

XXXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA MEDELLÍN-COLOMBIA OCTUBRE 01-04 2024

INFLUENCIA DEL REACONDICIONAMIENTO Y ESCALADO ESPACIAL DE PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS EN MODELACIÓN

Nicolás CORTÉS-TORRES¹, Gloria VIGNES², David DE LEON PÉREZ³, Sergio SALAZAR⁴, Félix FRANCES⁵.

^{1,2,3,5} Universitat Politècnica de València, España

email: ncortor@doctor.upv.es

email: gvignes@upv.edu.es

email: ddeleo1@doctor.upv.es

email: ffrances@upv.es

⁴ Universidad Pablo de Olavide, España

email: ssalgal@upo.es

RESUMEN

El estudio se centra en evaluar la influencia del cambio de escala espacial y el reacondicionamiento de Modelos Digitales de Elevación (DEM) en la modelación hidrológica distribuida, utilizando los ríos Po en Europa y Tugela en África como casos de estudio. La investigación analiza cómo la variación en la resolución espacial de los DEM, en diferentes escalas (30, 200, 500, 1000, 2500 y 5000 metros), afecta parámetros clave como direcciones de flujo, pendiente, velocidad de flujo en ladera, así como también analizar las alteraciones que pueden generarse en la producción de escorrentía. Para ello, se emplearon diferentes escenarios: sin reacondicionamiento (escenario base), con reacondicionamiento a nivel local y global.

Los resultados muestran que la escala espacial y el reacondicionamiento influyen significativamente en la determinación de parámetros hidrológicos, aumentando las alteraciones. En el caso del río Tugela, el área de la cuenca varió desde 28,955 km² a 31,225 km² al pasar de una escala de 30 a 5000 metros. En cuanto a las direcciones de flujo, las alteraciones alcanzaron hasta un 59.4% para la cuenca del Tugela en la escala de 2500 metros bajo el reacondicionamiento local. Además, el caudal máximo simulado disminuyó en promedio un 15.52% en el Tugela y un 22.53% en el Po con el aumento de la escala espacial, lo que refleja la importancia de la escala y el reacondicionamiento en la precisión de la modelación hidrológica.

1. Introducción

En la actualidad la modelación hidrológica ambiental distribuida es una herramienta fundamental para gestionar el recurso hídrico al ser capaz de proporcionar una visión anticipada de los procesos en cuencas. En este contexto, los Modelos Digitales de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) son fundamentales para obtener parámetros necesarios en la modelización, tales como el mapa de direcciones de flujo, los flujos acumulados, la pendiente y la velocidad de flujo en ladera. En este aspecto, la escala espacial impacta la conceptualización, parametrización y cálculo de procesos y así como en la interacción entre variables. (Blöschl & Sivapalan, 1995; Olaya Ferrero, 2004; Kumar et al., 2010; Barrios Peña, 2011).

Este trabajo busca comparar el grado de influencia del cambio de escala espacial en la obtención de los parámetros derivados del DEM, considerando protocolos de modelación sugeridos a nivel mundial con respecto a su reacondicionamiento a partir de mapas vectoriales de los cauces naturales.

2. Materiales y métodos

En línea con el objetivo propuesto, se definieron dos casos de estudios, el primero en el río Po y el segundo el río Tugela, ubicados en Europa y África respectivamente (Ver Figura 1). Para el DEM, la resolución espacial base seleccionada fue tamaños de celda de 30 metros (escala S1) proveniente del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), y se escaló a resoluciones de celda de 200, 500, 1000 y 5000 metros (escalas S2). Para el análisis del reacondicionamiento, se utilizaron mapas vectoriales de cauces provenientes de diversas fuentes; a nivel global desde el proyecto HydroSHEDS y a nivel local dos autoridades regionales tal como: el Departamento de Asuntos Hídricos y Silvicultura para la cuenca del río Tugela y la Autoridad de Cuenca del Distrito del Río Po. Se plantearon 3 escenarios de análisis: (i) una línea base sin reacondicionamiento del DEM [B]; (ii) con reacondicionamiento de nivel local [L]; y (iii) con reacondicionamiento de nivel global [G], generando un total de 18 escenarios para cada área de estudio.

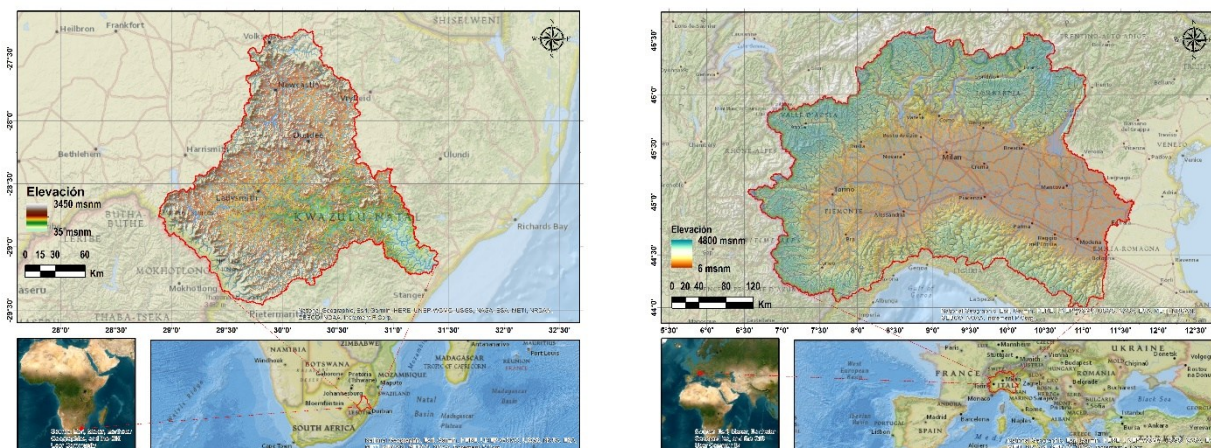


Figura 1. Mapas de localización de los casos de estudio. Izquierda cuenca del río Po, ubicado en Europa. Derecha, cuenca del río Tugela, ubicado en África.

