



**Facultad de Ciencias Geológicas**  
**Universidad Complutense de Madrid**  
**MÁSTER UNIVERSITARIO EN**  
**GEOLOGÍA AMBIENTAL**  
**Curso 2023-2024**

Evaluación inicial del uso de CAESAR–LISFLOOD para el estudio de la erosión en la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara, España)

Initial assessment of the use of CAESAR–LISFLOOD to study erosion in the mining area of Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara, España)

PATRICIO ORDEN ISLAS (autor/a)

TUTOR/ES DEL TRABAJO: IGNACIO ZAPICO ALONSO  
JULIO GARROTE REVILLA



**Facultad de Ciencias Geológicas**  
**Universidad Complutense de Madrid**  
**MÁSTER UNIVERSITARIO EN**  
**GEOLOGÍA AMBIENTAL**  
**Curso 2023-2024**

Evaluación inicial del uso de CAESAR–LISFLOOD para el estudio de la erosión en la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara, España)

Initial assessment of the use of CAESAR–LISFLOOD to study erosion in the mining area of Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara, España)

PATRICIO ORDEN ISLAS (autor/a)

TUTOR/ES DEL TRABAJO:

IGNACIO ZAPICO ALONSO

JULIO GARROTE REVILLA

Fdo.:

Fdo.:



# Facultad de Ciencias Geológicas

## Universidad Complutense de Madrid

### DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

PATRICIO ORDEN ISLAS con NIF 16656044L, estudiante de Máster de Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2023 -2024, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado “Evaluación inicial del uso de CAESAR – LISFLOOD para el estudio de la erosión en la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara, España)” y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyos tutores son: Ignacio Zapico Alonso y Julio Garrote Revilla

**DECLARO QUE:** El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 29 de Julio de 2024

Fdo.:



**Declaración Responsable sobre Autoría y Uso Ético**  
**de Herramientas de Inteligencia Artificial (IA)**

Yo, ORDEN ISLAS, PATRICO

Con PASAPORTE: XDD689990

declaro de manera responsable que el/la presente:

Trabajo de Fin de Máster (TFM)

Titulado 'Evaluación inicial del uso de CAESAR–LISFLOOD para el estudio de la erosión en la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara, España)'

es el resultado de mi trabajo intelectual personal y creativo, y ha sido elaborado de acuerdo con los principios éticos y las normas de integridad vigentes en la comunidad académica y, más específicamente, en la Universidad Complutense de Madrid. Soy, pues, autor del material aquí incluido y, cuando no ha sido así y he tomado el material de otra fuente, lo he citado o bien he declarado su procedencia de forma clara -incluidas, en su caso, herramientas de inteligencia artificial-. Las ideas y aportaciones principales incluidas en este trabajo, y que acreditan la adquisición de competencias, son mías y no proceden de otras fuentes o han sido reescritas usando material de otras fuentes. Asimismo, aseguro que los datos y recursos utilizados son legítimos, verificables y han sido obtenidos de fuentes confiables y autorizadas. Además, he tomado medidas para garantizar la confidencialidad y privacidad de los datos utilizados, evitando cualquier tipo de sesgo o discriminación injusta en el tratamiento de la información.

En Madrid, a 29 de Julio de 2024

*Patricio Orden  
de las*

FIRMA

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mis tutores, Nacho y Julio, por todo el apoyo brindado durante el proceso del TFM. Gracias a su experiencia y guía continua, fue posible culminar este trabajo.

También, quiero agradecer a empresa CAOBAR, S.A. por proveerme con las topografías de la mina El Machorro, ya que sin ellas este trabajo no pudo haber sido realizado

Igualmente, quiero agradecer a Raquel, que me ayudó a poder descargar y arreglar los datos de precipitación a futuro.

Finalmente, quiero agradecerles a mis papás por la ayuda emocional en estas últimas semanas de locura previas a la entrega del TFM.

## ÍNDICE

1. RESUMEN.....	vii
2. INTRODUCCIÓN.....	1
3. OBJETIVOS.....	5
4. METODOLOGÍA.....	6
4.1. Zona de estudio.....	6
4.2. Metodología y fuentes de datos.....	8
4.3. Tasas de erosión.....	8
4.4. Datos de entrada.....	10
4.4.1. Topografías.....	10
4.4.2. Precipitación.....	12
4.4.3. Granulometría.....	12
4.4.4. Pendiente.....	13
4.5. Fase 1: Calibración.....	13
4.6. Fase 2: Evaluación.....	14
4.7. Fase 3: Estimación de estabilidad.....	14
5. RESULTADOS.....	15
5.1. Fase 1: Calibración de parámetros.....	15
5.2. Fase 2: Evaluación de la calibración.....	17
5.3. Fase 3: Estimación de la estabilidad.....	19
6. DISCUSIÓN.....	22
6.1. Fase 1: Calibración de los parámetros.....	22
6.2. Fase 2: Evaluación de la calibración.....	26
6.3. Fase 3: Estimación de la estabilidad.....	27
6.4. Sigüientes pasos.....	28
7. CONCLUSIONES.....	29
8. BIBLIOGRAFÍA.....	30
9. ANEXOS.....	33

## 1. RESUMEN

Uno de los principales problemas en los ambientes mineros es la erosión, que puede alcanzar tasas cientos de veces superiores a las de las zonas naturales circundantes. Las restauraciones mineras se diseñan en parte para mitigar estos efectos, por lo que es fundamental poder estimar su efectividad a futuro. Los Modelos de Evolución del Paisaje (LEM) permiten estimar el cambio topográfico en estas restauraciones a lo largo de cientos e incluso miles de años, mediante una parametrización adecuada. Este estudio tiene como objetivo generar una calibración utilizando el LEM de CAESAR-Lisflood para predecir las tasas de erosión en los ambientes mineros del Alto Tajo.

En una primera fase, se generó una calibración simulando varios valores de cuatro parámetros en una restauración geomorfológica usando una serie de precipitación de muy alta resolución para obtener tasas de erosión lo más cercanas posible a las reales. Esta calibración produjo tasas de erosión muy parecidas a las reales, pero no pudo replicar los patrones de erosión y deposición observados en la realidad. Posiblemente haya más parámetros en juego debido a la complejidad del software.

Después, en una segunda fase se verificaron estos parámetros en una zona con restauraciones mixtas para evaluar la efectividad de estos parámetros en un ambiente geomorfológico más complejo y precipitaciones con menor resolución. La calibración subestimó la erosión real en un 32% y no pudo replicar los patrones de erosión ni deposición observados. Aquí afectó tanto la vegetación, la incertidumbre de los parámetros y un ajuste de ciertos parámetros para compensar una serie de precipitaciones de menor resolución.

Finalmente, en una tercera fase, se estimó la estabilidad superficial usando tasas de erosión de una restauración geomorfológica y unas terrazas con diseño de talud-berma al 2099 considerando el peor escenario de cambio climático. Se obtuvieron tasas de erosión entre seis y ocho veces menores en la restauración geomorfológica para los períodos de 2035-2049 y 2049-2099, respectivamente. Dicho esto, las tasas de erosión de la restauración geomorfológica fueron mucho mayores inicialmente al subestimar el efecto de la vegetación al igual que una disminución de tasas de erosión en el tiempo por efecto del blindaje.

En estas tres fases de simulaciones, se demuestra la complejidad de generar una calibración que pueda reflejar tanto tasas de erosión como los patrones de erosión y sedimentación. Esto demuestra la necesidad de más estudios que analicen el comportamiento de otras variables no consideradas a fondo. Dicho esto, este estudio genera un primer intento de generar una calibración que pueda estimar la erosión en ambientes mineros del Alto Tajo.

## 2. INTRODUCCIÓN

La erosión es uno de los problemas principales dentro de los ambientes mineros, ya que pueden tener tasas de erosión de hasta 2 órdenes de magnitud mayores a las zonas naturales aledañas (Ramli et al., 2019). La minería altera la forma del relieve al crear pendientes pronunciadas con perfiles longitudinales constantes, genera acumulaciones de sedimentos no consolidados y elimina las redes de drenaje preexistentes (Martín-Duque et al., 2020; Ramli et al., 2019). Esto concentra la escorrentía superficial y aumenta la energía erosiva, incrementando la remoción de sedimentos, ocasionando efectos nocivos río abajo (Martín-Duque et al., 2020; Saynor et al., 2019). Además de esto, la constante remoción del suelo no permite la colonización de plantas al remover semillas y nutrientes, evitando la formación de un suelo con vegetación que reduzca los efectos de la erosión (Zapico et al., 2018). Los efectos río abajo principalmente se deben al aumento de la concentración de sedimentos suspendidos en el agua. Esto incrementa la turbidez que afecta la fotosíntesis de productores primarios, reduce el oxígeno disuelto disponible ocasionando sofocamiento, y obstruye los sistemas de filtración de invertebrados entre otros efectos (Martín-Moreno, 2013).

Las restauraciones en ambientes mineros es una práctica obligatoria una vez los trabajos de explotación han terminado. Idealmente deben incrementar la estabilidad de las zonas mineras y reducir la erosión a niveles similares a las zonas aledañas sin perturbaciones (Lowry et al., 2022). Hay varias formas de intervenciones con técnicas convencionales como terrazas y taludes con pendientes constantes, pero tienden a fallar a escalas de tiempo larga por erosión hídrica al no considerar una red de drenaje lo suficientemente homogénea y bien distribuida (Martín-Duque et al., 2010). Otros diseños que replican las características de los paisajes sin perturbación, como perfiles convexo-cóncavos de pendientes bajas con una densidad de drenaje adecuada son muy efectivos al garantizar estabilidad a largo plazo (Martín-Duque, 2024; Zapico et al., 2018).

Para saber si un método de restauración es estable o no, es esencial estimar tasas de erosión que permitan evaluar su efectividad. Existen varios métodos, directos e indirectos. De los métodos directos existen las trampas de sedimento, que recolectan la producción de sedimento de una zona, y permiten obtener el volumen y peso del material erosionado dentro de un período de tiempo determinado (Hernando et al., 2009). Aunque este método es muy preciso, sólo permite obtener datos de erosión de una zona pequeña y puntual, lo que lo hace un método limitado para analizar la erosión de zonas de estudio muy grandes (Stroosnijder, 2005). Otro método directo es el de Cesio-137, en donde se comparan las concentraciones de Cesio-137 en muestras y se comparan con las concentraciones de fondo en la zona de estudio (Hancock et al., 2010). Esta técnica tiende a ser imprecisa debido a la incertidumbre en las concentraciones de Cesio-137 de referencia y la absorción preferente para granulometría fina (Stroosnijder, 2005). Otro método directo es medir la concentración de

sedimento suspendido en el flujo de salida de una zona determinada (Zapico et al., 2018). A diferencia de los anteriores, este permite medir la erosión de manera constante para obtener datos de erosión de eventos puntuales de precipitación (Stroosnijder, 2005). Estos métodos pueden llegar a producir tasas de erosión muy precisas, pero tienden a ser muy costosos, especialmente para poder obtener datos de erosión multianual (Stroosnijder, 2005).

Existen maneras de estimar la erosión de manera indirecta que, aunque tienden a ser menos precisos, son mucho más baratos y permiten estimar la erosión a escalas de tiempo largas y zonas de estudio muy grandes (Stroosnijder, 2005). La Universal Soil Loss Equation (USLE) incluidas sus variantes (RUSLE, MUSLE y RUSLE2), es un modelo empírico para estimar las tasas de erosión promedio anuales tomando en cuenta el tipo de suelo, patrones de precipitación, características del relieve, usos del suelo y prácticas de conservación de suelo (Benavidez et al., 2018). Aunque la USLE y sus variantes han sido utilizados para estimar tasas de sedimento en diversos ambientes, al igual que en zonas mineras rehabilitadas (Bugosh y Epp, 2019; Ramli et al., 2019), no toman en cuenta el comportamiento de la erosión ante el cambio topográfico provocado por sedimentación y erosión (Hancock et al., 2010).

Por esto, los *Landscape Evolution Models* (LEMs) son modelos de evolución del paisaje que han ganado popularidad debido a que permiten simular los cambios geomorfológicos en el relieve a diferentes escalas, desde horas a milenios, utilizando parámetros físico-climáticos locales como la precipitación, la geología y la evolución de la vegetación (Nair et al., 2023; Lowry et al., 2019). Estos modelos ajustan la respuesta de la erosión y sedimentación a los cambios topográficos a través del tiempo, algo que no es posible con la RUSLE (Hancock et al., 2010). Por un lado, existe la *USDA-Water Erosion Prediction Project* (WEPP) que es un modelo de computadora en donde se simulan diferentes procesos de hidrología, vegetación, física del suelo y mecánica; y permite variación tanto temporal como espacial de topografía y cambio del uso de suelo (Tiwari et al., 2000). Dicho esto, el WEPP es limitado en cuanto a el cambio topográfico generado por la erosión, puede llegar a no ser considerado un LEM por esta razón (Tiwari et al., 2000). Por otro lado, existen SIBERIA y CAESAR-Lisflood (C-L), que a diferencia del WEPP, están diseñados para simular los cambios de elevación en las celdas de una matriz de elevaciones por los diferentes procesos fluviales y de ladera. Aunque ambos softwares han permitido obtener resultados bastante buenos, C-L permite simular eventos de precipitación muy cortos de horas o hasta minutos, al igual que procesos fluviales cortos (Hancock et al., 2010). Por un lado, SIBERIA utiliza datos promedios anuales de hidrología y transporte de sedimentos requiriendo un tiempo de procesamiento menor, mientras que C-L permite simular periodos muy cortos de precipitación de hasta intervalos de 10 minutos que genera simulaciones lentas pero muy precisas (Hancock et al., 2010; Nair et al., 2023). Esto es importante, ya que la mayoría de la

erosión ocurren en eventos cortos de precipitación de gran intensidad que no permiten ser modelados a intervalos largos de tiempo (Lowry et al., 2015). Inclusive, C-L ha permitido analizar la formación, el comportamiento y la evolución de cárcavas en suelos agrícolas, por lo que resulta una herramienta que permite modelar procesos muy complejos (Hoover et al., 2017).

El software de C-L aplica cuatro componentes, incluyendo un modelo hidrológico, un modelo de flujo, un modelo de erosión y sedimentación fluvial, y un modelo de procesos de pendiente; los cuales permiten estimar el cambio de elevación de cada celda dentro de una matriz regular de elevaciones (Saynor et al., 2019). En el modo cuenca (*catchment Mode*) en C-L, permite generar escorrentía superficial a partir de datos de precipitación usando el modelo hidrológico, el cual después se canaliza usando el modelo de flujo y estima cambio de elevaciones de cada celda conforme a procesos fluviales y de pendiente a través del tiempo (Lowry et al., 2013).

La fiabilidad de cualquier modelo, incluidos los LEMs, depende de realizar un trabajo de calibración previa que permita replicar en una simulación los cambios topográficos observados. Bugosh y Epp (2019), indican que los LEMs son incapaces de predecir cambios topográficos precisos sin llevar a cabo una calibración previa. Para esto, se tiene que utilizar una serie de parámetros que acerquen lo más posible los resultados de las simulaciones a los datos reales obtenidos en campo (Nair et al., 2023). Varios estudios demuestran que una parametrización adecuada permite predecir la evolución geomorfológica de diferentes ambientes, incluidos las restauraciones mineras. En Saynor et al. (2018) y Saynor et al. (2019), el uso de C-L correctamente parametrizado ha permitido estimar la reducción de erosión usando surcos dentro de parcelas experimentales para la mina Ranger de Uranio en Australia. En la misma zona, Lowry et al. (2015), genera una simulación de C-L que predice acertadamente las tasas de erosión observadas en campo. Otros estudios realizan una parametrización más exhaustiva, en donde se generan varias simulaciones con diferentes rangos de valores para ciertos parámetros hasta encontrar una combinación de valores que mejor se ajusten a los datos recopilados en campo (Nair et al., 2023). Walsh et al. (2020), obtiene tasas de sedimento suspendido con errores del 2% y 6% calibrando dos parámetros en una cuenca pequeña. Por otra parte, Feeney et al. (2020), predice la evolución morfológica de una llanura de inundación con errores del 25% al 50% calibrando 2 parámetros. Hoover et al. (2017), genera una calibración de varios parámetros individualmente para cada iteración, estimando con éxito la aparición y evolución de cárcavas en zonas agrícolas.

Dentro de la literatura, los parámetros que se ajustan para obtener una simulación que más refleje los resultados observados, son aquellos que tienen un mayor efecto en los resultados finales de la simulación (Nair et al., 2023). Por ejemplo, la ecuación de transporte de sedimento influye considerablemente en el resultado final del patrón de erosión y

sedimentación, y es usada como parámetro ajustable en Hooper et al. (2017), Skinner y Coulthard, (2022) y Walsh et al. (2020) para calibrar el modelo. Igualmente, el valor 'm' que controla la velocidad y magnitud de respuesta del hidrograma a la precipitación, se ha usado en Nair et al. (2023), y en Skinner y Coulthard, (2022) como parámetro de calibración. También, el límite máximo de erosión que determina la elevación máxima por celda que se puede erosionar también influye en el resultado final, usada por Hooper et al. (2017), y Skinner y Coulthard, (2022). La tasa de erosión lateral determina la sinuosidad y la morfología de los meandros de los canales y es usada en Feeney et al. (2020) y Hooper et al. (2017) como parámetro ajustable. Por otra parte, la vegetación es uno de los factores que mayor efecto tiene sobre la erosión, y aunque se tiene que considerar tanto la resistencia crítica al corte de la vegetación como el tiempo de maduración de la vegetación de la zona de estudio, estos parámetros pueden ser calibrados (Lowry et al., 2019; Skinner y Coulthard, 2023).

