma sistemática el comportamiento de los distintos regímenes experimentales.

V. RESULTS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los tres escenarios experimentales. Cada experimento se ha ejecutado un total de diez veces, manteniendo los parámetros del escenario fijos y variando únicamente la semilla aleatoria de la simulación.

Para cada ejecución se han registrado el tiempo hasta la estabilización del sistema t_s , la altura media del terreno, la varianza de la altura y el agua media acumulada. Estos resultados permiten analizar tanto el comportamiento

medio del sistema como su variabilidad entre ejecuciones, así como contrastar las hipótesis planteadas.

V-A. Experiment 1

El primer experimento representa un régimen de precipitación moderada, con tasas equilibradas de erosión y deposición. Este escenario sirve como caso base para analizar la dinámica de erosión del terreno bajo condiciones hidrológicas estables.

En este régimen, el sistema alcanza la estabilización tras un número elevado de iteraciones, reflejando una evolución progresiva del relieve. La altura media del terreno se mantiene relativamente constante entre ejecuciones, mientras que la varianza indica la aparición gradual de heterogeneidad topográfica. El agua media acumulada permanece en valores moderados, coherentes con el régimen de lluvia impuesto.

La Tabla I recoge los resultados cuantitativos de las diez ejecuciones del Experimento 1.

t_s	μ	σ	A_w
578	4.8438	31.9820	0.6255
593	5.1131	34.2779	0.6282
553	4.8481	33.6031	0.6038
655	4.5583	31.1683	0.6228
523	4.8457	32.2744	0.6277
929	4.1441	29.1941	0.6047
789	4.3877	31.3570	0.6440
880	4.2971	30.0354	0.6171
688	4.3911	28.4920	0.6465
625	4.8781	33.9734	0.5946

Cuadro I
RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 1.

La evolución temporal de la altura media del terreno, la varianza y el agua acumulada puede observarse en la figura 1.

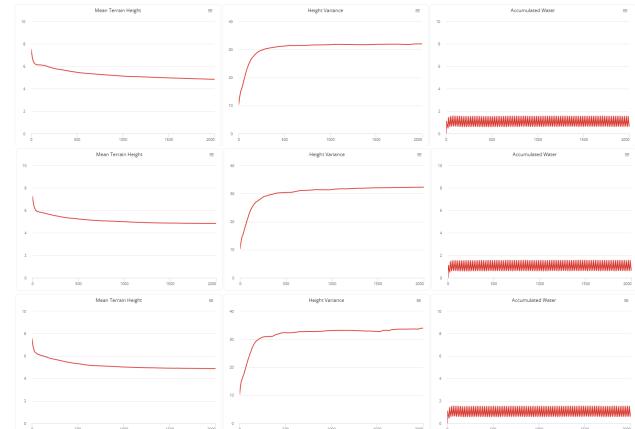


Figura 1. Evolución temporal del Experimento 1 (ejecuciones 1, 5 y 10).

V-B. Experiment 2

En el segundo experimento se incrementa la tasa de precipitación y la intensidad del proceso erosivo, manteniendo una tasa de deposición moderada. Este escenario pretende analizar el efecto de una mayor disponibilidad de agua sobre la dinámica erosiva y el tiempo necesario para alcanzar la estabilización del sistema.

Bajo estas condiciones, el sistema alcanza el estado estacionario de forma más temprana que en el experimento

anterior. La altura media final del terreno es inferior, reflejando una mayor pérdida neta de material debido al aumento de la erosión. La varianza de la altura se mantiene elevada, indicando una mayor heterogeneidad topográfica, mientras que el agua media acumulada presenta valores notablemente superiores.

La Tabla II resume los resultados de las diez ejecuciones del Experimento 2.

t_s	μ	σ	A_w
508	3.3120	24.1028	1.3582
353	3.3608	25.1588	1.3045
503	3.5748	25.9775	1.3230
514	3.4130	25.0997	1.3518
559	3.4582	25.4520	1.3112
495	3.3574	24.2261	1.2972
519	3.6519	26.3203	1.2949
509	3.5065	26.1560	1.3017
652	3.8104	26.5014	1.2732
437	3.6111	25.5267	1.2946

Cuadro II
RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 2.

La evolución temporal de la altura media del terreno, la varianza y el agua acumulada, para el experimento dos, puede observarse en la figura 2.