Una vez obtenidos los modelos digitales de elevación a la escala de trabajo base S1, se empleó el software de información geográfica ArcGIS y su complemento ArcHydro para visualización y procesamiento. Se realizó el escalamiento a las escalas S2, por el método de interpolación bilineal que calcula el valor de cada celda como el promedio ponderado por la distancia de los valores circundantes. Posterior, se generaron los 3 escenarios de reacondicionamiento para cada una de las zonas de estudio, mediante el método AGREE de tres parámetros que afecta la cota de ribera, del cauce y el ancho del DEM (Callow et al., 2007; Lindsay, 2016). Para cada escenario se crearon los mapas de parámetros hidrológicos y se realizó una modelación de evento con el software TETIS v9.1 (GIMHA, 2022), asumiendo un sólo uso de suelo y con características totalmente impermeables, además aplicando el principio de hidrograma unitario, se simuló un pulso de precipitación constante en toda la cuenca igual a 1 mm de lluvia en una discretización temporal minuter. Esto permitió evaluar la influencia de estos parámetros en la generación del caudal de escorrentía en términos de magnitud y tiempo de respuesta. En la Figura 2, se presenta un diagrama de flujo con la metodología implementada.

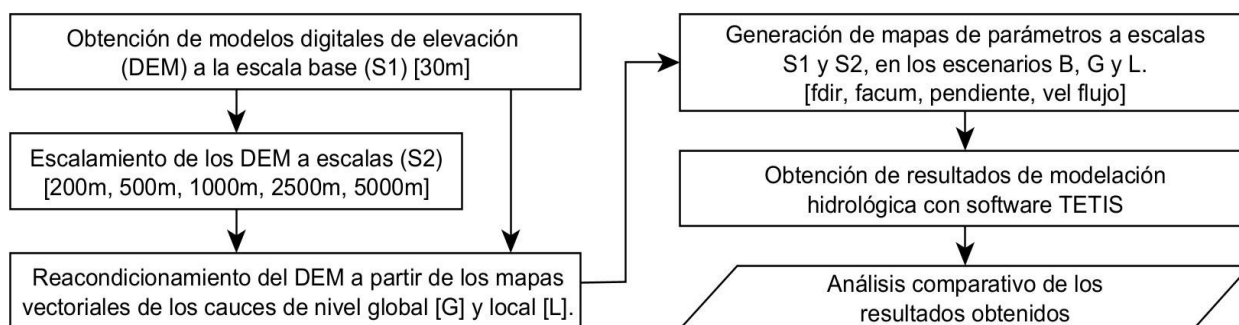


Figura 2. Diagrama. Izquierda cuenca del río Po, ubicado en Europa. Derecha, cuenca del río Tugela, ubicado en África.

3. Resultados y discusión

En cuanto a los modelos digitales de elevación (DEM), que fueron escalados, se destaca que para ambas zonas de estudio el área total de la cuenca aumenta generalmente en función de la discretización espacial, es decir, a mayor tamaño de celda, mayor el área total de la cuenca de análisis. Lo anterior se puede visualizar en la Figura 3, encontrando que para la cuenca del Tugela el área mínima se encuentra en el escenario Base a una escala de 30 metros y corresponde con un valor de 28955 km², y su valor máximo se encuentra en el escenario Global a una escala de 5000 metros con un valor de 31225 km². A su vez, para la cuenca del Po el área mínima se encuentra en el escenario Global a una escala de 30 metros con un valor de 67021 km² y su valor máximo se encuentra en el escenario Local a una escala de 2500 metros con un valor de 95925 km².

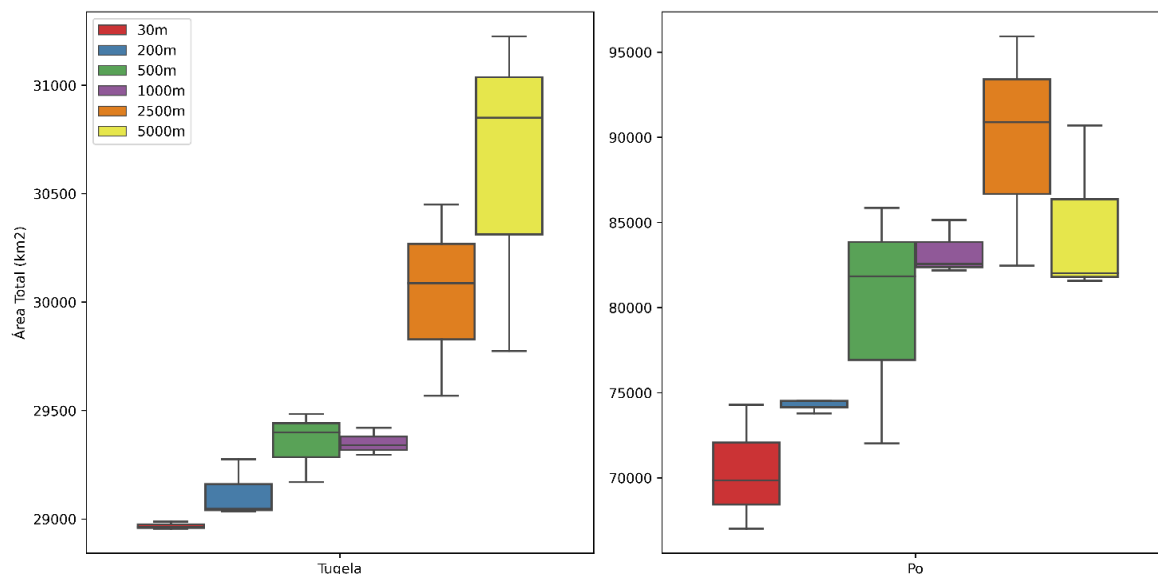


Figura. 3. Dispersión del área total según la escala espacial. Izquierda cuenca del río Tugela. Derecha, cuenca del río Po.