Estudiar y predecir la estabilidad a futuro de rehabilitaciones mineras antes de su construcción es esencial para justificar aquellos diseños que garanticen una estabilidad del sedimento a largo plazo, evitando los efectos nocivos aguas abajo (Lowry et al., 2018). De esta manera si se detecta cualquier deficiencia se puede corregir en los diseños antes de la construcción. Dicho esto, los LEMs representan una solución para estimar la estabilidad de rehabilitaciones mineras si se genera una parametrización adecuada dentro de una zona específica. Este estudio pretende generar una parametrización adecuada de C-L para poder estimar la estabilidad de dos diferentes tipos de restauración en la zona mineras del Alto Tajo a futuro.

### **3. OBJETIVOS**

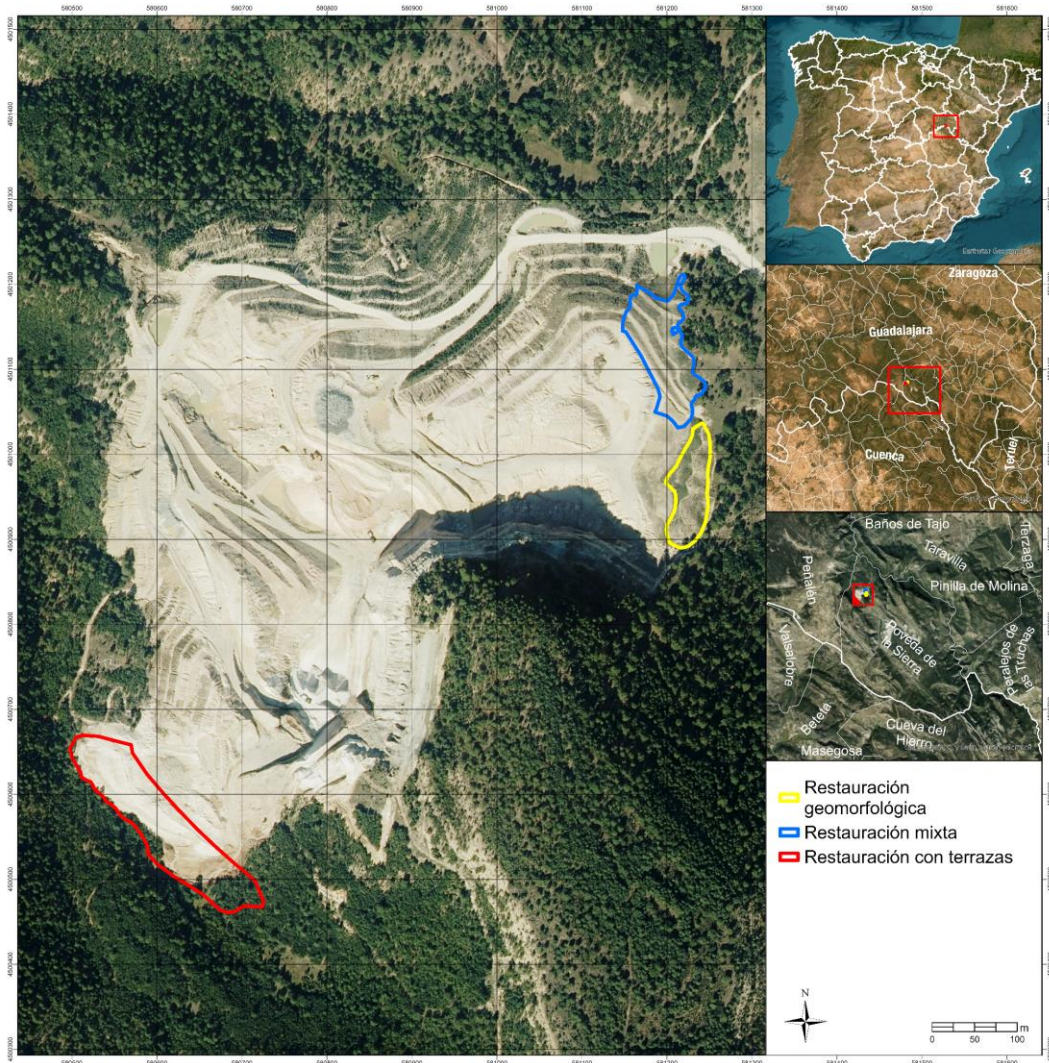
Estimar la estabilidad de varias remediaciones de ambientes mineros en el Alto Tajo usando CAESAR-Listflood. Para cumplir este objetivo, es necesario cumplir una serie de objetivos secundarios o específicos:

- (1) Recolectar y adecuar los datos necesarios para generar simulaciones en la mina de El Machorro usando C-L.
- (2) Parametrizar C-L para estimar el cambio topográfico y tasas de erosión en ambientes mineros del Alto Tajo.
- (3) Predecir la estabilidad futura de diferentes tipos de restauración y estabilización de minas.

## 4. METODOLOGÍA

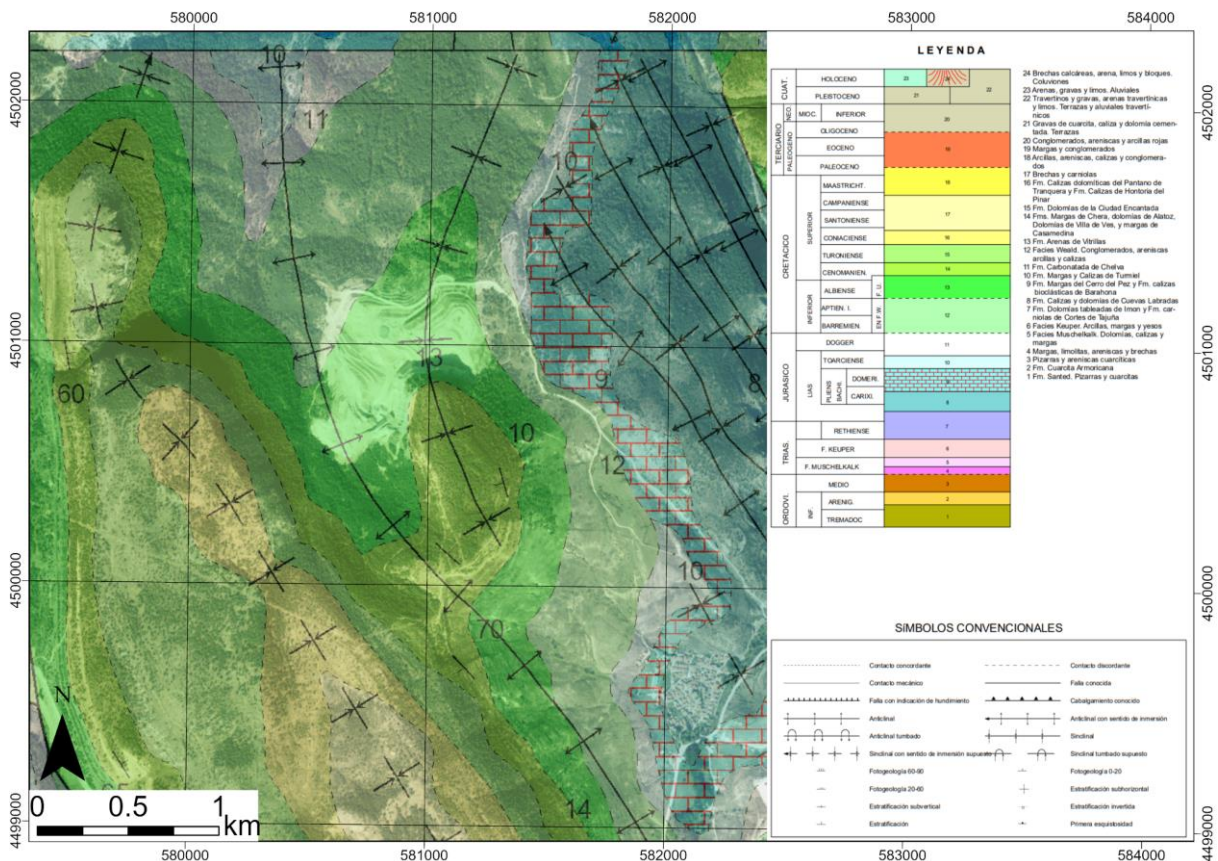
### 4.1. Zona de estudio

El Machorro se encuentra en la Provincia de Guadalajara, en la comunidad autónoma de Castilla-La Mancha y dentro de la zona Periférica de Protección del Parque Natural del Alto Tajo (Hernando et al., 2009) (Figura 1). El clima de la zona se clasifica como clima Mediterráneo templado con veranos secos y suaves, con influencia continental en la clasificación Köppen (Csb). La precipitación anual media es de 783 mm con una temperatura media de 10°C. Los inviernos tienden a ser largos y fríos, comúnmente con nieve, mientras que los veranos son cálidos y cortos. Las lluvias se concentran principalmente en la primavera y el otoño (Zapico, 2018). La vegetación es característica del clima mediterráneo continental, con comunidades de *Juniperus thurifera* en las partes altas de las mesas, y *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* y *Quercus faginea* en los valles (Martín-Moreno et al., 2016).



**Figura 1:** localización de la Mina de El Machorro en la Zona Periférica de Protección del Parque Natural del Alto Tajo.

La zona donde se encuentra la mina de El Machorro, pertenece a la rama Castellana de la Cordillera Ibérica, en las estribaciones noroccidentales de la Serranía de Cuenca (Hernando et al., 2009). La zona se caracteriza por tener grandes pliegues formados por la actividad tectónica; y el encajamiento del río Tajo ha dado lugar a elementos como cañones, mesas, cuevas y crestas durante el cuaternario (Hernando et al., 2009). La mina se encuentra en la formación de Arenas de Utrillas, que pertenece al Cretácico inferior y está formada por arenas blanco amarillentas y caoliníferas (Álvaro-López et al., 1985). La mina de El Machorro (Figura 2), se encuentra en la ladera de una mesa formada por un sinclinal colgado, y el caolín se encuentran intercalado dentro de la formación de arenas de Utrillas (Hernando et al., 2009; Martín-Moreno, 2013). En las partes altas de las mesas, los suelos son luvisoles crómicos, cambisoles calcáricos, leptosoles mólicos y leptosoles réndzicos. Las laderas se caracterizan por tener coluviones carbonáticos comúnmente con cambisoles calcáricos (Martín-Moreno et al., 2016).



**Figura 2:** Plano del contexto geológico general de la mina de El Machorro, elaborado con datos obtenidos de Álvaro-López et al. (1985).

La minería en el Alto Tajo comenzó en la década de los 1960 para la explotación del caolín, y específicamente la mina de El Machorro comenzó a explotarse en el 2000 por la empresa CAOBAR, S.A. Esta mina se encuentra en explotación junto con la mina María José, y cuenta con varias restauraciones y sistemas para mitigar los efectos de la erosión río abajo. Aunque las aguas y ríos del Parque Natural del Alto Tajo son consideradas de alta calidad,

se ha registrado un decrecimiento de poblaciones de trucha (*Salmo trutta*) posiblemente ligado al aumento de sedimentos suspendidos en el agua vertidos por las minas abandonadas sin prácticas correctas de retención de la erosión/estabilización, Santa Engracia y Nuria (Martín-Moreno, 2013).

#### **4.2. Metodología y fuentes de datos**

Para este estudio, se hicieron tres fases de simulaciones (ver Figura 3). La primera fase sirvió para calibrar C-L usando como referencia la tasa de erosión conocida de una superficie restaurada geomorfológicamente, por medio de la comparación de dos topografías, una de 2015 y otra 2016 (Zapico et al., 2018). Es decir, conociendo cuál tiene que ser el resultado final se realizaron pruebas ajustando valores de ciertos parámetros para tratar de reproducir la erosión real. Después, sigue una segunda fase en donde se llevó a cabo una evaluación de los parámetros calibrados usando una restauración mixta que se hizo de forma experimental por parte de la empresa CAOBAR S.A. para combinar una restauración en terrazas con algún criterio geomorfológico y cuyas escorrentías están conectadas con una balsa de retención de sedimentos y que impide que el material erosionado salga del interior de la mina. Y finalmente una tercera fase en donde se usaron los parámetros calibrados para analizar la estabilidad de la restauración geomorfológica de la primera fase y otra restauración convencional de terrazas, ambas usando topografías del 2024 para analizar la estabilidad a futuro tomando en cuenta el peor escenario de cambio climático. Las topografías del 2019 al 2024 han sido cedidas por la empresa CAOBAR S.A. para este estudio en virtud del contrato de transferencia para mejorar los procedimientos de monitorización topográfica y de restauración suscrito entre ellos y el departamento GEODESPAL.

#### **4.3. Tasas de erosión**

Para poder comparar la erosión de las simulaciones con el referente real en las primeras dos fases de simulación, al igual que la estabilidad a futuro de la tercera fase, se obtuvieron las tasas de erosión. La tasa de erosión se refiere a la cantidad de material erosionado dentro de un área y periodo de tiempo determinados, y en este caso se obtuvieron al comparar el cambio de la topografía inicial y la topografía final. Para obtener las tasas de erosión reales se compararon la topografía inicial real y la topografía final real, mientras que para las tasas de erosión simuladas se compararon la topografía inicial real y la final simulada en C-L. Para esto, se usó el software *Geomorphic Change Detection* (GCD), que es un software que permite estimar el cambio topográfico entre 2 MDT y calcular el cambio volumétrico. En GCD, primero se obtiene la producción de sedimentos en m<sup>3</sup> (Bailey et al., 2020). Esto se obtiene al comparar el cambio topográfico entre dos topografías, una inicial y

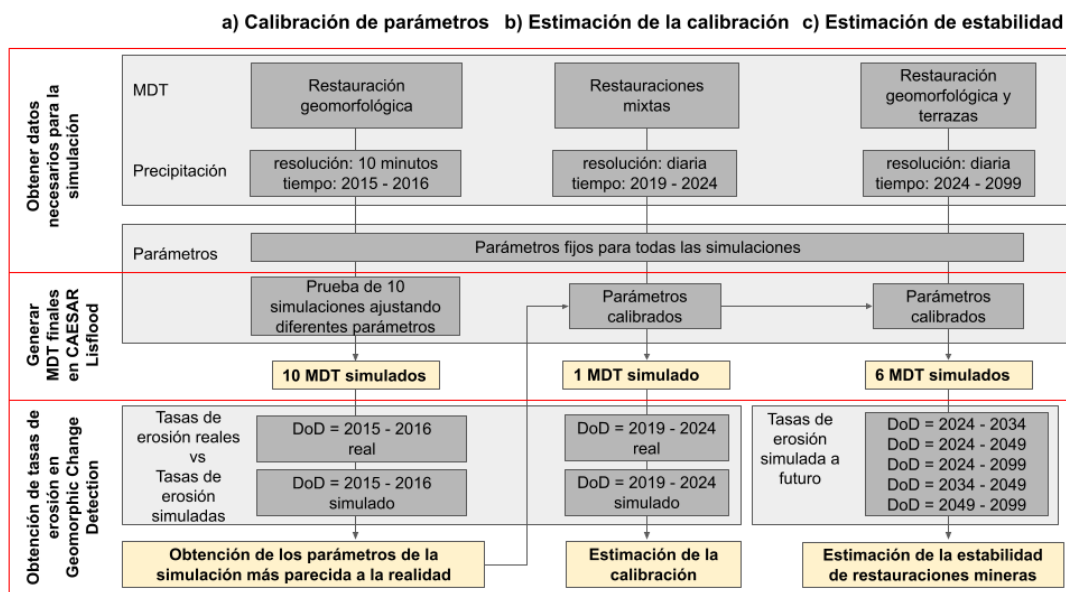
una final generando un *Difference of DEMs* o Diferencia de DEMs (DoD) como se ve en la ecuación 1.

$$DoD = (DEM_{final}) - (DEM_{inicial})$$

**Ecuación 1:** Ecuación para obtener el cambio geomorfológico entre dos MDT (DoD) en donde  $DEM_{final}$  es MDT final y el  $DEM_{inicial}$  es el MDT inicial. Ecuación adaptada de adaptado de Williams (2012).

Los DoD generan una capa ráster que permiten obtener volúmenes de cambio topográfico al analizar los patrones de sedimentación en donde se tienen valores de píxel positivos en el ráster, patrones de erosión donde hay valores de píxel negativos y el cambio total de elevación de dos topografías diferentes (Williams, 2012). Estas tasas de erosión representan el total de sedimento producido en el área de estudio y el tiempo entre dos topografías. Para tener un valor estándar de erosión, se generó la tasa de erosión anual en toneladas por hectárea ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ), usando una densidad de  $1,2\ g/cm^3$  a partir de una muestra obtenida de Zapico et al. (2018) para convertir el volumen a peso.

Igualmente, GCD permite estimar la incertidumbre de las diferencias al incorporar los errores de ambos MDT, por lo que las tasas de erosión tienen un rango de error asociado (Bailey et al., 2020). Para estimar el error de los DoD que usan ambas topografías reales, como se tienen los errores verticales de cada topografía, se usó un *probabilistic thresholding* con niveles de confianza de 0,90. Para estimar el error de las simulaciones, se probaron varios valores de *simple minimum level of detection* o nivel de detección mínima simple, y se eligió el valor que mejor suavice la textura y ruido causado por vegetación sin comprometer los patrones de erosión y sedimentación.