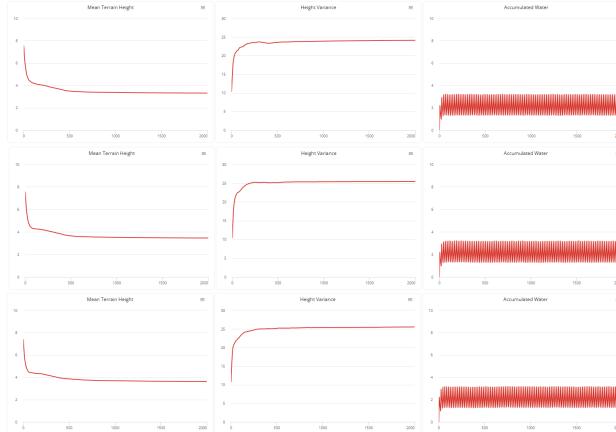


Figura 2. Evolución temporal del Experimento 2 (ejecuciones 1, 5 y 10).

V-C. Experiment 3

El tercer experimento se caracteriza por una tasa de precipitación reducida y una deposición elevada, con el objetivo de evaluar la capacidad del sistema para conservar material y mantener alturas medias superiores en un régimen dominado por procesos acumulativos.

En este escenario, el tiempo hasta la estabilización presenta una mayor dispersión entre ejecuciones, reflejando una dinámica más sensible a las condiciones iniciales. La altura media final del terreno alcanza valores superiores a los observados en los experimentos anteriores, mientras que la varianza se mantiene elevada, indicando la formación de estructuras topográficas persistentes. El agua media acumulada es significativamente menor, coherente con el menor aporte hídrico del sistema.

Los resultados obtenidos para el Experimento 3 se recogen en la Tabla III.

t_s	μ	σ	A_w
596	5.2314	32.4211	0.2057
854	5.3436	35.3796	0.2071
527	5.4960	34.6760	0.1987
673	5.2114	32.4917	0.2095
651	5.1465	33.1052	0.2033
607	4.9695	32.2418	0.2027
545	5.0672	32.1645	0.2093
955	4.7673	31.7432	0.2036
634	5.0541	30.0381	0.2141
597	5.1538	33.8019	0.1984

Cuadro III
RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 3.

La figura 3 muestra la evolución temporal de las métricas principales para las ejecuciones 1, 5 y 10 del experimento tres.

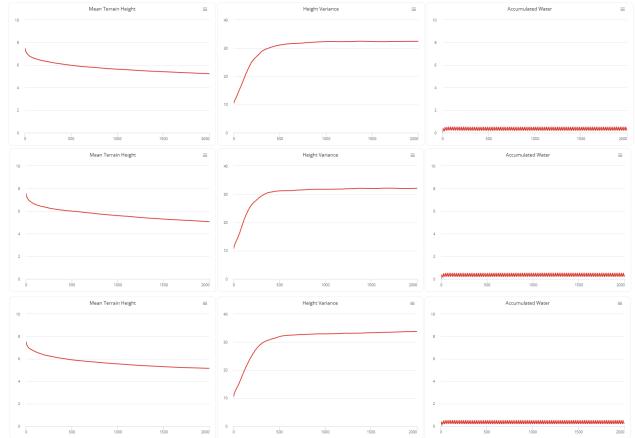


Figura 3. Evolución temporal del Experimento 3 (ejecuciones 1, 5 y 10).

VI. DISCUSSION

Los resultados obtenidos permiten analizar de forma comparativa el comportamiento del sistema bajo distintos regímenes de lluvia y geomorfológicos, así como evaluar las hipótesis planteadas anteriormente. A pesar de la simplicidad del modelo, las dinámicas observadas muestran coherencia con procesos erosivos reales y ponen de manifiesto la influencia dominante de la precipitación, la erosión y la deposición en la evolución del relieve.

En relación con la hipótesis **H1**, los experimentos confirman que un incremento en la tasa de precipitación reduce el tiempo hasta la estabilización del sistema. En el Experimento 2, caracterizado por un régimen de lluvia más intenso, el sistema alcanza el estado estacionario de forma sistemáticamente más temprana que en el Experimento 1. Este comportamiento puede explicarse por una aceleración de los procesos erosivos y de redistribución del material, que conducen más rápidamente a una configuración en la que las variaciones topográficas se amortiguan.