De otra parte, el área total vista desde la perspectiva de los escenarios de reacondicionamiento no presenta una tendencia clara (Ver Figura 4) que permita afirmar que las variaciones presentadas corresponden directamente a dicho proceso. En general, para los DEM en estudio, en función del aumento de tamaño de celda, para la cuenca del Tugela las cotas mínimas aumentaron de 15 m.s.n.m para el escenario Local de 30 metros a 148 m.s.n.m para el escenario Local de 5000 metros; en contraste para la cuenca del Po cuyas cotas mínimas para todos los escenarios de 30 metros se encontraban entre 0 y 2 m.s.n.m no se obtuvo gran aumento para los mismos 3 escenarios a la escala de 5000 metros estando sus valores mínimos entre 0 y 8 m.s.n.m. En cuanto a las cotas máximas para ambos casos de estudio disminuyeron en función del aumento de tamaño de celda, pasando en promedio de 3454 y 4804 m.s.n.m. para las escalas de 30 metros a 3297 y 3880 m.s.n.m para las escalas de 5000 metros en las cuencas del Tugela y Po respectivamente.

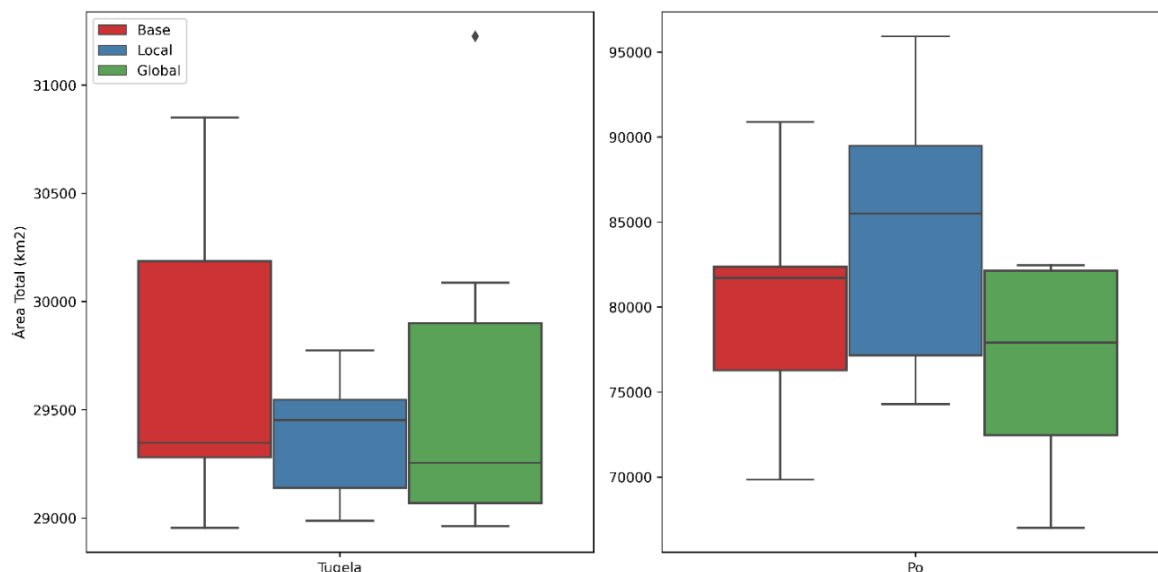


Figura. 4. Dispersión del área total según el escenario de reacondicionamiento. Izquierda cuenca del río Tugela. Derecha, cuenca del río Po.

Del análisis anterior se deduce que en general las regiones de estudio que se obtienen con el aumento de escala espacial tienden a ser más grandes y planas. En la Figura 5, se observa un ejemplo del aumento de áreas mediante la superposición de las cuencas delimitadas para todas las escalas en el escenario Base; y en la Figura 6, se muestran las pendientes promedio para cada uno de los escenarios evaluados y se visualiza claramente como la pendiente disminuye con el aumento de la escala espacial, pasando en promedio de 1.84 y 3.16 para las escalas de 30 metros a 0.07 y 0.11 para las escalas de 5000 metros en las cuencas del Tugela y Po respectivamente. Esta situación a priori permite deducir que los parámetros derivados presentarán diferencias significativas en sus resultados.

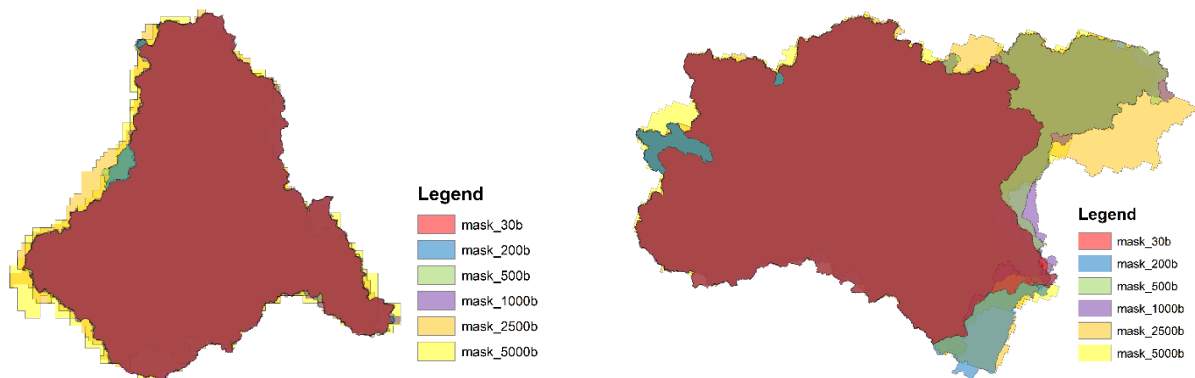


Figura. 5. Áreas totales sobrepuestas para el escenario Base. Izquierda cuenca del río Tugela. Derecha, cuenca del río Po.