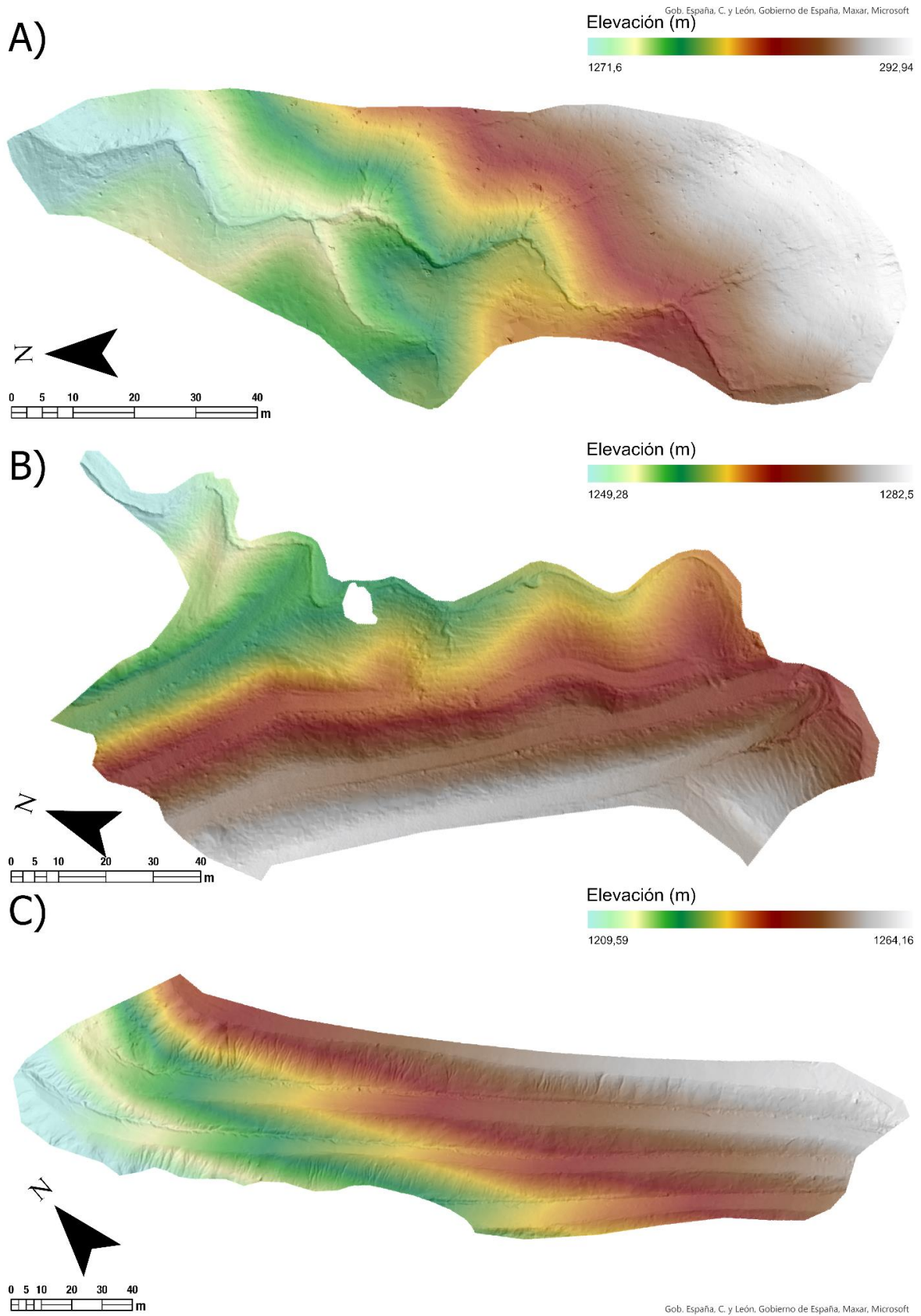
**Figura 3:** diagrama de flujo de la metodología donde se detallan las tres fases de simulaciones para este estudio.

#### **4.4. Datos de entrada**

Para poder generar una simulación de C-L en modo cuenca, se requiere importar ciertos datos de la zona de estudio. Se necesita una topografía inicial, una serie de precipitación, datos de granulometría de hasta 9 rangos diferentes y la pendiente de las celdas de la salida del modelo (Lowry et al., 2013). Aunque se pueden importar más datos específicos de la zona, para este estudio se utilizaron estos 4 datos.

##### **4.4.1. Topografías**

Para la primera fase de simulaciones, se usaron topografías en formato de Modelos Digital de Terreno (MDT) que representan el terreno y que se generan a partir de Modelos Digitales de Superficie (MDS). Los MDS son topografías que representan el terreno con todos los elementos visibles desde el aire como vegetación, edificios y estructuras. A través de un proceso en donde se eliminan estos elementos que no son parte del terreno, se genera el MDT a partir del MDS. Todas las topografías de este estudio han sido proporcionadas por la empresa CAOBAR S.A. en virtud del contrato de transferencia suscrito con el departamento GEODESPAL. Para la primera fase, se usaron dos topografías de una restauración geomorfológica construida en el 2012 como se puede ver en la sección A) de la figura 4 (Zapico et al., 2018). Estas tienen una resolución de 0,10 metros con un error vertical de 0,033 metros. La topografía inicial o de referencia es del 08/04/2015 (en formato dd/mm/aaaa) y la final es del 11/07/2016 con un total de 461 días de diferencia. Después, para la segunda fase de evaluación de la calibración, se usó una topografía en formato MDT de la mina de El Machorro a una resolución de 0,15 metros con un error vertical de 0,05. Específicamente se escogió una zona experimental restaurada en terrazas con algunos criterios geomorfológicos realizada por CAOBAR S.A. y cuyas escorrentías van a parar a una balsa con mantenimiento continuo la sección B) de la Figura 4. La inicial es del 09/12/2019 y la final es del 01/07/2024, en total son 1.667 días de diferencia. Finalmente, en la tercera fase de estimación de la estabilidad, se usó la misma topografía del 01/07/2024, y se recortó una zona con un diseño de terrazas de talud-berma en la sección C) de la figura 4 al igual que la zona de la restauración geomorfológica.



**Figura 4:** MDT de terreno que muestra la A) la restauración geomorfológica, B) restauración mixta y C) la restauración en terrazas.

#### **4.4.2. Precipitación**

Para la primera fase de simulación en donde se genera la calibración del modelo, se usó una serie de precipitaciones de 10 minutos de las 00:00:00 del 08/04/2015 al 23:50:00 del 31/05/2016 obtenidas de un trabajo previo (Zapico et al., 2018). Para ser compatible con C-L, se exportó sólo la columna de precipitación en mm en formato de texto (.txt) sin encabezado de columna en donde cada fila tiene la precipitación en mm de cada intervalo de tiempo o *timestep*, y los decimales divididos con puntos. Esta serie tiene una longitud de 60.474 datos.

Debido a la ausencia de datos de alta resolución para años posteriores, se obtuvo una serie de precipitaciones diarias para la estación de Molina de Aragón del 09/12/2017 al 01/07/2024 en la segunda fase de simulación para la evaluación de la calibración (AEMET, 2024). Esta estación es la más cercana a la zona de estudio y la serie tiene un total de 1.667 intervalos de tiempo correspondientes al número de días tomando en cuenta el último día. Similarmente, de esta serie se exportó sólo la columna de precipitaciones en mm en formato texto, dividido en línea, decimales con punto y sin encabezado de columna.

Para estimar la estabilidad de dos tipos de restauración en la tercera fase de simulación, se obtuvieron precipitaciones diarias obtenidas de adapteCCa.es (2024), del 01/01/2024 hasta el 31/12/2100 de Poveda de la Sierra. Se usó el promedio de precipitaciones diarias de 30 modelos de cambio climático usando la trayectoria de concentración representativa 'RPC' de 8,5 o un forzamiento radiativo de 8,5 W/m<sup>2</sup> para el 2100, que representa el peor escenario de cambio climático adoptado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático 'IPCC'. En la serie vienen las precipitaciones diarias en mm hasta el 31/12/2100 de 30 modelos diferentes. Esta serie viene arreglada en 31 columnas, cada columna correspondiente a un día del mes, y cada fila de datos corresponde a un mes de cada año de cada uno de los 30 modelos (adapteCCa.es, 2024). Para esto, se agruparon las filas por modelo y mes obteniendo el promedio de las precipitaciones de cada columna o cada día. Finalmente se generó una sola columna en donde se tenía una sola fila con un dato diario de precipitación de 2024 al 2100, en formato texto, dividido en líneas, los decimales con punto y sin encabezado de columna.

#### **4.4.3. Granulometría**

Los datos de granulometría fueron cedidos por CAOBAR, S.A., en donde vienen 11 rangos de tamaño de partícula con la proporción correspondiente, que finalmente se redujeron a 9 rangos agrupando los dos valores mínimos y los dos valores máximos para importarlos a C-L.

#### **4.4.4. Pendiente**

Para determinar la pendiente de las celdas del borde, o la pendiente de salida de agua del modelo, se recomienda calcular la pendiente media en m/m del fondo del valle del modelo (Caesar-Lisflood webpage, 2019). Este valor se obtuvo vectorizando una línea que recorre el fondo del canal principal de la topografía que se usó para la calibración, desde la salida de agua del modelo aguas arriba hasta la primera intersección donde confluyen 2 canales. Se calculó usando la distancia total de la línea, y se dividió entre la diferencia de valor del píxel ubicado en el primer vértice de la línea y el valor del píxel en el último vértice de la línea.

#### **4.5. Fase 1: Calibración**

Para poder obtener una parametrización adecuada del software C-L que refleje la realidad, es necesario generar varias simulaciones, y en cada una de estas simulaciones se ajustará el valor de ciertos parámetros hasta encontrar la combinación que más se aproxime a los datos reales (Nair et al., 2023). En esta sección se usaron las topografías de la restauración geomorfológica del 2015 al 2016. Para esto se definieron ciertos parámetros que permanecieron fijos para todas las simulaciones y otros parámetros que se usaron para calibrar el modelo. Estos parámetros determinan diferentes procesos sedimentológicos, hidrológicos, de vegetación, procesos de ladera y de flujo que afectan la evolución topográfica a través del tiempo. Para los parámetros fijos se obtuvieron de valores recomendados en la literatura y de pruebas previas a la generación de este estudio en donde se obtuvieron buenos resultados. Por otra parte, los parámetros de calibración se eligieron tomando en cuenta aquellos que tengan un mayor control sobre los procesos que afecten directamente la erosión, y se definieron ciertos valores para cada parámetro de calibración (Walsh et al., 2020).

Para cada simulación se ajustó un valor de cada parámetro a la vez, permitiendo así analizar la respuesta geomorfológica de ese parámetro en el patrón de sedimentación y erosión, al igual que la tasa de erosión. Con esto, se definió una secuencia de simulaciones con parámetros de calibración específicos. Después, se generaron las diferentes simulaciones con la topografía de la restauración geomorfológica del 08/04/2015 (ver Anexo 1), al 11/07/2016 usando con la precipitación con una resolución de 10 minutos. Para cada simulación, se exportó el MDT final simulado para el 2016 y se generó la tasa de erosión en  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$  comparando con el MDT inicial real del 2015 en GCD. Finalmente, se compararon las tasas de erosión de cada simulación con la tasa de erosión real, eligiendo los parámetros de la simulación que tuviera la tasa de erosión más cercana a la real. Cabe resaltar que debido a las incertidumbres generadas por la eliminación de elementos de la superficie que no pertenecen al terreno pasando del MDS a MDT, se obtuvieron las tasas de erosión en GCD solamente de la zona canalizada dentro de la restauración morfológica para evitar introducir errores por vegetación. Se usaron estas topografías ya que se cuenta con dos diferentes

estimaciones de la tasas de erosión, una estimadas a través de comparar ambas topografías al igual que este estudio, y otra al estimar los sedimentos acumulados en la balsa aguas abajo de la restauración (Zapico et al., 2018).

#### **4.6. Fase 2: Evaluación**

Para poder tener un referente con el cual estimar el grado en el cual se refleja la realidad los parámetros elegidos, se usaron los parámetros calibrados en el paso anterior para simular la erosión de una zona con restauraciones mixtas dentro de la mina de El Machorro, ya que es una zona geomorfológicamente más compleja (ver Anexo 2). Estas topografías son reales pero a diferencia de la restauración geomorfológica del Machorro no se dispone de un valor real medido en campo de control como fue la balsa de sedimentación. Primero, se generó la simulación en C-L usando los parámetros calibrados con la topografía de la restauración mixta del 09/12/2019 usando los datos de precipitación diaria del AEMET (2024), simulando hasta el hasta el 01/07/2024. Después se obtuvieron las tasas de erosión reales y simuladas para ese periodo a través de GCD. Esto permitió obtener un porcentaje de error comparando ambas tasas de erosión para el siguiente paso de la estimación de la estabilidad a futuro.

#### **4.7. Fase 3: Estimación de estabilidad**

A modo de evaluación prospectiva se aplicó la parametrización realizada en la primera fase para evaluar la estabilidad superficial de ambos tipos en el futuro en un contexto de cambio climático. Los dos métodos de restauración más importantes en la zona de estudio son las restauraciones convencionales en terrazas y las basadas en criterios geomorfológicos. Para esta fase, se usó el MDT de dos zonas de la mina a fecha del 01/07/2024, la restauración geomorfológica que se usó en la calibración y la otra son unas terrazas con sistema talud-berma de reciente creación (ver anexo 3). Para optimizar el tiempo de procesamiento, primero se simularon ambas topografías para el período comprendido entre 01/07/2024 y 01/07/2034. Los MDT resultantes de esta primera simulación se utilizaron como punto de partida para simular hasta el 01/07/2049. Finalmente, los MDT generados para este segundo período se emplearon para llevar a cabo la simulación hasta el 01/07/2099. Para estas simulaciones se usaron los parámetros calibrados en C-L a futuro usando la serie de precipitación de adapteCCa.es (2024) correspondiente para cada periodo simulado. Estas tasas nos permitirán tener una idea general de cómo puede evolucionar la estabilidad superficial de ambas restauraciones en cuanto a los procesos erosivos.

## 5. RESULTADOS

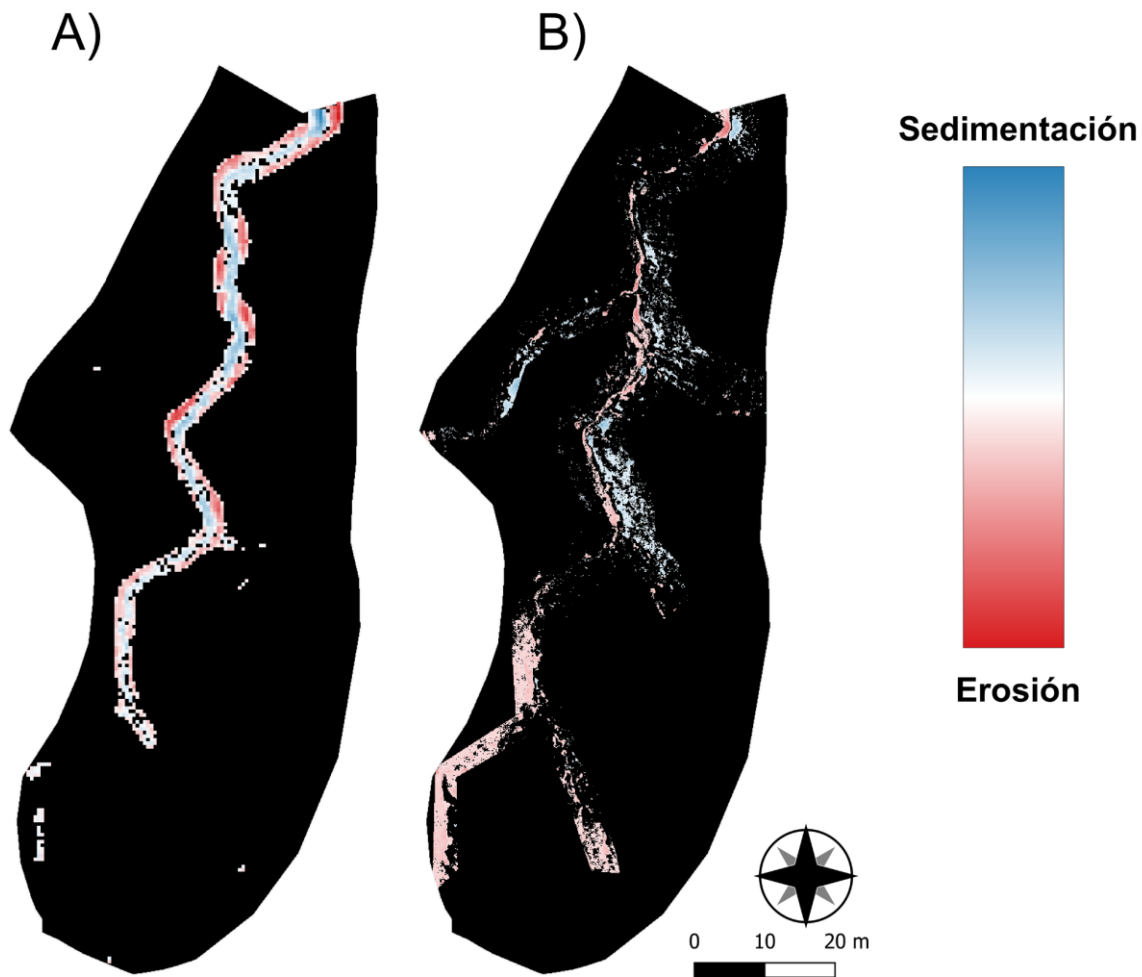
### 5.1. Fase 1: Calibración de parámetros

En Anexo 4, se muestran todos los parámetros usados para las simulaciones, así como el valor elegido y su explicación. De todos esos parámetros se generaron 10 simulaciones ajustando 4 parámetros que se pueden ver en la Tabla 1. El *In-channel erosion rate* ( $\lambda$ ) o tasa de erosión dentro del canal, controla que tan ancho o angosto será el corte de la erosión en los canales al afectar la facilidad con la que se erosiona el sedimento dentro del canal, y se usaron valores de 1, 10 y 20 (Feeney et al., 2020; Caesar-Lisflood webpage, 2019). El parámetro '*m*' value controla la respuesta de la escorrentía superficial generada a partir de la precipitación con valores de 0,005, 0,001, 0,0007 y 0,0005 (Nair et al., 2023). El parámetro de *Lateral erosion rate* ( $\theta$ ) o tasa de erosión lateral, determina la sinuosidad y el patrón de meandro de los canales, y se usaron los valores 0,0005, 0,00005, y 0,000002. Finalmente, el parámetro de *No. of passes for edge smoothing filter* o número de iteraciones para el filtro de suavizado del borde que determina el número de iteraciones de suavizado que ocurren en los bordes del canal y se usaron valores de 50, 25 y 3 (Caesar-Lisflood webpage, 2019).