La hipótesis **H2** también se ve respaldada por los resultados. El aumento de la tasa de erosión en el Experimento 2 produce valores de varianza de la altura superiores, indicando un relieve más irregular y fragmentado. Este incremento de la heterogeneidad topográfica es coherente con una mayor capacidad del flujo de agua para incidir sobre las pendientes locales, profundizando zonas bajas y acentuando contrastes de altura.

Por su parte, la hipótesis **H3** se confirma al analizar el Experimento 3, dominado por procesos de deposición. En

este escenario, la altura media final del terreno alcanza valores superiores a los de los experimentos anteriores, lo que sugiere una mayor conservación del material erosionado dentro del dominio. La menor cantidad de agua acumulada reduce la capacidad de transporte, favoreciendo la deposición local y la estabilización de estructuras topográficas persistentes.

Un aspecto relevante observado en los tres experimentos es la variabilidad entre ejecuciones, incluso bajo parámetros idénticos. Esta dispersión pone de manifiesto la sensibilidad del sistema a las condiciones iniciales y refuerza la necesidad de realizar múltiples ejecuciones independientes para caracterizar adecuadamente el comportamiento medio del modelo. En este sentido, el criterio de estabilización basado en una ventana temporal y umbrales estadísticos resulta fundamental para evitar falsas detecciones de equilibrio debidas a fluctuaciones transitorias.

Finalmente, cabe destacar que, aunque el modelo no pretende reproducir procesos físicos con gran precisión, sí logra capturar dinámicas relevantes, como la relación entre precipitación y erosión, la formación de heterogeneidad topográfica y la existencia de estados estacionarios dependientes del régimen de lluvia. Esto refuerza el valor de los modelos basados en agentes estáticos como herramientas exploratorias para el estudio de sistemas geomorfológicos complejos.

VII. CONCLUSION

En este trabajo se ha presentado un modelo de agentes estáticos para la simulación de la erosión del terreno inducida por lluvia, implementado sobre una cuadrícula bidimensional de parches. A partir de reglas locales simples que modelan precipitación, erosión, transporte, deposición y evaporación, el sistema es capaz de generar dinámicas globales coherentes y estados estacionarios dependientes de los parámetros físicos considerados.

Los resultados experimentales muestran que el modelo responde de forma consistente a distintos regímenes de lluvia. En particular, se ha observado que un aumento de la precipitación y de la tasa de erosión acelera la estabilización del sistema y favorece la aparición de relieves más heterogéneos, mientras que regímenes dominados por deposición tienden a conservar mayores alturas medias finales. Estas observaciones permiten validar las hipótesis planteadas y refuerzan la utilidad del enfoque propuesto como herramienta exploratoria.

Un aspecto clave del trabajo es la definición de un criterio de estabilización basado en métricas estadísticas globales y una ventana temporal deslizante. Este enfoque permite detectar de forma robusta el instante de estabilización del sistema, evitando interpretaciones erróneas debidas a fluctuaciones transitorias y proporcionando una base cuantitativa para la comparación entre escenarios.

Como líneas de trabajo futuro, se propone la extensión del modelo mediante la incorporación de heterogeneidad espacial en los parámetros del terreno, procesos tectónicos y esquemas de transporte más realistas. Asimismo, una comparación con modelos continuos basados en ecuaciones diferenciales permitiría evaluar en mayor profundidad las ventajas y limitaciones del enfoque discreto empleado. En conjunto, este trabajo demuestra que los modelos de agentes estáticos constituyen una aproximación válida y

flexible para el estudio de fenómenos geomorfológicos complejos.

REFERENCIAS

- [1] A. B. Murray, "A cellular model of braided rivers," *Nature*, vol. 415, no. 6873, pp. 287–290, 2002.
- [2] T. J. Coulthard, "Computational modelling of river catchments," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 38, no. 15, pp. 1901–1916, 2013.
- [3] W. R. Ashby, *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall, 1956.

APÉNDICE

El código completo de la simulación, incluyendo la implementación del modelo en *NetLogo*, la definición de los escenarios experimentales y las métricas utilizadas en el análisis, se encuentra disponible públicamente en el siguiente repositorio de GitHub:

<https://github.com/Tiago1615/CI-Agentes-Estaticos>

El repositorio incluye instrucciones para la ejecución del modelo, así como los archivos necesarios para reproducir los resultados presentados en este trabajo.