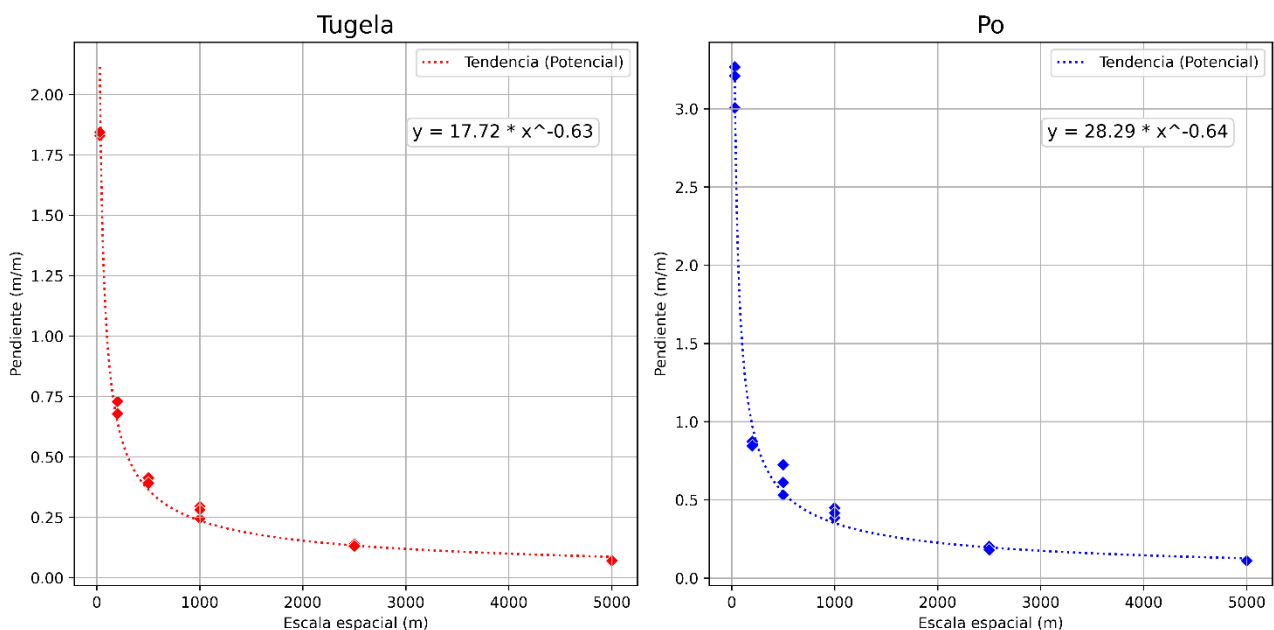


Figura. 6. Pendiente promedio por escala espacial. Izquierda cuenca del río Tugela. Derecha, cuenca del río Po.

Para el análisis de parámetros como las direcciones de flujo y la velocidad de flujo en ladera, derivados tanto del DEM como del mapa de pendientes, se realizó una comparativa entre los escenarios Local [L] y Global [G] con respecto al escenario Base [B]. Específicamente para el parámetro de direcciones de flujo se calculó la cantidad de celdas, en términos de porcentaje de área total, cuyo valor de dirección (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 en el sistema ArcGIS) se vio modificado al realizar alguno de los reacondicionamientos. La Figura 7 presenta el porcentaje de área total de la cuenca que posee diferencias en las direcciones de flujo entre los escenarios B-L y B-G, dando como resultado para la cuenca del Tugela porcentajes de alteración de más del 30% para comparativas con escalas espaciales de 500 metros o más, siendo afectada hasta un máximo del 59.4% en la escala de 2500 metros en la comparativa con el escenario Local. En cuanto a la cuenca del Po los porcentajes de alteración de más del 30% se presentan en comparativas con escalas espaciales a partir de los 200 metros hacia arriba, teniendo su punto de máxima alteración para la escala de 1000 metros en la

comparativa con el escenario Global. Es importante resaltar que, para esta cuenca, el porcentaje disminuye para escalas espaciales de 5000 metros; así como también que, a nivel espacial, los cambios de dirección se localizan predominantemente en las zonas de ribera, esto debido a la metodología para el reacondicionamiento del DEM.

En general, el escenario Global tiende a producir mayores alteraciones para las escalas pequeñas (30, 200, 500m), mientras que el escenario Local lo hace para las escalas grandes (2500, 5000m). El área superficial cuya dirección de flujo cambió entre un escenario y otro, aumenta a medida que se incrementa el tamaño de la celda; sin embargo, a partir de los escenarios de 2500m, los valores porcentuales tienden a disminuir.

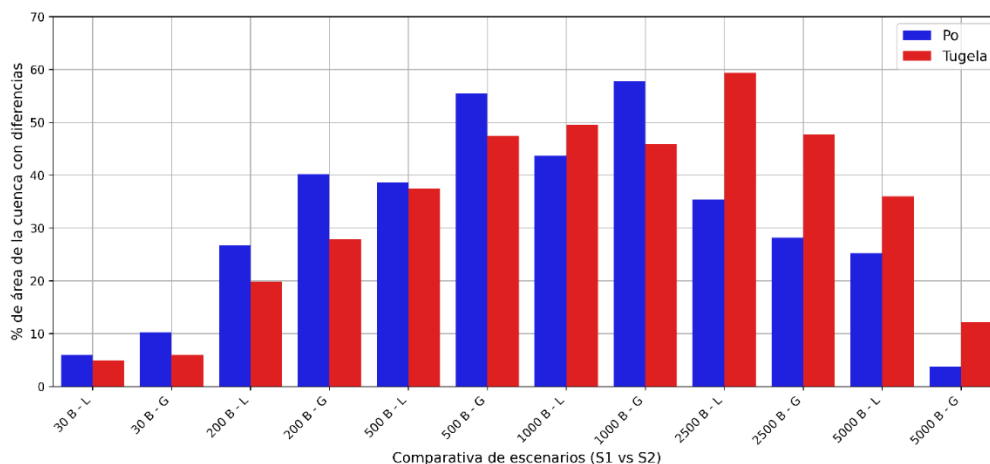


Figura 7. Diferencia porcentual en direcciones de flujo. Comparativa entre escenario Local y Global frente al escenario Base en cada una de las escalas espaciales.