**Tabla 1:** Parámetros usados para las 10 simulaciones de calibración y los resultados en tasas de erosión.

Número de simulación	Parámetros de simulación				Tasa de erosión (m <sup>3</sup> )		Tasa de erosión (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	
	In-channel erosion rate ( $\lambda$ )	'm' value	Lateral erosion rate ( $\theta$ )	No. of passes for edge smoothing filter	(m <sup>3</sup> )	error ( $\pm$ )	Mg	error ( $\pm$ )
Real	-	-	-	-	11,79	9,92	23,93	20,14
1	10	0,005	0,0005	50	0,01	0,05	0,02	0,10
2	10	0,001	0,0005	50	0,01	0,05	0,02	0,10
3	10	0,0007	0,0005	50	4,19	14,18	8,51	28,78
4	1	0,0007	0,0005	50	0,13	13,78	0,26	27,97
5	1	0,0007	0,000002	50	1,94	5,35	3,94	10,86
6	20	0,0007	0,000002	50	4,69	6,11	9,52	12,40
7	10	0,0007	0,000002	50	4,2	6,15	8,53	12,48
8	10	0,0007	0,000002	3	2,91	6,1	5,91	12,38
9	10	0,00005	0,000002	3	9,25	7,37	18,78	14,96
10	10	0,0007	0,00005	25	4,89	10,89	9,93	22,11

Las simulaciones para esta sección se llevaron a cabo con una resolución de píxel de 0,50 metros para reducir el tiempo de procesamiento, pero se usó la tasa de erosión real usando las topografías a 0,10 m de resolución de píxel como referente real. La simulación número 9 tuvo los mejores resultados (Tabla 1), con una tasa de erosión de  $18,78 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  del 2015 al 2016, comparado con  $23,93 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  respectivamente del cambio real observado, lo que indica que el modelo calibrado predice las tasas de erosión reales a un 78,5%. En el anexo 5, se pueden ver las comparativas de la topografía final real y simulada. Por otro lado, los patrones de erosión observados para la simulación 9 y el observado real (ver Figura 5), indican que la simulación genera un patrón de erosión/sedimentación muy marcada a la zona activa del canal mientras que en la realidad es mucho más difuminado y también aparece en zonas fuera del canal activo. Igualmente, se observa un patrón cuadrículado en la topografía de la simulación en la sección C) de la figura 5 que difiere con la topografía real en la sección D).



**Figura 5:** Diferencia de DEMs de los periodos del 2015 - 2016 para A) la simulación no. 9 y B) el real; al igual que C) la topografía del 2016 de la simulación 9 y D) la topografía 2016 real.

Para obtener un error vertical de las simulaciones, se analizaron varios valores para obtener un nivel mínimo de detección simple incluyendo 0,01, 0,02, 0,03 y 0,04 m. Se decidió usar un valor de 0,03 m ya que permitió suavizar el ruido de las simulaciones sin comprometer los patrones de sedimentación y erosión. En la figura 5, sección C, aparece un patrón cuadrículado de erosión/deposición, que es suavizado en su totalidad usando este nivel de detección mínimo. El nivel mínimo de detección de 0,03 metros se usó para el resto de las simulaciones en las fases de evaluación de calibración y estimación de la estabilidad.

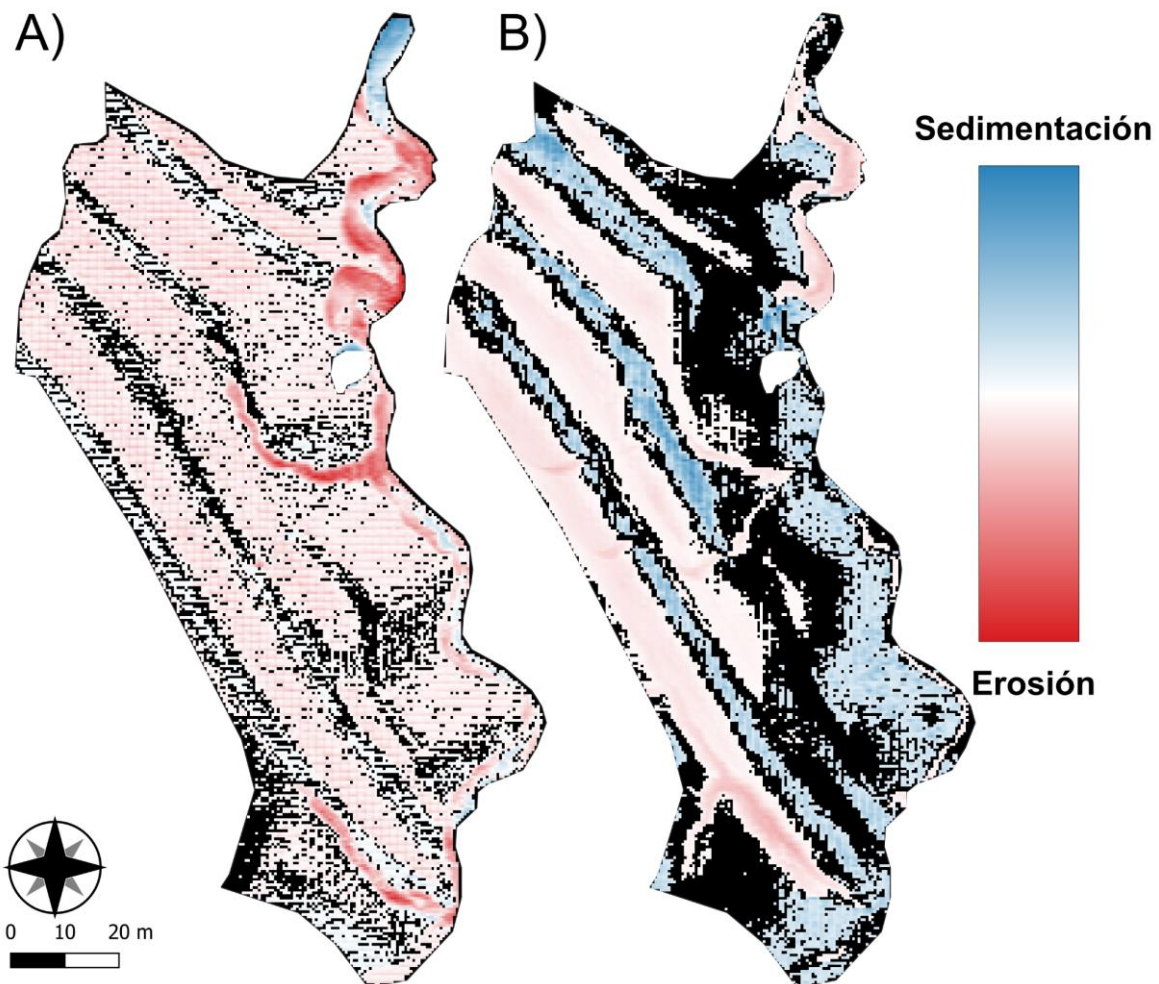
## **5.2. Fase 2: Evaluación de la calibración**

Se generó una simulación del 09/12/2019 hasta el 01/7/2024 para una zona con una mezcla de terrazas y restauración morfológica, que usando el MDT real inicial y comparándolo con el MDT simulado, se obtuvo una tasa de erosión de 293,47 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Tabla 2) usando el un nivel mínimo de detección de 0,03 metros. Por otro lado, el cambio topográfico real del 09/12/2019 al 01/7/2024, obtuvo una tasa de erosión de 433,38 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. En el anexo 6, se pueden ver las comparativas de la topografía final real y simulada.

Tabla 2: Se muestran los resultados de las simulaciones y sus referentes reales de las 3 fases de este estudio.

Nombre	Fecha inicial	Fecha final	Número de días	Área de estudio (m <sup>2</sup> )	Tasa de erosión (m <sup>3</sup> )		Tasa de erosión (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	
					(m <sup>3</sup> )	error (±)	Mg	error (±)
<b>Calibración de parámetros</b>								
Restauración geomorfológica real	8/4/2015	11/7/2016	461	4680	11,79	9,92	23,93	20,14
Restauración geomorfológica calibrada	8/4/2015	11/7/2016	461	4680	9,25	7,37	18,78	14,96
<b>Evaluación de calibración</b>								
Restauración mixta real	9/12/2019	1/7/2024	1.667	8439	1391,91	250,32	433,38	77,94
Restauración mixta simulada	9/12/2019	1/7/2024	1.667	8439	942,57	163,17	293,47	50,80
<b>Estimación de estabilidad</b>								
R. geomorfológica	1/7/2024	1/7/2034	3.653	4680	80,61	12,45	20,65	3,19
R. geomorfológica	1/7/2024	1/7/2049	9.132	4680	118,32	24,9	12,12	2,55
R. geomorfológica	1/7/2024	1/7/2099	27.394	4680	147,53	48,53	5,04	1,66
R. geomorfológica	1/7/2034	1/7/2049	5.480	4680	35,89	13,9	6,13	2,37
R. geomorfológica	1/7/2049	1/7/2099	18.263	4680	34,97	30,51	1,79	1,56
Terrazas	1/7/2024	1/7/2034	3.653	15241	493,02	67,76	38,79	5,33
Terrazas	1/7/2024	1/7/2049	9.132	15241	1308,22	158,92	41,17	5,00
Terrazas	1/7/2024	1/7/2099	27.394	15241	2273,92	260,09	23,86	2,73
Terrazas	1/7/2034	1/7/2049	5.480	15241	775,51	100,99	40,67	5,30
Terrazas	1/7/2049	1/7/2099	18.263	15241	933,16	214,47	14,68	3,37

En la Figura 6, se muestran los patrones de erosión y sedimentación reales, A y las simuladas, B. Se puede observar que, aunque las zonas de erosión se concentran en las zonas de pendientes en ambos DoDs, el DoD simulado no logra replicar el sedimento acumulado al pie de las pendientes de los taludes, al igual que sobreestimar la erosión del canal principal y de dos cárcavas principales. Similarmente, en la sección A de la figura 6, se observa un patrón cuadrículado o pixelado de erosión.

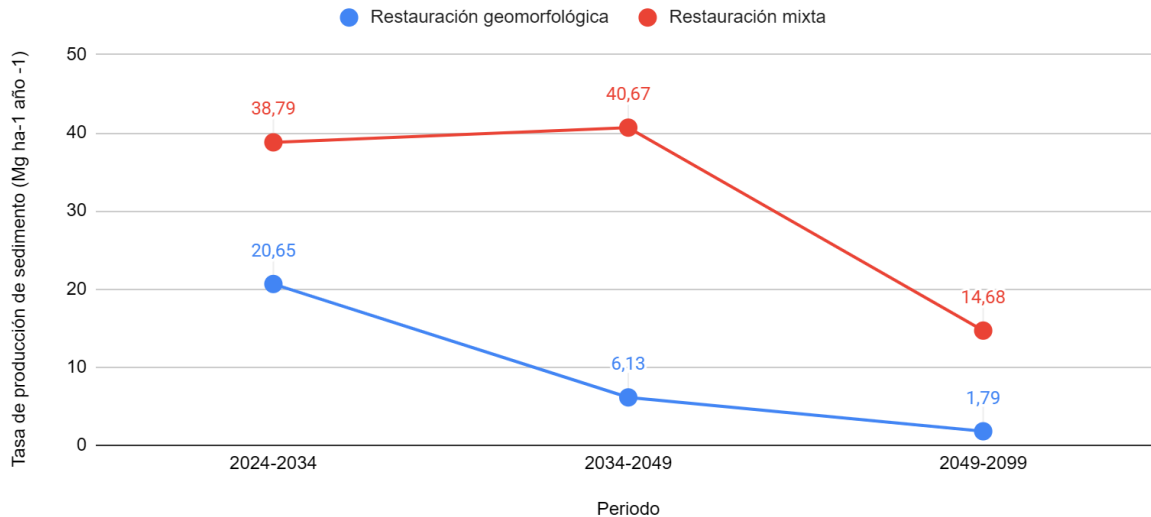


**Figura 6:** Diferencia de DEMs de los periodos 2019 - 2024 de la zona de restauración mixta para A) la topografía simulada del 2024 y B) la real del 2024.

Por otra parte, debido a que los intervalos de precipitación usados en la calibración son de 10 minutos y los de la evaluación son diarios, se tuvieron que ajustar ciertos parámetros para que se represente mejor la precipitación y se reduzca el tiempo de simulación. Los parámetros que se cambiaron de la simulación de calibración a él de evaluación de la calibración fueron *Min Q for depth calculation* de 0,0001 a 0,005, *Water depth threshold above which erosion will happen (m)* de 0,00001 a 0,005, y *'m' value* de 0,00005 a 0,005 respectivamente.

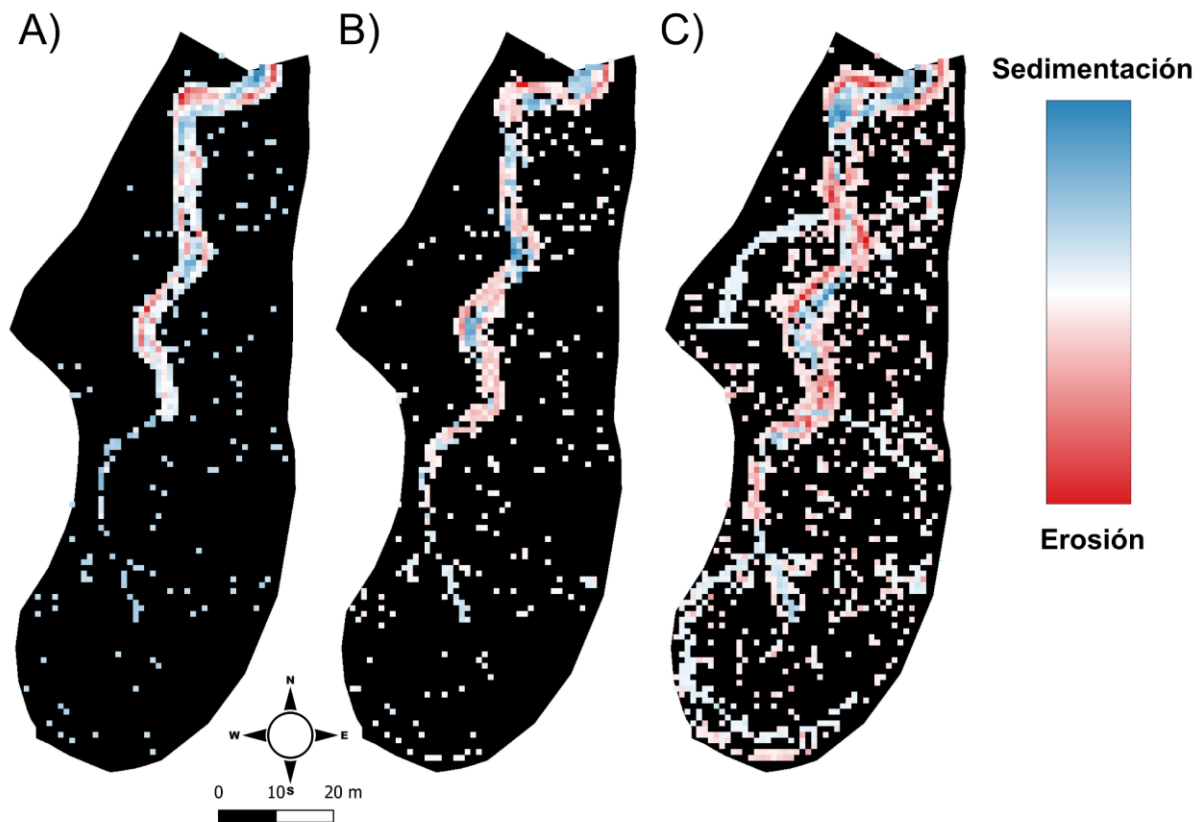
### 5.3. Fase 3: Estimación de la estabilidad

Para la estimación de la estabilidad se generaron simulaciones usando los parámetros calibrados y adaptados a la precipitación diaria para la restauración geomorfológica (ver Anexo 7) y las terrazas nuevas (ver Anexo 8) usando los parámetros calibrados y ajustados para el 2034, 2049 y 2099. Para la restauración geomorfológica para el periodo del 2024-2034 se obtuvieron tasas de erosión de  $20,65 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , para 2034-2049, fue de  $6,13 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y para el periodo de 2049-2099 fue de  $1,79 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Tabla 2). Por otro lado, las terrazas en el periodo de 2024-2034 tuvieron una tasa de erosión de  $38,79 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , para 2034-2049 tuvieron una tasa de erosión de  $40,67 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ; finalmente para el periodo de 2049-2099 tuvieron una tasa de erosión de  $14,68 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Esto indica que las terrazas tuvieron un aumento de las tasas de erosión para el periodo de 2034-2049 y después un decrecimiento como se puede ver en la figura 7. Por otro lado, la restauración geomorfológica se ve un decrecimiento de las tasas de erosión en el tiempo. Entre 2034 y 2049, la restauración geomorfológica presentó una tasa de erosión más de seis veces menor que la restauración mixta. Mientras que para el período de 2049 a 2099, la tasa de erosión fue más de ocho veces menor. Cabe resaltar que para reducir el tiempo de procesamiento de las simulaciones se redujo la resolución de píxel de ambos MDT a 1,0 m.