Ahora bien, para evaluar el parámetro de velocidad de flujo en ladera, inicialmente se calculó un mapa de diferencias entre el valor de velocidad para cada celda en el escenario Base y su correspondiente en los escenarios Local y Global. Posteriormente, se definieron 9 rangos de variación de las diferencias obtenidas, como se muestra a continuación: $\{[-1.5, -1), [-1, -0.5), [-0.5, -0.25), [-0.25, 0), [0, (0, 0.25], (0.25, 0.5], (0.5, 1], (1, 1.5]\}$. De estos rangos, el más relevante corresponde a las diferencias de velocidad iguales a cero. Finalmente, se contabilizó el número de celdas para cada rango, se calculó el área asociada y su porcentaje con respecto al área total, obteniendo así el porcentaje del área de la cuenca cuya velocidad de ladera se alteró debido a los escenarios de reacondicionamiento, en la Tabla 1 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos. En el caso específico del rango $[0]$, se infiere que, al no existir variación en la velocidad, el porcentaje de área representado corresponde a una superficie cuyo parámetro fue inalterado.

Tabla 1. Ejemplificación resultados comparativa parámetro velocidad de flujo en ladera.

| Comparativa de escenario | Rango de velocidades | Número de celdas | Área (km ²) | % Área |
|---------------------------|----------------------|------------------|-------------------------|--------|
| Cuenca Tugela, 1000m, B-L | $[-1.5, -1)$ | 0 | 0.0 | 0.0 |
| | $[-1, -0.5)$ | 10 | 10.0 | 3.3 |
| | $[-0.5, -0.25)$ | 957 | 957.0 | 56.5 |
| | $[-0.25, 0)$ | 16293 | 16293.0 | 4.0 |
| | $[0]$ | 1160 | 1160.0 | 33.1 |
| | $(0, 0.25]$ | 9546 | 9546.0 | 3.0 |
| | $(0.25, 0.5]$ | 862 | 862.0 | 0.0 |
| | $(0.5, 1]$ | 6 | 6.0 | 0.0 |
| | $(1, 1.5]$ | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Cuenca Po, 1000m, B-L | $[-1, -1.5]$ | 0 | 0.0 | 0.0 |
| | $[-0.5, -1]$ | 836 | 836.0 | 1.0 |
| | $[-0.25, -0.5]$ | 5726 | 5726.0 | 7.0 |
| | $[0, -0.25]$ | 29979 | 29979.0 | 36.7 |
| | 0 | 18118 | 18118.0 | 22.2 |
| | $[0, 0.25]$ | 24998 | 24998.0 | 30.6 |
| | $[0.25, 0.5]$ | 2029 | 2029.0 | 2.5 |
| | $[0.5, 1]$ | 78 | 78.0 | 0.1 |
| | $[1, 1.5]$ | 0 | 0.0 | 0.0 |

En la Figura 7 se ilustran los resultados para las comparativas de escenarios donde el porcentaje de área de la cuenca obtuvo un parámetro de velocidad de flujo inalterado, es decir su rango de variación fue cero. De ésta se observa que, a medida que se aumenta el tamaño de celda, los procesos de reacondicionamiento generan mayores alteraciones en la velocidad de flujo, reduciendo casi a cero el porcentaje de área para escalas entre los 500 y 2500 metros para algunos de los escenarios.

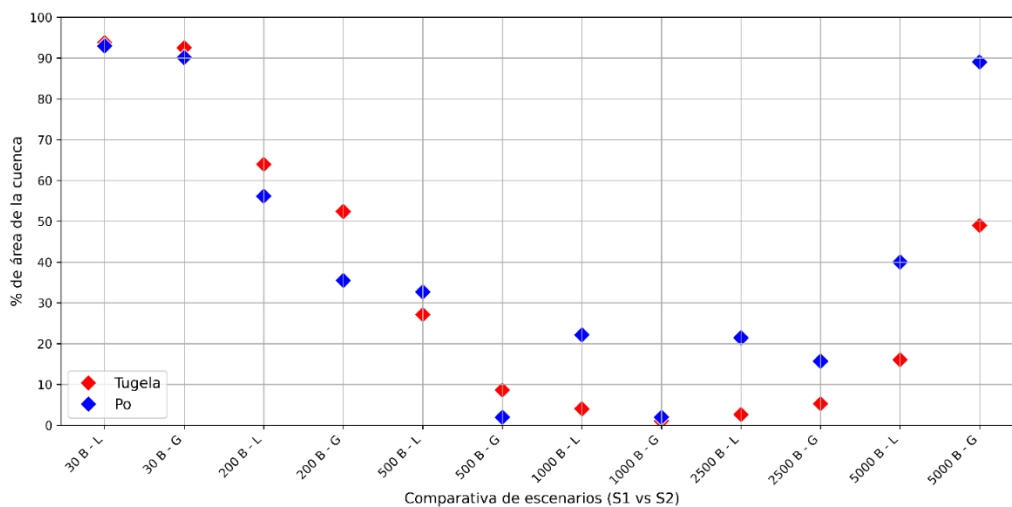


Figura. 8. Porcentaje de área con velocidad de flujo inalterado. Comparativa entre escenario Local y Global frente al escenario Base en cada una de las escalas espaciales.

En este orden de ideas, el reacondicionamiento del DEM desempeña un papel relevante en escalas comprendidas entre los 200 y los 2500 metros. Sin embargo, a escalas mayores (de 5000 metros en adelante) el tamaño de celda parece limitar la magnitud de las alteraciones inducidas por este, volviéndolas menos significativas.

Finalmente, se evaluó con la implementación del software TETIS v.9.1, la influencia de los diferentes escenarios sobre la modelación hidrológica, los factores correctores del modelo fueron fijados para garantizar únicamente producción de escorrentía directa sobre una superficie totalmente impermeable, por ello, FC-1, FC-2, FC-3, FC-5, FC-6, FC-7, FC-8 se les asignó un valor de cero y FC-4, FC-9 un valor de 1. En la Tabla 2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en cuanto al caudal máximo simulado y tiempo al pico simulado, y en la Figura 9 se muestran las hidrógrafas obtenidas para cada uno de los escenarios de reacondicionamiento y las escalas de trabajo S1 y S2, con base a lo anterior se puede afirmar que se generan variaciones significativas no sólo entre las escalas, sino también entre los escenarios de reacondicionamiento.

Tabla 2. Ejemplificación resultados comparativa parámetro velocidad de flujo en ladera.

| Escala | Escenario | Cuenca | Caudal máximo simulado | Tiempo al pico simulado (días) | Cuenca | Caudal máximo simulado | Tiempo al pico simulado (días) |
|--------|-----------|--------|------------------------|--------------------------------|--------|------------------------|--------------------------------|
| 30m | Base | Tugela | n/a | n/a | Po | n/a | n/a |
| 200m | Base | Tugela | 0.000513 | 1.681 | Po | 0.000412 | 2.472 |
| 500m | Base | Tugela | 0.000552 | 1.493 | Po | 0.000337 | 2.810 |
| 1000m | Base | Tugela | 0.000558 | 1.354 | Po | 0.000330 | 2.841 |
| 2500m | Base | Tugela | 0.000467 | 1.447 | Po | 0.000343 | 2.444 |
| 5000m | Base | Tugela | 0.000396 | 1.702 | Po | 0.000306 | 2.694 |
| 30m | Local | Tugela | 0.000494 | 1.727 | Po | n/a | n/a |
| 200m | Local | Tugela | 0.000440 | 1.488 | Po | 0.000460 | 2.367 |
| 500m | Local | Tugela | 0.000562 | 1.534 | Po | 0.000445 | 2.344 |
| 1000m | Local | Tugela | 0.000508 | 1.514 | Po | 0.000389 | 2.401 |
| 2500m | Local | Tugela | 0.000455 | 1.672 | Po | 0.000333 | 2.463 |
| 5000m | Local | Tugela | 0.000379 | 1.727 | Po | 0.000287 | 2.740 |
| 30m | Global | Tugela | 0.000549 | 1.697 | Po | n/a | n/a |
| 200m | Global | Tugela | 0.000537 | 1.539 | Po | 0.000510 | 2.293 |
| 500m | Global | Tugela | 0.000553 | 1.587 | Po | 0.000466 | 2.403 |
| 1000m | Global | Tugela | 0.000505 | 1.583 | Po | 0.000356 | 2.682 |
| 2500m | Global | Tugela | 0.000408 | 1.603 | Po | 0.000365 | 2.474 |
| 5000m | Global | Tugela | 0.000384 | 1.721 | Po | 0.000313 | 2.585 |