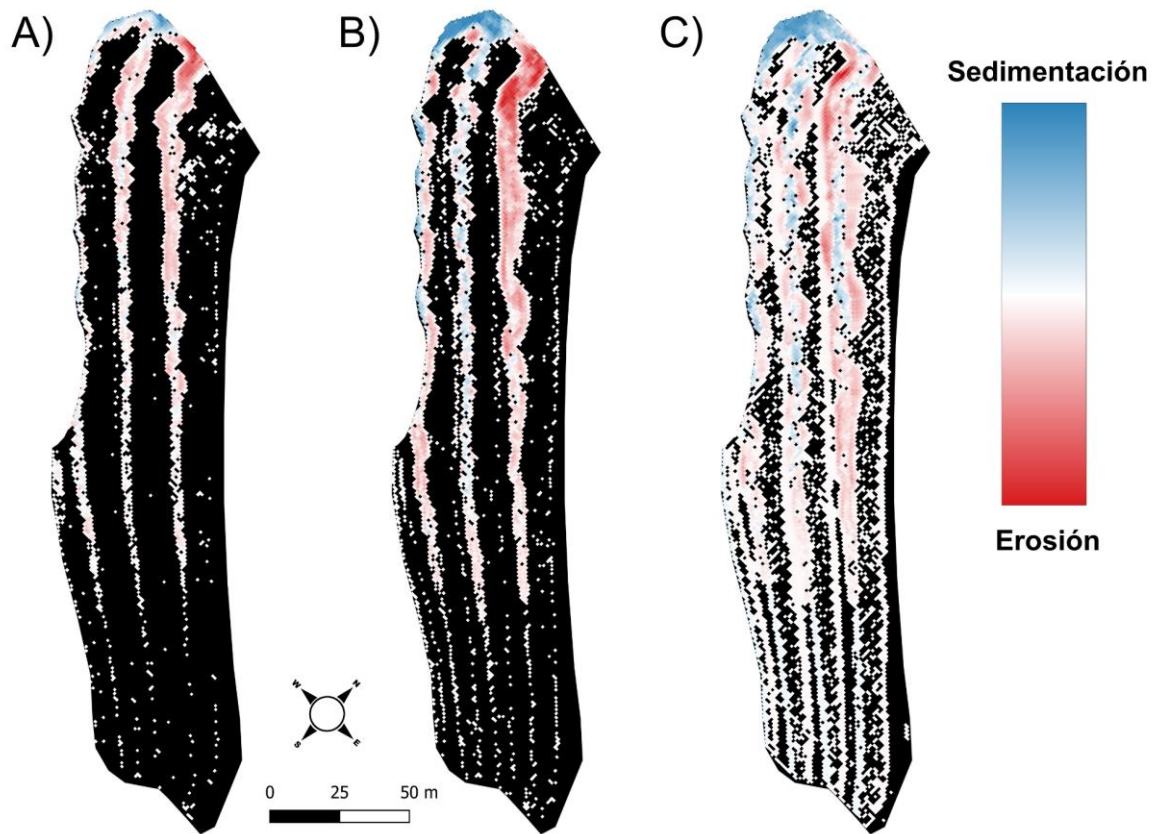
**Figura 7:** Tasas de erosión de las dos restauraciones para los periodos de 2024-2034, 2034-2049 y 2049-2099.

Los patrones de erosión para la restauración geomorfológica en la figura 8, muestran que principalmente hay movimiento de sedimento en la parte interna del canal y un ensanche del mismo en el tiempo de la sección A a la C. También se ve un patrón de erosión en el banco externo convexo del meandro y sedimentación en el interno. También, es sólo hasta el periodo de 2049-2099 comienza a haber erosión/sedimentación en la zona de vaguadas y en canales secundarios, donde hay sedimentación.



**Figura 8:** Diferencia de DEMs para las simulaciones de la restauración geomorfológica para a) 2024 - 2034, b) 2024 - 2049 y c) 2024 - 2099 usando un nivel de detección mínimo de 0,03m.

Por otro lado, los patrones de erosión en las terrazas en la figura 9, muestran cómo se erosionan principalmente las bermas generando cárcavas profundas a través del tiempo en dirección a la pendiente. Dicho esto, la pendiente de los taludes no decrece ni se ve afectada, y es sólo la parte del talud más bajo en el extremo noroeste que obtiene una forma redondeada a través del tiempo.

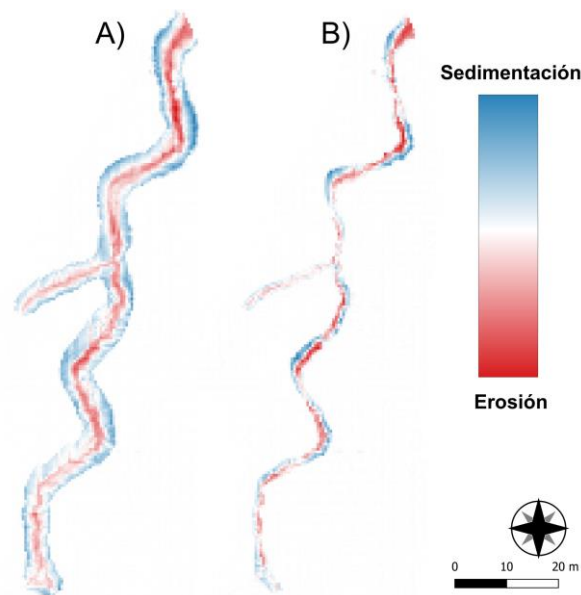


**Figura 9:** Diferencia de DEMs para las simulaciones de las terrazas para a) 2024 - 2034, b) 2024 - 2049 y c) 2024 - 2099 usando un nivel de detección mínimo de 0.03m; y las topografías simuladas para D) 2034, E) 2049 y F) 2099.

## 6. DISCUSIÓN

### 6.1. Fase 1: Calibración de los parámetros

El parámetro de calibración de Lateral erosion rate ( $\theta$ ) es una variable dentro de una ecuación que determina la tasa de cambio de elevación en el margen del río y controla la rapidez de migración lateral del río (Feeney et al., 2020). Se eligieron valores bajos debido a que son más aptos para zonas con poca migración lateral, y a valores arriba de 0,0001 son valores usados para ríos que tienen tasas altas de migración lateral (Caesar-Lisflood webpage, 2019). El cambio de este valor de 0,0005, obtenido de Hancock et al. (2015), a 0,000002, obtenido de Hooper et al. (2017), para las simulaciones de calibración 4 y 5 respectivamente, muestra una reducción significativa en la anchura del canal activo (figura 10). Pasa de tener una franja de sedimentación uniforme y ancha en el banco del río, a tener franjas de sedimentación muy localizadas en las zonas externas de los meandros. En la realidad, la sedimentación ocurre en la parte interna de los meandros, pero se eligió un valor bajo debido a que produce un canal activo mucho más angosto. Este parámetro puede ser usado para controlar la anchura de tanto las cárcavas como el canal activo.

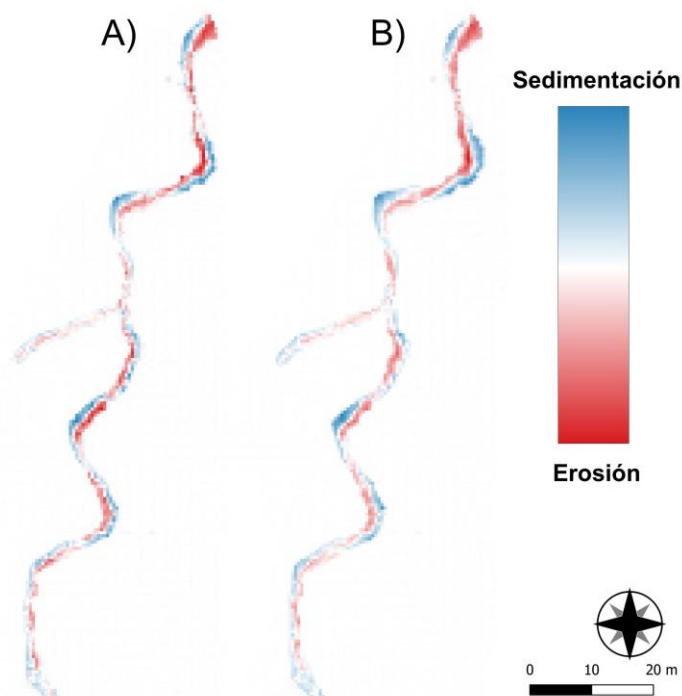


**Figura 10:** DoD de la restauración geomorfológica de 2015-2016 para a) la simulación no. 4 y b) la simulación no. 5.

El parámetro de 'm' controla la velocidad y magnitud de respuesta del hidrograma a la precipitación, y a valores más bajos, se produce mayor escurrimiento superficial (Nair et al., 2023). Idealmente debería ser ajustado para poder replicar el hidrograma medido en la desembocadura de la zona de estudio (Nair et al., 2023). En el caso de éste estudio, no se usaron los datos de caudal de salida disponibles en Zapico et al. (2018) para calibrar este parámetro a la realidad, usándose solamente como parámetro de ajuste para la calibración

del modelo. Dicho esto, el parámetro 'm' tiene una gran influencia en la tasa de erosión, ya que de la simulación 8 a la 9, se ajustó el valor del parámetro de 0,0007 a 0,00005, incrementando significativamente la tasa de erosión de -5,91 a -18,78 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Por lo que en zonas sin datos de caudal, permite ser usado para incrementar o reducir la tasa de erosión.

El parámetro In-channel erosion rate ( $\lambda$ ) es una variable que controla la transferencia de sedimento lateral entre dos celdas dentro del canal, y simula la cohesividad del sedimento en los bancos del canal (Feeney et al., 2020). Al incrementar el valor de este parámetro, decrece la cohesividad de los sedimentos y genera canales anchos y poco profundos, mientras que valores altos generan canales angostos pero profundos (Feeney et al., 2020). En la simulación de calibración 5 y 6, se cambió el valor de  $\lambda$  de 1 a 20, pero no se observó ningún cambio significativo en el patrón de sedimentación y erosión evidente en la figura 11. Dicho esto, si hay un aumento considerablemente de las tasas de erosión de -3,94 a -9,52 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> al simular sedimento con menos cohesividad. Este parámetro entonces permite ajustar la tasa de erosión del modelo al incrementar la movilidad del sedimento.



**Figura 11:** DoD de la restauración geomorfológica de 2015-2016 para a) la simulación no. 5 y b) la simulación no. 6.

El parámetro de *No. of passes for edge smoothing filter* determina el radio de curvatura de los meandros, y a valores más bajos, decrece el radio y aumenta su frecuencia (Feeney et al., 2020). En la simulación 7 de la figura 12, se usa un valor de 50 y se observan pocos meandros representados por bancos de sedimentación largos y anchos en la parte exterior del meandro. Después, en la simulación 8 (Figura 12, sección B), usando un valor de 3,

aumenta la frecuencia de meandros, pero pasan a tener zonas cortas y angostas de sedimentación, al igual que una reducción en la cantidad de sedimento erosionado. Se usó un valor bajo ya que no hay un patrón claro de zonas de sedimentación en la orilla externa de los meandros en el DoD original (ver Figura 5, sección B), al igual que se esperaría que la parte externa del meandro tenga erosión y no sedimentación. Aquí posiblemente haya un parámetro que no fue considerado a detalle que tenga un control sobre la erosión o deposición de material en la parte externa de los meandros.

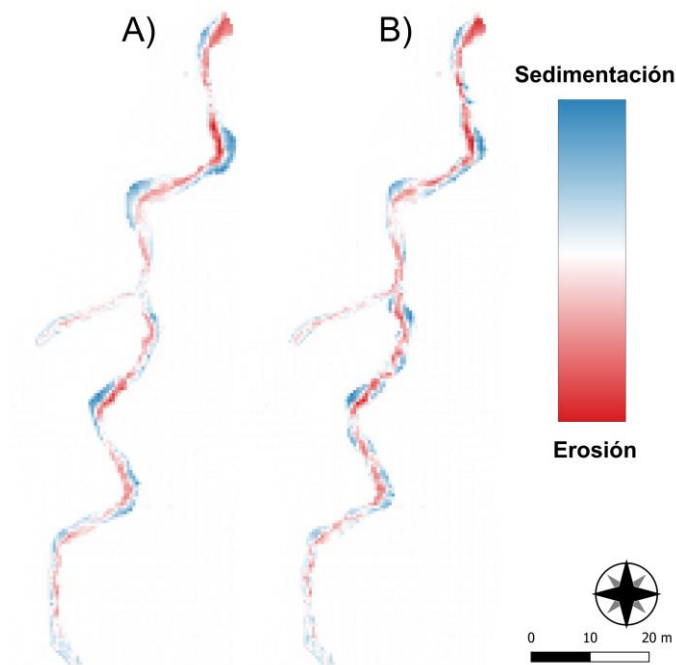


Figura 12: DoD de la restauración geomorfológica de 2015-2016 para a) la simulación no. 7 y b) la simulación no. 8.

La vegetación es uno de los parámetros que puede ser utilizado para la calibración ya que es de los factores que más influyen en la producción de sedimento (Lowry et al., 2019; Skinner y Coulthard, 2023). En este caso, en la fase de calibración se observa un aumento de la vegetación del 2015 al 2016, y la topografía tiene un 29% de la superficie con cobertura vegetal para el 2016 (Zapico et al., 2018), por lo que se decidió dejar la vegetación como parámetro fijo para replicar mejor la realidad. Se usaron valores promedio de pastos para resistencia al corte, maduración y proporción de erosión permitida en la maduración obtenidas de Feeney et al. (2020).

Al usar una serie de precipitación de muy alta resolución en la fase 1 de calibración, en este caso en intervalos de 10 minutos, hubo simulaciones en la fase de calibración en donde no se generaba ni erosión ni caudal, específicamente las simulaciones 1 y 2. Esto estaba marcado por un límite mínimo en los parámetros '*m*' value y *Min Q for depth calculation*. Por un lado, el '*m*' controla la respuesta de la escorrentía basado en la precipitación, y entre

menor sea el valor, se genera una mayor producción de escorrentía superficial (Nair et al., 2023). Un valor mayor a 0,0007, como los usados en las simulaciones 1 y 2, no producía caudal líquido ni sólido del modelo. Dicho esto, contrasta con otros estudios en donde se usan valores para '*m*' value de 0,01 para intervalos de precipitación de 10 minutos, lo que sugiere que uno o más parámetros influyen en la producción de flujo líquido y sólido (Coulthard et al., 2013). Por otro lado el *Q min*, define el límite de caudal a partir del cual se estimará el calado o espesor de la lámina de agua, y se puede usar para reducir tiempo de procesamiento para evitar calcular velocidad de flujo en caudales muy bajos (Caesar-Lisflood webpage, 2019). Aunque se mantuvo como parámetro fijo usando un sólo valor de 0,0001 para todas las simulaciones de calibración, generaba un efecto similar en la realización de pruebas previas a la calibración. Un valor muy alto, mayor de 0,0001, no producía caudal sólido ni líquido, inclusive siendo un valor menor que el recomendado en Caesar-Lisflood webpage (2019) y el software de 1/100 de la resolución del MDT o 0,005, y el recomendado por Feeney et al. (2020) de 1/10 de la resolución del MDT de 0,05. Posiblemente, este valor tuvo que ser muy bajo ya que los valores de las precipitaciones junto con el tamaño pequeño de la cuenca no permitían producir suficiente escorrentía como para generar el caudal necesario para calcular profundidad de la lámina de agua (Feeney et al., 2020). Dicho esto, posiblemente hay otros parámetros que influyen en la generación de flujo líquido y sólido que no fueron analizados en este estudio.

En la primera fase de calibración, se utilizaron intervalos de precipitación de 10 minutos, lo que permitió ajustar los parámetros a las condiciones climáticas reales y generar una parametrización muy específica del sitio. Igualmente, el uso de una precipitación con intervalos muy cortos permite modelar eventos individuales de tormentas y chubascos fuertes, que son generalmente responsables de producir la mayoría de la erosión (Lowry et al., 2015). Por esto, se decidió calibrar el modelo con esta serie de precipitaciones a pesar de no contar con una serie de precipitaciones con intervalos mayores a un día para la segunda fase de evaluación y tercera estimación de la estabilidad superficial. Dicho esto, al usar los mismos parámetros con una resolución temporal de lluvia menor, se generaba mucha más erosión de la prevista. Esto contrasta significativamente con Coulthard y Skinner (2016), donde encuentran lo opuesto ya que, al incrementar la resolución temporal de la lluvia de intervalos de 1 día a 15 minutos, junto con la resolución espacial, incrementa la tasa de erosión. Consecuentemente, la parametrización se tuvo que ajustar para la segunda y tercera fase, para adecuar la respuesta de la escorrentía con la precipitación y reducir el tiempo de procesamiento.