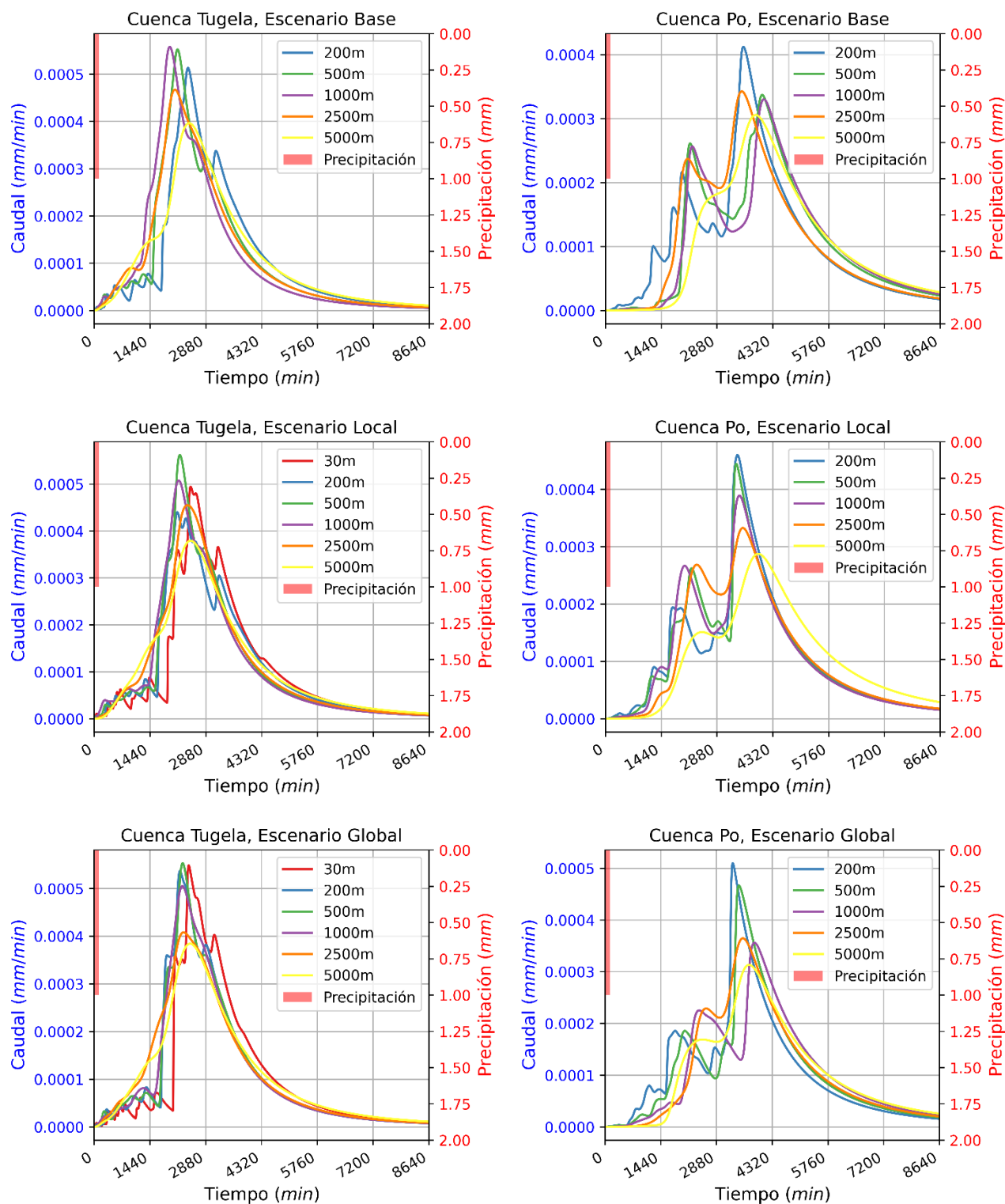


Figura. 9. Hidrogramas simulados para las zonas de estudio. Comparativa entre escenarios Base, Local y Global, para las diferentes escalas de trabajo

Con respecto a los resultados obtenidos de las modelaciones se observa una tendencia clara de reducción del caudal máximo simulado al aumentar la escala espacial siendo en promedio 15.52% y 22.53% para las cuencas del Tugela y Po respectivamente. En cuanto a los reacondicionamientos para los escenarios Global y Local se obtuvo resultados contrastantes para las dos áreas de estudio, mientras la cuenca del Tugela presenta reducciones de caudal máximo en comparación con el escenario Base en la mayoría de las escalas espaciales, esta tendencia se ve más claramente en las escalas de 1000 metros en adelante; por otro lado, para la cuenca

del Po, las escalas pequeñas en general arrojan un aumento en el caudal máximo simulado con respecto al escenario Base (Ver Figura 10).

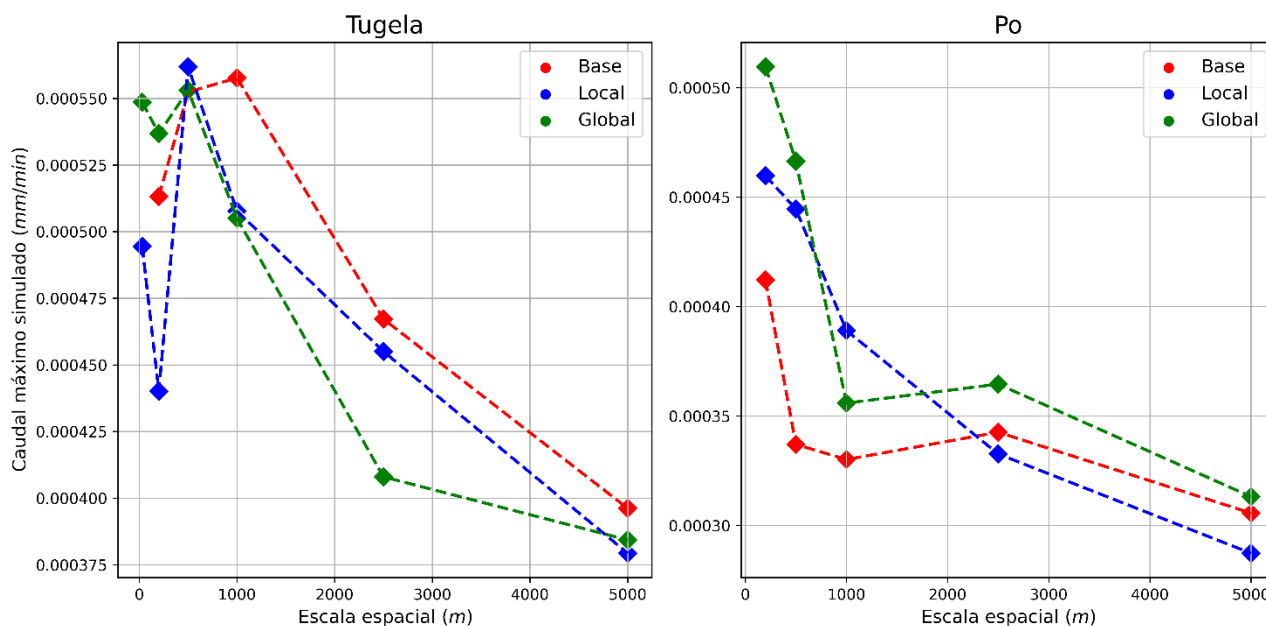


Figura. 10. Caudales máximos simulados para las zonas de estudio. Comparativa entre escenarios Base, Local y Global, para las diferentes escalas de trabajo

Finalmente, en cuanto a los tiempos al pico simulados (Ver Figura 11), se presentan comportamientos particulares para cada zona de estudio, la cuenca del Tugela analizada a partir escenarios B, L y G, presenta en general un retraso en sus tiempos al pico; sin embargo, en cuanto a las escalas espaciales comparando con el tiempo obtenido en la escala más fina (30 metros) presenta en promedio un adelantamiento del pico de los hidrogramas para todas las escalas de análisis a excepción de la escala de 5000 metros. De otra parte, para la cuenca del Po analizada a partir escenarios B, L y G, presenta para escalas menores de 2500 metros un claro adelantamiento del pico, sin embargo no lleva este mismo comportamiento para la escala de 5000 metros donde el escenario Local muestra un retraso y el escenario Global un adelantamiento con respecto al Base; en cuanto a las escalas espaciales comparando con el tiempo obtenido en la escala más fina (200 metros), en general se observa un retraso del tiempo al pico del hidrograma, a excepción del escenario Base de 2500 metros.