En este estudio, las resoluciones temporales son 144 veces mayores para la calibración, o alrededor de 2,16 órdenes de magnitud mayor, y por esto se aumentó el valor de los parámetros de '*m*' value a 0,005 desde 0,00005 (2 órdenes de magnitud mayor). Por

otro lado, se ajustó el valor del parámetro de *water depth threshold over which erosion will happen* a 0,005 y el valor del parámetro *Min Q for depth calculation* a 0,005 con el consenso de encontrar un valor mínimo para generar flujo de agua y sedimento.

Para el procesamiento, en la fase de simulación para calibrar los parámetros se redujo la resolución del MDT de 0,10 a 0,50 metros, en la fase de evaluación de 0,15 a 0,50 metros, y en la fase de estimación de la estabilidad de 0,15 a 1,0 metros para decrecer el tiempo de procesamiento. Dicho esto, en ambos casos se usó la tasa de erosión de las resoluciones originales mientras que la simulación se llevó a cabo usando los MDT con menor resolución. El incremento del tamaño del píxel para reducir tiempos de procesamiento no afecta los resultados de las simulaciones de C-L mientras que no degrade la forma y geomorfología de la red de drenaje existente en el MDT (Skinner y Coulthard, 2023). En el caso de este estudio, la red de drenaje en las topografías usadas permanece bien definida y representada tanto en la resolución original como en la reducción a 0,50 y 1,0 metros respectivamente.

Las tasas de erosión reales de la restauración geomorfológica del 2015 al 2016 obtenidas en este estudio de  $23,93 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  son similares a las estimadas en Zapico et al. (2018) de  $20,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y ambas tasas se obtuvieron de al generar una comparación de topografías. Posiblemente la discrepancia se deba a que en este estudio se midió la diferencia topográfica sólo en la parte de canales de la restauración. Por otro lado, en Zapico et al. (2018) se generaron tasas de erosión obtenidas de comparar topografías de la acumulación de sedimento en la balsa donde desemboca la salida de agua, obteniendo un valor de  $18,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , muy similares a la tasa de erosión obtenida en la simulación 9 de  $18,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Esto demuestra que las tasas de erosión obtenidas en la simulación son bastante similares a la realidad.

Dicho esto, aunque la calibración predice de manera satisfactoria las tasas de erosión, especialmente con las tasas obtenidas de la comparación de sedimentación en las balsas, el patrón de erosión y sedimentación simulado difiere significativamente de la realidad. Esto genera un riesgo al simular estos parámetros calibrados a escalas más largas de tiempo, ya que la respuesta de la erosión a un patrón de erosión/sedimentación errónea incrementará el porcentaje de error de las tasas de erosión a través de los años. Por esto, es esencial que para simular el cambio topográfico a escalas más grandes de tiempo, se necesite una forma de evaluar los patrones de erosión y sedimentación dentro de la fase de calibración.

## **6.2. Fase 2: Evaluación de la calibración**

En el DoD de evaluación, la erosión visible fuera de los canales y cárcavas, tienen un patrón cuadrículado de erosión. Esto igualmente se ve en las simulaciones de calibración sin el nivel de detección mínimo de 0,03. En la literatura este fenómeno se conoce como checkerboarding, en donde se generan zonas de erosión o sedimentación en un patrón similar

a un tablero de ajedrez (Coulthard et al., 2013). Esto ocurre si se tiene un número de Froude o Courant muy altos (Coulthard et al., 2013; Feeney et al., 2020). Tanto en el número de Froude, usando un valor de 0,8 indicando un flujo subcrítico, al igual que el número de Courant de 0,2, son muy bajos para que esto ocurra (Feeney et al., 2020). Esto indica que hay otro parámetro con un valor que supera cierto umbral y causa este fenómeno.

Una gran fuente de incertidumbre en la parametrización en C-L es el crecimiento de vegetación, ya que tiende a no ser uniforme en laderas cóncavas, teniendo una mayor densidad en las partes bajas con menor pendiente (Martín-Moreno et al., 2016). Esto es importante ya que los perfiles longitudinales cóncavos son parte central de las restauraciones geomorfológicas (Zapico et al., 2022), y en C-L la simulación de vegetación es uniforme en toda la zona de estudio. Esto podría indicar que una vez que se tenga vegetación con maduración del 100% en la simulación, el modelo podría estar sobreestimando la erosión en las partes bajas de poca pendiente y subestimando en las vaguadas con más pendiente. Una posible solución sería, incluir la variable espacial del coeficiente de rugosidad de Manning en vez de usar un valor para toda la zona de estudio, como se realizó para estas simulaciones (Nair et al., 2023). Esto con la intención de que el flujo tenga una menor velocidad en zonas con mayor densidad de vegetación al reducir el flujo de agua.

Por otra parte, se llevó a cabo un procesamiento para reducir la vegetación al máximo al pasar el MDS a MDT para ambas topografías usadas en esta fase, esto no se logró del todo. Por esto, en parte la subestimación de las tasas de erosión del 32,2% de la simulación podría estar ocasionado por incluir un cambio volumétrico de la vegetación.

### **6.3. Fase 3: Estimación de la estabilidad**

Las tasas de erosión para restauración geomorfológica, comienza con tasa de erosión altas para el periodo de 2024-2034 con  $20,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  pero para el periodo 2034-2049, se obtienen tasa de erosión de  $6,13 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y finalmente a  $1,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . En Zapico et al. (2018), las tasas reales para la restauración geomorfológica del 11/07/2016 al 24/08/2017 son de 4,02 tomando la diferencia topográfica de las balsas. Esto indica que la simulación está sobreestimando mucho la erosión real en los primeros 10 años, asumiendo que la tasa de erosión de la restauración geomorfológica se haya mantenido en valores bajos del 2017 al 2024.

Posiblemente la restauración geomorfológica tenga tasas de erosión muy altas inicialmente, seguido de un decrecimiento con el tiempo ocasionadas por un efecto llamado *armouring* o blindaje. La precipitación inicialmente erosiona el porcentaje fino del sedimento, que es más fácil de movilizar, e incrementa la proporción de sedimento más grueso y difícil de movilizar, causando una reducción en las tasas de erosión y genera cierto blindaje a la superficie (Hancock et al., 2016). La ecuación de transporte de sedimento usada es Wilcock

& Crowe, en donde calcula la movilidad diferencial dependiendo del tamaño de grano en la superficie del fondo del canal, por lo que se espera que genere un efecto de blindaje conforme progresa el tiempo de simulación (Hancock et al., 2016; Wilcock y Crowe, 2003). Esto representa un problema ya que la restauración geomorfológica, construida 12 años previo al inicio de la simulación, ya tendría cierto blindaje lo que causaría tasas de erosión mucho más bajas para el periodo de 2024-2034. Por otra parte, las terrazas que son mucho más recientes (2023) podrían estar reflejando tasas de erosión más cercanas a la realidad. Por esto, Walsh et al. (2020) y Hancock et al. (2010), recomiendan simular unos años iniciales para reducir el efecto del blindaje, especialmente simulando zonas en las que la restauración no es reciente. Por lo que una posible mejora a este estudio sería simular la erosión de la restauración desde la fecha de construcción en el 2012 a futuro, para tener 12 años iniciales de blindaje previo a estimar la estabilidad superficial a futuro.

Igualmente, la estabilización a tasas de erosión bajas ocurre muy rápido, ya que en 5 años se obtienen tasas de erosión de  $4,02 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  mientras que la simulación se obtienen tasas de erosión de  $6,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en 10 a 25 años. Sólo se simuló a futuro considerando los valores estándares para pastos, pero se tendría que considerar el desarrollo de cobertura vegetal más desarrollada como matorrales e indicar una reducción mayor a la erosión con la vegetación. En la restauración geomorfológica en 2016, se colocaron semillas de especies arbustivas obteniendo una cobertura vegetal del 29% para el 2016 (Zapico et al., 2018), por lo que es muy probable que influya en reducir las tasas de erosión observadas en 2016 al 2017. Por otra parte, se encontraron brotes de especies arbustivas como *Genista scorpius* y árboles como *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Zapico et al., 2018). Esto indica que, para simular a futuro, se tendría que incluir valores recomendados para simular el desarrollo de bosque y no pastos.

#### **6.4. Sigüientes pasos**

En este estudio se realizó un ajuste básico y preliminar para poder generar resultados similares a la realidad con simulaciones, usando series de precipitaciones de intervalos de 10 minutos y de precipitaciones diarias. Aunque la simulación generó resultados aceptables, no hay un consenso general de cómo traducir la parametrización usando una serie de precipitaciones de 10 minutos a una que use precipitaciones con intervalos diarios, las cuales son más accesibles y sencillas de obtener. Por esto, es necesario un estudio que permita comprender el grado de ajuste necesario de ciertos parámetros con el fin de obtener tasas de erosión similares utilizando series de precipitación con diferentes resoluciones. En Coulthard y Skinner (2016), se generan factores de compensación en la ecuación de transporte de sedimento al cambiar de resolución temporal de precipitaciones, que genera tasas de erosión similares, pero afecta el patrón de sedimentación y erosión. Un estudio similar en la zona

permitiría generar factores para ciertos parámetros que simplifique y replique la complejidad de la respuesta de la erosión causada por eventos de gran intensidad en resoluciones menores.

Por otra parte, este estudio se enfocó únicamente en calibrar y comprender el comportamiento específico de cuatro parámetros de C-L, sin detallar otros que se mantuvieron fijos y que se seleccionaron en base a las recomendaciones generales del programa y a lo publicado en otros artículos. Aunque se obtuvieron resultados bastante buenos para generar una calibración de la erosión en ambientes mineros del Alto Tajo, explorar el efecto de otros parámetros podría generar una parametrización más cercana a la realidad. Especialmente al comparar los patrones espaciales de sedimentación y erosión para obtener una calibración que pueda reflejar estos patrones acertadamente (Hoover et al., 2017). Aquí entraría en juego el incluir parámetros únicos como el número de celdas para desplazar la erosión aguas abajo, Diferencia máxima para el suavizado transversal de valores de borde y el Número de Froude, al igual que parámetros con variabilidad espacial dentro del modelo como el coeficiente de rugosidad de Manning.

## **7. CONCLUSIONES**

En conclusión, primero se llevó a cabo la calibración de C-L utilizando la superficie de una restauración geomorfológica, obteniendo tasas de erosión muy cercanas a las reales, aunque no se logró replicar el patrón de erosión y deposición. Posteriormente, estos parámetros se ajustaron a una resolución menor de precipitación y se emplearon para simular la erosión en una restauración mixta, subestimando la erosión en un 32% y nuevamente sin replicar el patrón real de erosión y deposición. Finalmente, se simuló la erosión de la restauración geomorfológica y de unas terrazas a futuro, resultando en tasas de erosión hasta ocho veces menores en la restauración geomorfológica. Esto sugiere que la restauración geomorfológica podría estar sobreestimando los valores reales de erosión.

Estas tres fases de simulación demuestran la complejidad de los parámetros involucrados y las diversas fuentes de incertidumbre que afectan los patrones de erosión y deposición. C-L puede ser una herramienta valiosa para evaluar la estabilidad superficial frente a la erosión en superficies restauradas en la zona minera del Alto Tajo, pero aún requiere más estudios respaldados por datos de campo para mejorar la parametrización y lograr simular simultáneamente los patrones de erosión y sedimentación, al igual que las tasas de erosión reales.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

AdapteCCa.es (2024) *Precipitación diaria del futuro lejano con escenario del RCP 8.5*. Visor de Escenarios de Cambio Climático. Recuperado el 4 de Julio del 2024 de: [https://escenarios.adaptecca.es/#&model=EURO-CORDEX-](https://escenarios.adaptecca.es/#&model=EURO-CORDEX-EQM.average&variable=pr&scenariopc85&temporalFilter=year&layers=MUNICIPALITIES&period=FAR_FUTURE&anomaly=RAW_VALUE&format=report&ids=5728)

[EQM.average&variable=pr&scenariopc85&temporalFilter=year&layers=MUNICIPALITIES](https://escenarios.adaptecca.es/#&model=EURO-CORDEX-EQM.average&variable=pr&scenariopc85&temporalFilter=year&layers=MUNICIPALITIES&period=FAR_FUTURE&anomaly=RAW_VALUE&format=report&ids=5728)  
&period=FAR\_FUTURE&anomaly=RAW\_VALUE&format=report&ids=5728

AEMET (2024) *Climatologías diarias, 3013 - Molina de Aragón, Guadalajara*. AEMET OpenData. Recuperado el 30 de Junio del 2024 de: <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/productosAEMET>

Álvaro-López, M., del-Olmo-Zamora, P. y Gabaldón-López (1985) *Mapa geológico y Memoria de la Hoja nº 539 (24-21) Peralejos de las Truchas*. Mapa Geológico de España E. 1:50.000. MAGNA. IGME.

Bailey, P., Wheaton, J., Reimer, M. y Brasington, J. (2020). Geomorphic Change Detection Software. *Riverscapes Consortium. Version 7.5.0*. Recuperado el 15 de junio del 2024, de: <https://gcd.riverscapes.net/Concepts/error-propagation.html>

Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., y Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R) USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences, 22(11)*, 6059-6086.

Bugosh, N., y Epp, E. (2019). Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic-reclamation watersheds at La Plata Mine. *Catena, 174*, 383-398.

Caesar-Lisflood webpage (2019). *Tab Parameters (description of model parameters)*. caesar-lisflood Wiki, SourceForge. Recuperado el 16 de junio del 2024, de: [https://sourceforge.net/p/caesar-](https://sourceforge.net/p/caesar-lisflood/wiki/Tab%20Parameters%20(description%20of%20model%20parameters)/)  
[lisflood/wiki/Tab%20Parameters%20\(description%20of%20model%20parameters\)/](https://sourceforge.net/p/caesar-lisflood/wiki/Tab%20Parameters%20(description%20of%20model%20parameters)/)

Coulthard, T. J., Neal, J. C., Bates, P. D., Ramirez, J., de Almeida, G. A., y Hancock, G. R. (2013). Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: implications for modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms, 38(15)*, 1897-1906.

Coulthard, T. J., y Skinner, C. J. (2016). The sensitivity of landscape evolution models to spatial and temporal rainfall resolution. *Earth Surface Dynamics, 4(3)*, 757-771.

Feeney, C. J., Chiverrell, R. C., Smith, H. G., Hooke, J. M., y Cooper, J. R. (2020). Modelling the decadal dynamics of reach-scale river channel evolution and floodplain turnover in CAESAR-Lisflood. *Earth Surface Processes and Landforms, 45(5)*, 1273-1291.

Gonzalez Ubierna, S., Martinez, C., y Nicolay Ibarra, J. M. (2009). USLE, RUSLE and WEPP models used in mining restored hill slopes.

Hancock, G. R., Lowry, J. B. C., Coulthard, T. J., Evans, K. G., y Moliere, D. R. (2010). A catchment scale evaluation of the SIBERIA and CAESAR landscape evolution models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(8), 863-875.

Hancock, G. R., Lowry, J. B. C., y Saynor, M. J. (2016). Early landscape evolution—A field and modelling assessment for a post-mining landform. *Catena*, 147, 699-708.

Hooper, D., Svoray, T., y Cohen, S. (2017). Using a landform evolution model to study ephemeral gullying in agricultural fields: the effects of rainfall patterns on ephemeral gully dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(8), 1213-1226.

Lowry, J. B. C., Coulthard, T. J., y Hancock, G. R. (2013). Assessing the long-term geomorphic stability of a rehabilitated landform using the CAESAR-Lisflood landscape evolution model. en: *Mine closure 2013: Proceedings of the eighth international seminar on mine closure*. Australian Centre for Geomechanics, 611-624.

Lowry, J., Saynor, M., y Erskine, W. (2015). A multi-year assessment of landform evolution model predictions for the Ranger trial landform. *Internal report 633*, Australian Government, Department of the Environment and Energy.

Lowry, J. B. C., Narayan, M., Hancock, G. R., y Evans, K. G. (2019). Understanding post-mining landforms: Utilising pre-mine geomorphology to improve rehabilitation outcomes. *Geomorphology*, 328, 93-107.

Lowry, J. B. C., Saynor, M. J., Hancock, G. y Coulthard, T. J. (2022). A catchment-scale comparison of field observations of a constructed landform with erosion predictions from a landscape evolution model, en: AB Fourie, M Tibbett y G Boggs (eds), *Mine Closure 2022: Proceedings of the 15th International Conference on Mine Closure*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 1169-1178.

Martín-Duque, J. F., Sanz, M. A., Bodoque, J. M., Lucía, A., y Martín-Moreno, C. (2010). Restoring earth surface processes through landform design. A 13-year monitoring of a geomorphic reclamation model for quarries on slopes. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 35(5), 531-548.

Martín-Duque, J. F. (2024). Restauración Geomorfológica: bases técnicas y soluciones prácticas. En: *Bloque temático 13: Restauración Geomorfológica*, 100-110.

Martín-Moreno, C. (2013). *Cuantificación de la Producción de Sedimentos en la Zona Minera del Parque Natural del Alto Tajo [Tesis de doctorado publicada]*. Departamento de Geodinámica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid.

Nair, D., Bellairs, S. M., y Evans, K. (2022). An approach to simulate long-term erosion equilibrium of a rehabilitated mine landform. en: *Mine Closure 2022: Proceedings of the 15th International Conference on Mine Closure* (pp. 1063-1074). Australian Centre for Geomechanics.

Nair, D., Evans, K. G., y Bellairs, S. (2023). Modelling of a Post-Mining Catchment for Future Simulations. *Mining*, 3(3), 409-427.

Ramli, M., Thamrin, M., y Asrafil, M. (2020). Analysis of soil erosion on mine area. En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 875, 012052.

Saynor, M., Lowry, J., y Boyden, J. (2018). The impact of rip lines on erosion at the Ranger mine site. In *Proceedings of the Life of Mine Conference, Brisbane, Queensland*, 25-27.

Saynor, M. J., Lowry, J. B., y Boyden, J. M. (2019). Assessment of rip lines using CAESAR-Lisflood on a trial landform at the Ranger Uranium Mine. *Land Degradation y Development*, 30(5), 504-514.

Skinner, C. J., y Coulthard, T. J. (2023). Testing the sensitivity of the CAESAR-Lisflood landscape evolution model to grid cell size. *Earth Surface Dynamics*, 11(4), 695-711.

Stroosnijder, L. (2005). Measurement of erosion: is it possible?. *Catena*, 64(2-3), 162-173.

Tiwari, A. K., Risse, L. M., y Nearing, M. A. (2000). Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *Transactions of the ASAE*, 43(5), 1129-1135.

Walsh, P., Jakeman, A., y Thompson, C. (2020). Modelling headwater channel response and suspended sediment yield to in-channel large wood using the Caesar-Lisflood landscape evolution model. *Geomorphology*, 363, 107209.

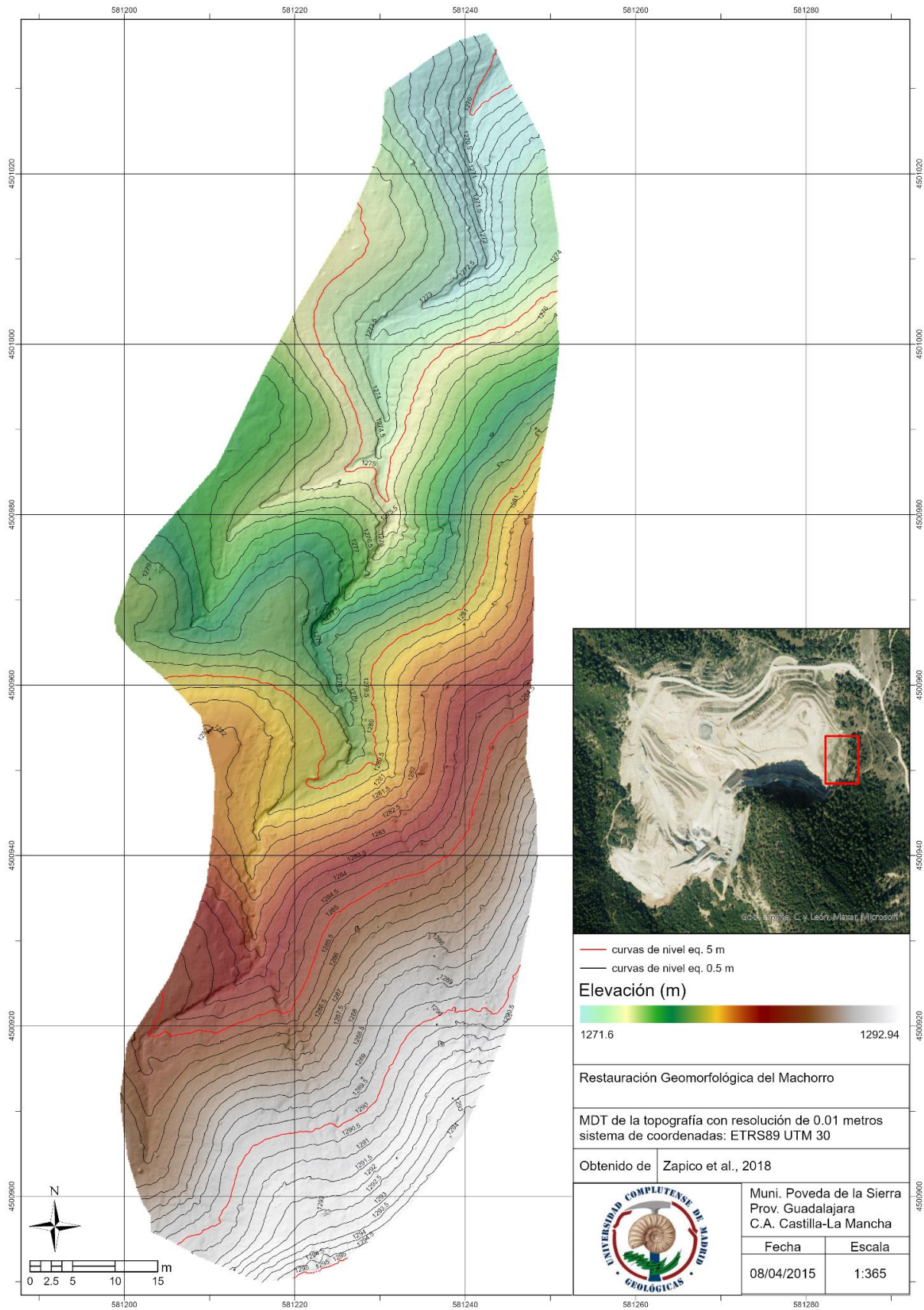
Wilcock, P. R. y Crowe, J. C. (2003). Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of hydraulic engineering*, 129(2), 120-128.

Williams, R. (2012). DEMs of difference. *Geomorphological Techniques*, 2(3.2).

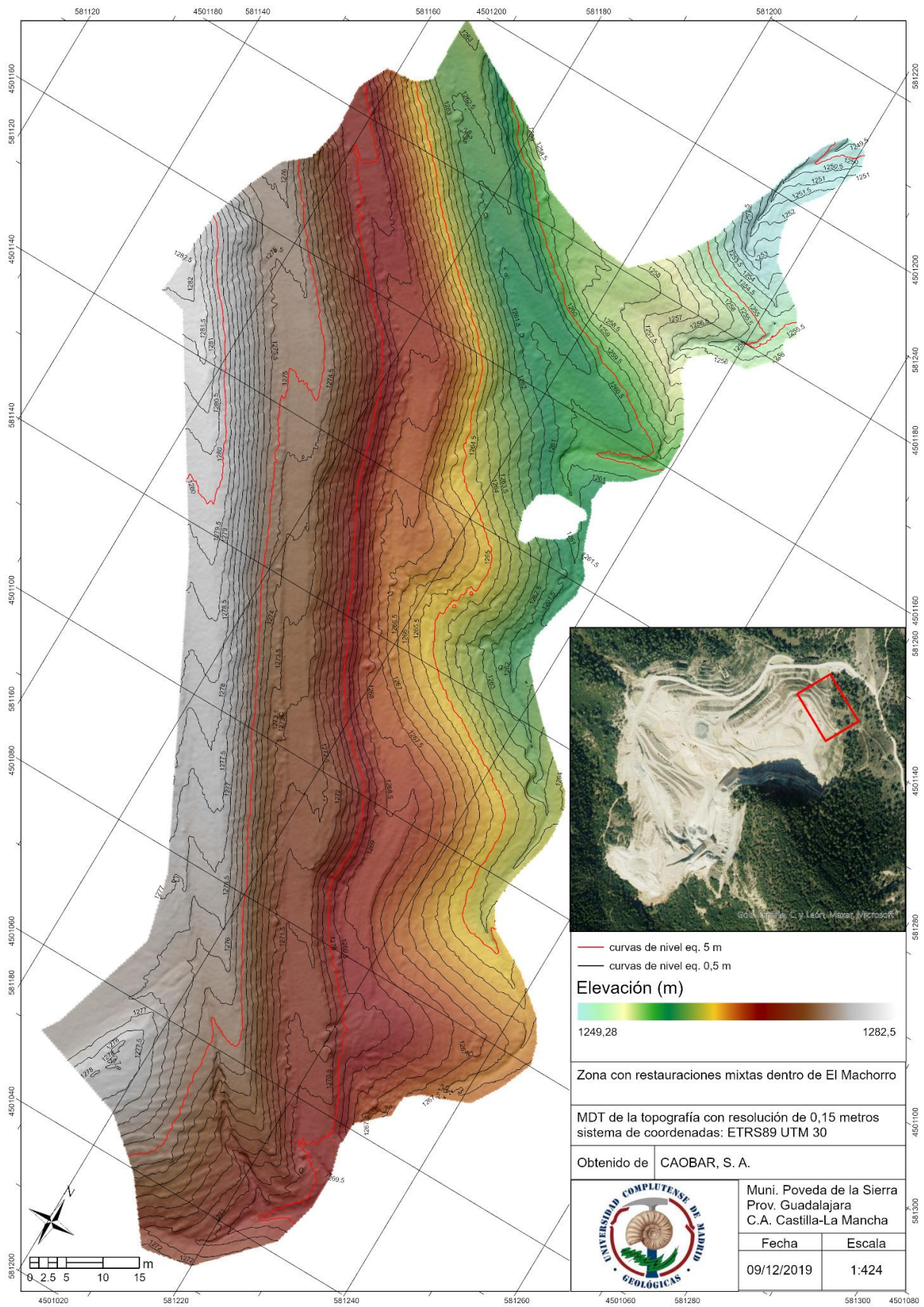
Zapico, I., Duque, J. F. M., Bugosh, N., Laronne, J. B., Ortega, A., Molina, A., ... y Castillo, L. S. (2018). Geomorphic reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: The Alto Tajo Natural Park, Spain. *Ecological Engineering*, 111, 100-116.

Zapico, I., Martín-Duque, J. F., Sánchez-Castillo, L., Laronne, J. y Campos-Saucedo, A. (2022). Minería sostenible en zonas altamente erosivas y con paisajes ecológicamente sensibles. *Recomendaciones técnicas basadas en investigaciones desarrolladas en explotaciones de caolín del entorno del Parque Natural del Alto Tajo*.

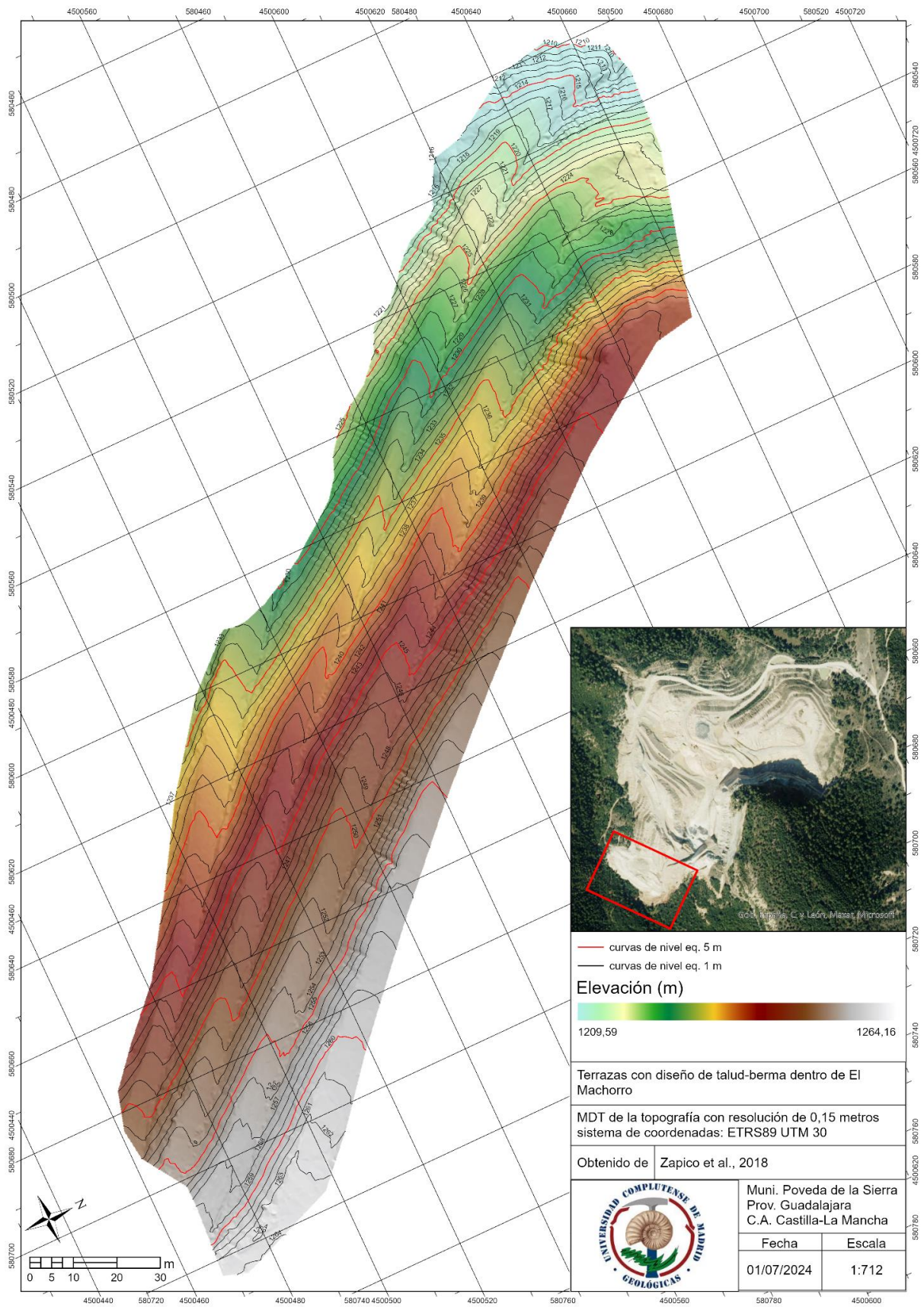
# 9. ANEXOS



Anexo 1: Plano de la restauración geomorfológica del 08/04/2015



Anexo 2: Plano de la zona con restauración mixta del 09/12/2019

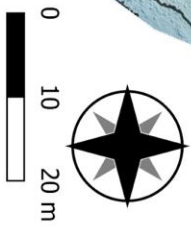
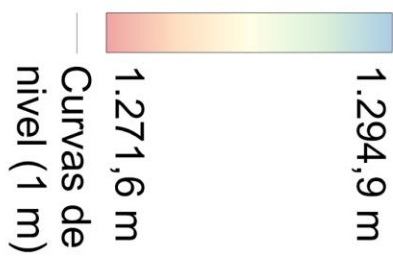
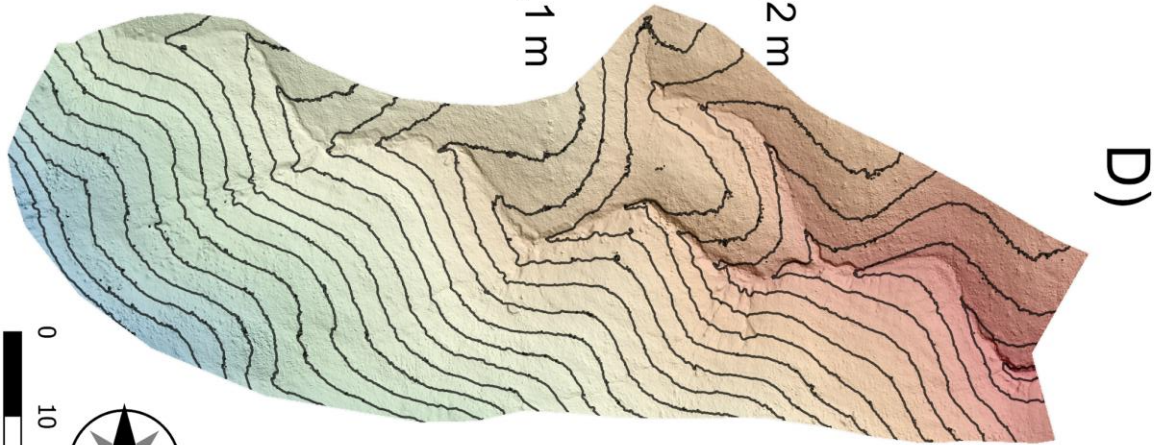
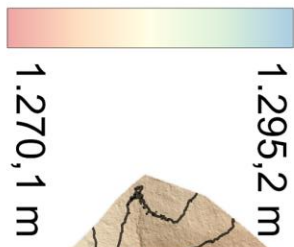