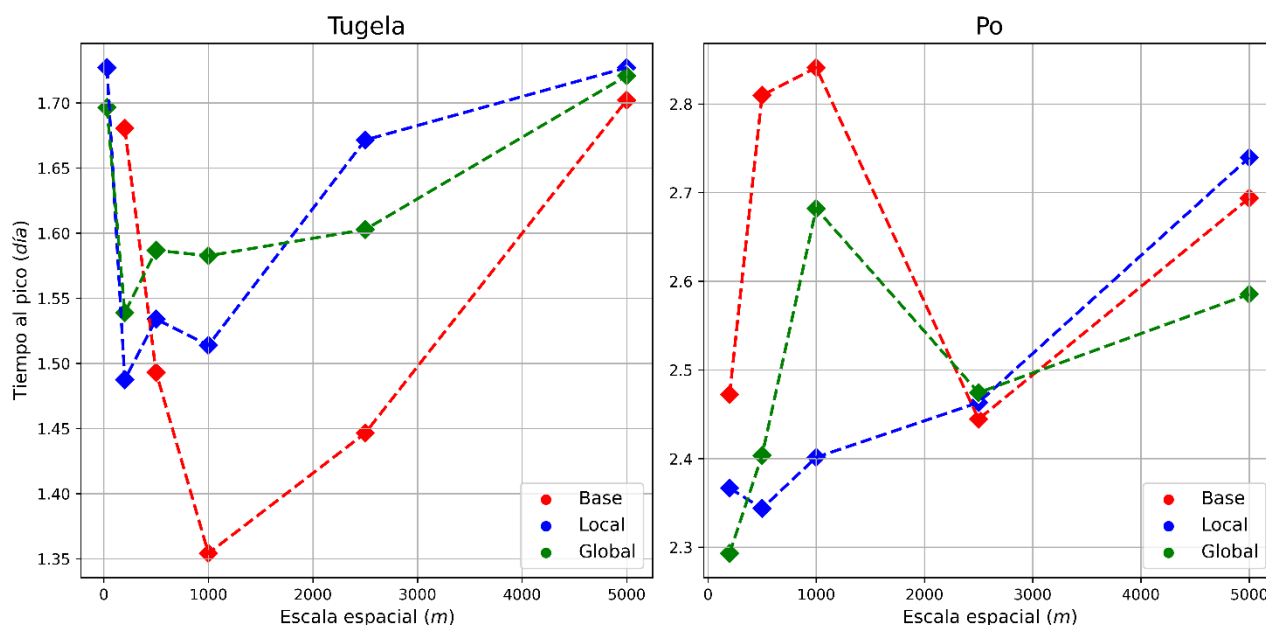


Figura. 11. Tiempos al pico simulados para las zonas de estudio. Comparativa entre escenarios Base, Local y Global, para las diferentes escalas de trabajo

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que el reacondicionamiento de los DEM puede generar afectaciones notables en los parámetros derivados del mismo. Además, la escala en la cual se lleva a cabo este proceso desempeña un papel crucial, puesto que puede amplificar o reducir las afectaciones ya producidas por los procesos de reacondicionamiento, como se evidencia en las Figuras 7 y 8, puesto que las alteraciones en función del porcentaje del área de la cuenca muestran una tendencia a aumentar hasta alcanzar un valor máximo, seguido de una disminución. Es importante destacar que lo anterior no implica que trabajar con un tamaño de celda de 30 o 5000 metros conduzca a resultados similares en la producción de escurrimiento durante la modelación hidrológica, como se demostró en las Figuras 10 y 11. Esto se debe a que otros parámetros y factores en la cuenca deben variar a lo largo de distintos niveles en las escalas.

En consecuencia, la calibración de los hidrogramas de descarga requerirá ajustes en los factores correctores de la propagación entre las diversas escalas para lograr una calibración efectiva, mitigando así las afectaciones en los procesos de generación y propagación de escurrimiento a nivel superficial. Para un ejercicio completo de modelación hidrológica estos fenómenos omitidos en el presente estudio darán lugar a ajustes en los parámetros efectivos para la propagación del modelo hidrológico. En el caso del modelo TETIS, los parámetros efectivos son los estimados inicialmente, pero multiplicados por un factor corrector diferente para cada parámetro (Francés et al., 2007). Estos factores, sujetos a calibración, tendrán que ser diferentes para cada una de las escalas (S1 y S2) y los escenarios evaluados (B, L y, G).

Finalmente, es crucial tener en cuenta que la influencia del reacondicionamiento y la escala no solo afecta los parámetros hidrológicos específicos, sino que también impacta la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica. Por lo tanto, un enfoque meticuloso y ajustado a la escala y escenario particular es indispensable para garantizar resultados precisos, particularmente en aplicaciones críticas de gestión de recursos hídricos y planificación ambiental.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Generalitat Valenciana con el proyecto Water4Cast (PROMETEO/2021/074) y el Ministerio de Ciencia e Innovación de España con el proyecto TETISPREDICT (PID2022-141631OB-I00).

Referencias

- Barrios Peña, M. I. (2011). “Estudio del efecto de escala espacial en un modelo hidrológico distribuido”. Universitat Politècnica de València.
- Bloschl, G., & Sivapalan, M. (1995). “Scale issues in hydrological modelling: A review”. *Hydrological Processes*, 9, 251–290.
- Callow, J. N., Van Niel, K. P., & Boggs, G. S. (2007). “How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis?”. *Journal of Hydrology*, 332(1–2), 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.020>
- Francés, F., Vélez, I. & Vélez J. (2007). “Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models” *Journal of Hydrology*, 332:226-240. ISSN: 0022-1694
- GIMHA - Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental. (2022). TETIS V9.1: Modelo hidrológico conceptual y distribuido. <http://lluvia.dihma.upv.es/ES/software/software.html>
- Kumar, R., Samaniego, L., & Attinger, S. (2010). “The effects of spatial discretization and model parameterization on the prediction of extreme runoff characteristics”. *Journal of Hydrology*, 392(1–2), 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.047>
- Lindsay, J. B. (2016). “The practice of DEM stream burning revisited”. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 658–668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- Olaya Ferrero, V. (2004). *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno*. <http://heart.sf.net/textos>.