Anexo 3: Plano de la restauración con terrazas del 1/7/2024

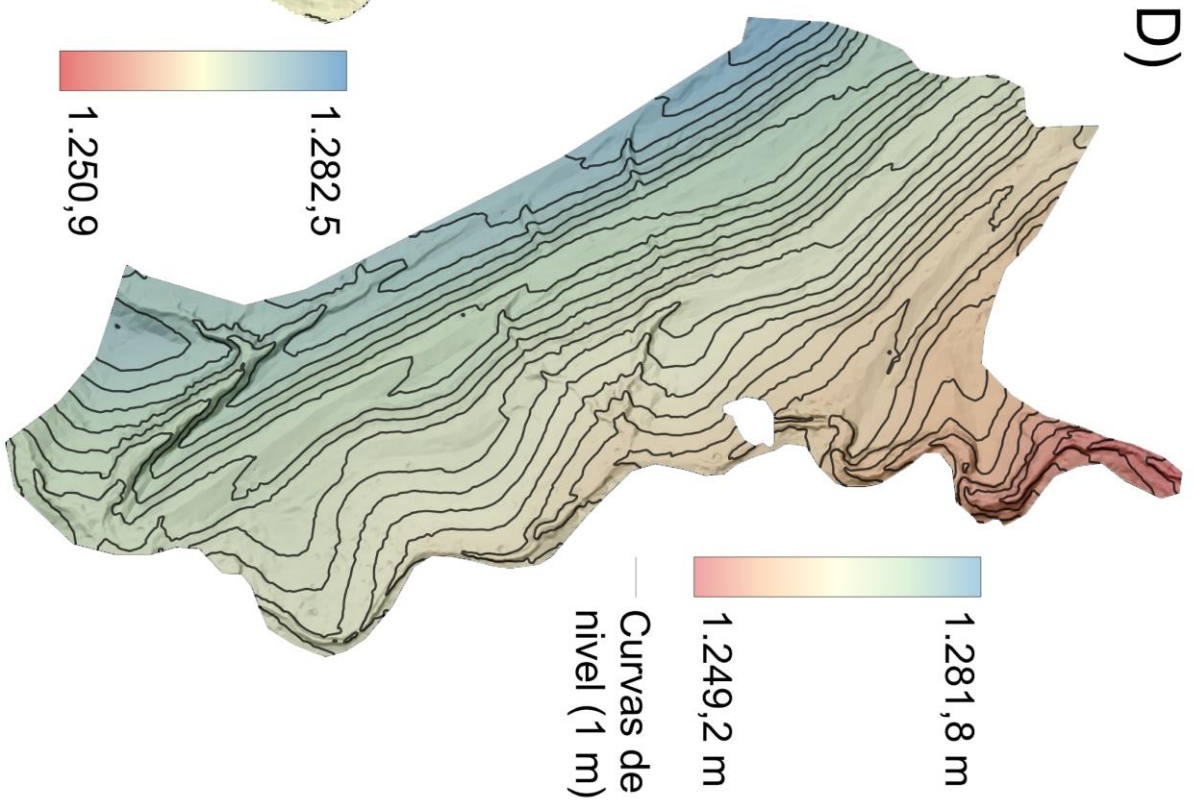
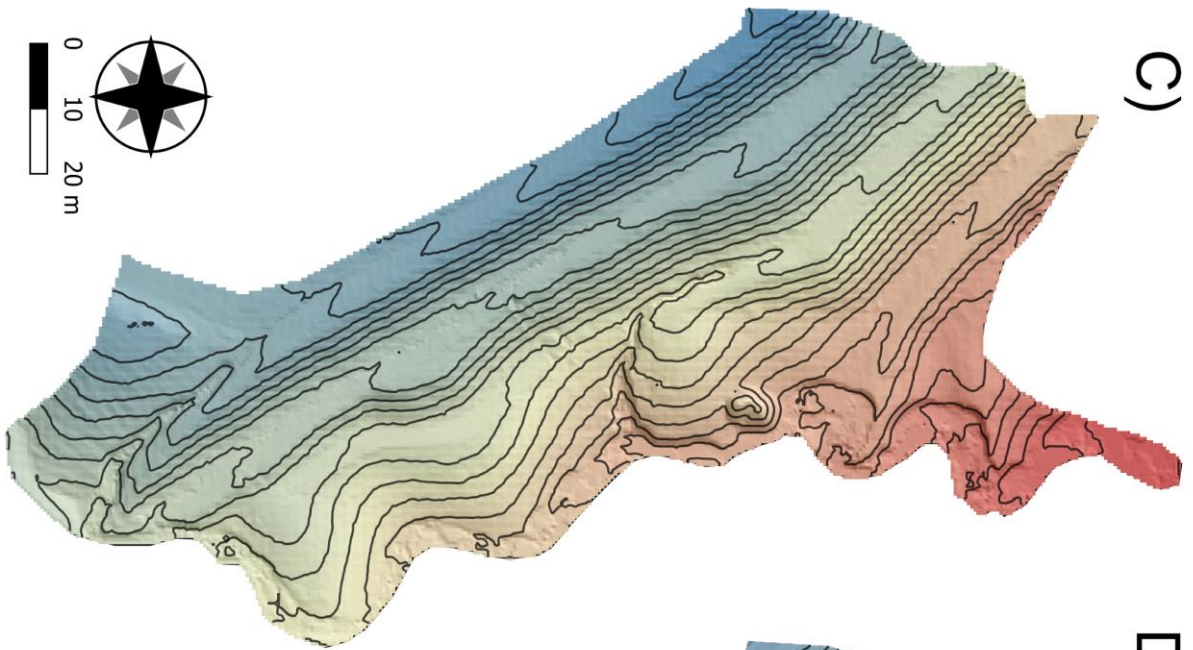
Anexo 4: Tabla con la explicación de los parámetros de entrada para CAESAR-lisflood junto con los valores usados para las simulaciones. Las filas en rojo, resaltan los parámetros usados para la calibración del modelo

	Parameters	Units/Data type	Description	Notes	Values	Reference
Files	Type of simulation	boolean	Select from the three different models: Catchment mode, Reach mode and Stage/Tidal input		Catchment mode	
	DEM data file	input file	File name of the main DEM in ascii format		-	
	Grain data file   Grain index file	input file	A file containing the grain size distribution of the bed and subsurface, along the grain size distribution in the grain index file		-	
	Grain index file	input file			-	
	Bedrock data file	input file	The elevation of the bedrock locations, erosion can not happen below this layer but can be lowered through though time in the soil development tab		-	
	Sediment tracer	boolean	-		-	
	Save file every * mins	minutes		Here the total time of the simulation in minutes should be inputted to generate the result files	depends on simulation	
	unique file name?	boolean	if the 'unique file name?' is true, C-L will save result files at every interval indicated in 'Save file every * mins', adding the number of days elapsed in every file		FALSE	
	Generate time series output	boolean & input text			FALSE	
	Save file every * mins	minutes	This creates a file at a specified time step where 14 columns the amount of sediment and water that leaves the edge of the model.		-	
Numerical	Min time step (s)	-			1	
	Max time step (secs)	-			3600	
	run start time (h)	hours	time where the simulation will begin, 0 to start from the beginning of the precipitation series		0	
	max run duration	hours	The time when the simulation will end, usually the length of the precipitation series		depends on simulation	
	memory limit	-	This value determines the size of the array containing the grain size values, each grid cell has 10 values. If a value of one is given, every grid cell of the model has a complete grain size, a number lower than 1 means that not every grid cell will have a grain size		1	
Sediment	Grain size and relative proportions	m	The proportions of up to 9 grain sizes	This value depends on grain size from soil samples	Grainsize proportion 0.000075 0.352 0.0003 0.119 0.0006 0.142 0.0012 0.139 0.002 0.072 0.00475 0.083 0.0063 0.013 0.0095 0.02 0.02 0.06	
	All 9 grainsizes?	boolean	To indicate less than 9 grain sizes, this should be FALSE, and the unused grain size and proportion should equals zero		TRUE	
	Suspended fraction	m/s			0,0033	
	Fall velocity (m/s)	boolean	This parameter will use the proportion of the finest grain size as suspended sediment, and the fall velocity should be inputted	Fall velocity directly depend on grain size, for now we use for now the default value	TRUE	
	Transport equation	boolean	Here the user can select one of 3 sediment transport equations: Wilcock and Crowe, Einstein & Meyer Peter Muller	Iterations using these equations should be carried out, as the literature shows mixed results	Wilcock and Crowe	Hancock et al., 2016; Hoover et al., 2017; Lowry et al., 2013
	Max velocity used to Calculate Tau (m/s)	m/s	This is the maximum velocity to calculate sediment transport	A value of 5 can be used as default	5	
	Max erode limit	m	this indicates the maximum elevation change that can occur within a cell. This allows to limit massive amounts of material being moved across the grid.	default value of 0.01	0.01	
	Active layer thickness	m	The total thickness of a single active layer and should be at least four times the max erode limit		0,6	
	In-channel erosion rate (A)	float	Controls if the channel will be thin or wide. Thus, a smaller value will simulate more consolidated and packed sediment creating a deep channel, and a larger number will erode more material and spreading it out creating a wider channel.	15 - 20 10 - 20 as a good starting point	1, 10, 20	Feeney et al., 2020 SourceForge, 2019
	Lateral Erosion	boolean	If this parameter is set to TRUE, it activates the lateral erosion parameters.		TRUE	
	Lateral erosion rate (B)	float	This parameter determines the meandering and braided morphology.	A smaller number decreases meandering, the following values have been used in the literature cited: 0.000002 0.0005 5 - 0,05	0.0005, 0.000002, 0.00005	Hancock et al., 2015; Hooper et al., 2017; Feeney et al., 2020
	No. of passes for edge smoothing filter	Integer	This parameter controls the smoothing of the calculated curvature of the channel.	This value should be set as the frequency of meanders	50, 25, 3	SourceForge, 2019
	No. of cells to shift erosion downstream	Integer	This parameter shifts the lateral erosion downstream, it controls the downstream migration of meander bends or bars		5	
	Max difference for cross-channel smoothing of edge values	float	This parameter controls how much smoothing is carried out.	a range of values is suggested: 0,0001 - 0,001, but here we use the default values	0,0001	Feeney et al., 2020
	Creep rate		A parameter within a simple diffusive soil creep function	Default value used	0,0025	-

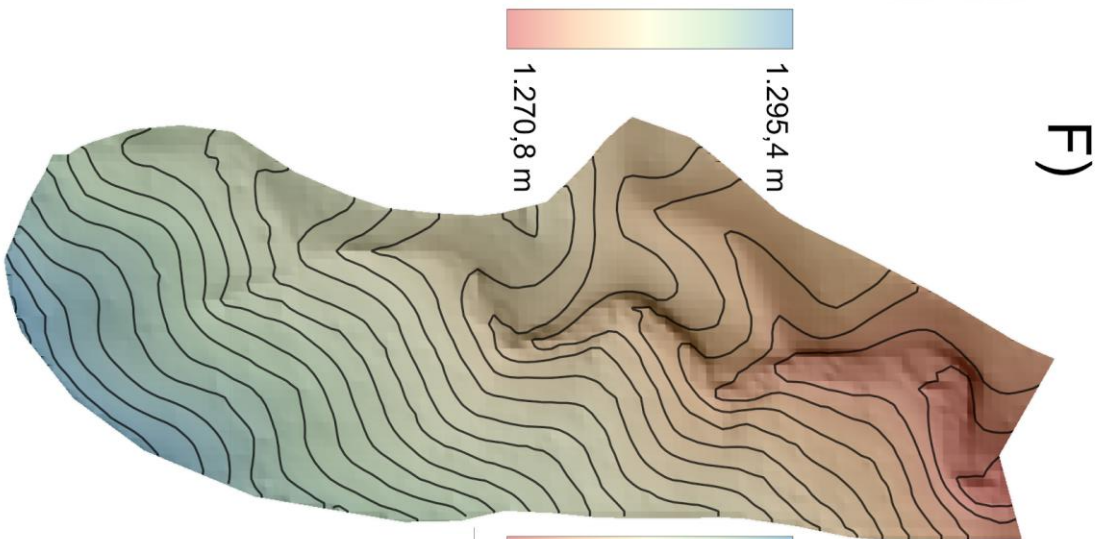
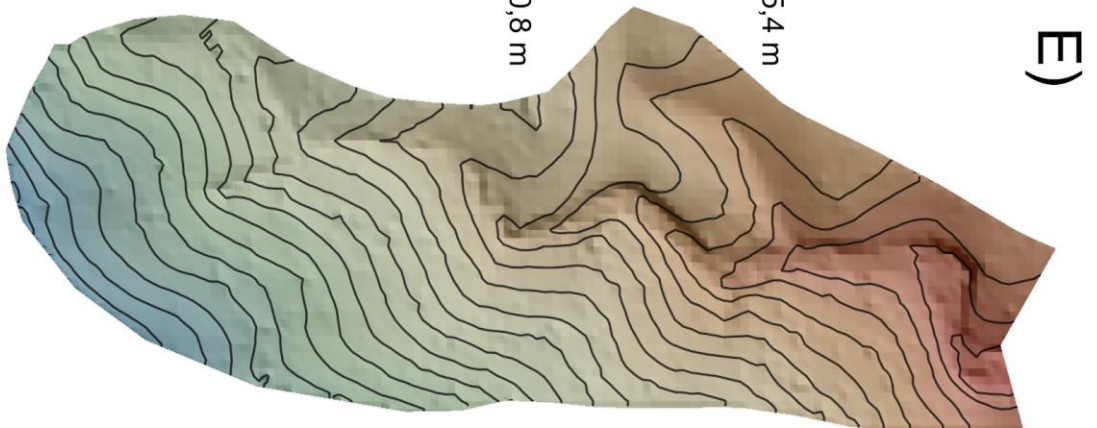
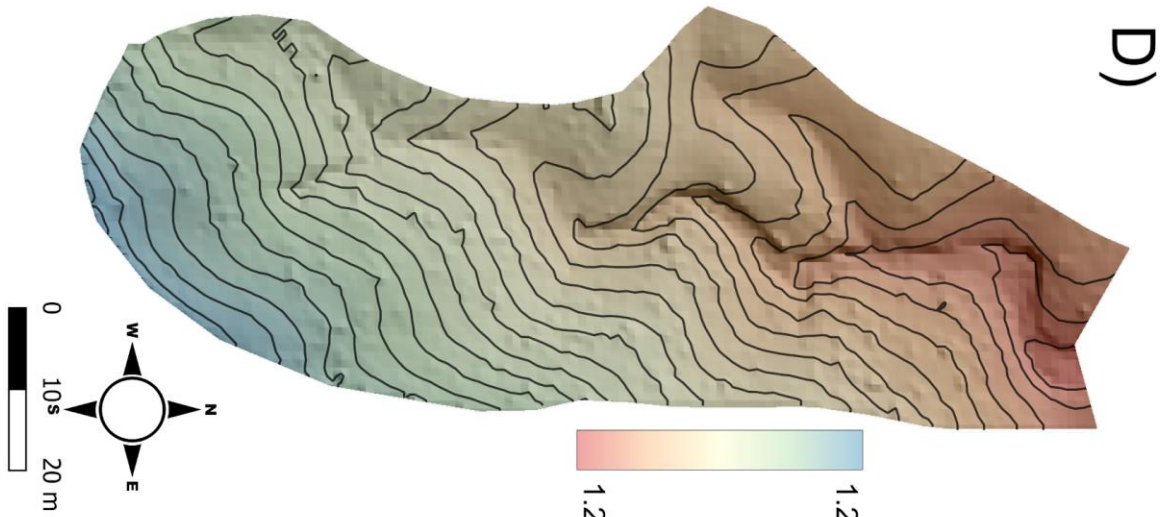
	Parameters	Units/Data type	Description	Notes	Values	Reference
Slope processes	Slope failure threshold	degrees (°)	The angle at which failure will occur	Default value used	45	-
	Soil erosion rate		This value controls how is a variable within an equation that calculates erosion based on slope and length amongst other coefficients.	Default value used	0	-
Vegetation	Vegetation critical shear strength	N/m <sup>2</sup>	This is the value used to indicate the maximum strength of vegetation to fluvial erosion. If this value is surpassed, vegetation will be removed	Dependant on the study site's vegetation, standard values include: 80 (grasses) 120 (forests)	1, 80	Feeney et al., 2020
	Grass maturity	years	The time vegetation will take to reach full maturity	Dependant on the study site's vegetation, standard values include: 1 (grasses) 20 (forests)	1, 100	Feeney et al., 2020
	Proportion of erosion allowed at maturity	float	This parameter determines the proportion of in-channel lateral erosion rate and lateral erosion rate allowed at full maturity	Dependant on the study site's vegetation, standard values include: 0,2 (grasses) 0,1 (forests)	0,1, 0,2	Feeney et al., 2020
Flow Model	Input/output discharge difference allowed	m <sup>3</sup> /s	When the model is steady state, simplifies the simulation to decrease processing time.	This value was set after a few iterations of the model	9	
	Min Q for depth calc	m/s?	Is the minimum flow value within a cell that the model uses to calculate flow depth, and it is used to decrease processing time.	A tenth of the resolution of the DEM is recommended, we use 0.01 for the 10 cm DEM	0,0001	Feeney et al., 2020; SourceForge, 2019
	Water depth threshold over which erosion will happen (m)	m	This parameter indicates the minimum flow depth at which erosion will happen.	0.01 is recommended but a lower value could be used for DEM lower than 5m	0,00001	Feeney et al., 2020
	Slope for edge cells	m/m	The slope given to the cells on the edge of the model	this value should be extracted from field measurements of the mean valley floor slope	0,086	
	Evaporation rate	m/day	Indicates the daily evaporation rate	Not used for the simulation as the study area is quite small	0	-
	Courant number	float	Controls the numerical stability of the model, as this determines the relation between the speed and flow models	-	0,2	
	h <sub>flow</sub> threshold	meters	This is the water surface elevation between two cells, and it is the minimum elevation limit that allows water transfer between the two	A higher value reduces processing time, but compromises flow on areas with very low slope	0,00001	Feeney et al., 2020
	Froude number flow limit	float	This parameter indicates the influence of gravity in fluid mechanics, specifically determining whether the fluid flow is subcritical, critical, or supercritical	A subcritical value is used, same as the default value	0,08	
	Manning's n hydraulic roughness value	float	This parameter represents the surface's roughness coefficient, which affects the flow velocity over that surface	Several values were iterated	0,0396	
	Spatially variable manning's n	boolean	This allows for the grid to have different variable manning n coefficient, with a DEM with the manning n value for each cell	-	FALSE	
Hydrology (Rainfall input variables)	Rainfall data file	input file	File name of the text file with the precipitation series	-	depends on simulation	
	Rainfall data file time step	minutes	Time step of the precipitation series	-	depends on simulation	
	m <sup>i</sup> value	float	This parameter controls the peak and duration of the runoff created by a precipitation event, as a higher value generates low flood peaks and a lower value a flashier and stronger runoff.	This value could be used to calibrate the model by trying a range of values	0,005, 0,001, 0,0007, 0,0005	Nair et al., 2023; Skinner & Coulthard, 2022
	Time-varying M file	input file		-	NULL	
	Time-varying M file time step (min)	minutes		-	-	



Anexo 5: Topografías de la primera fase de calibración donde se muestra el C) DoD simulado y el D) DoD Real del 2015 al 2016.

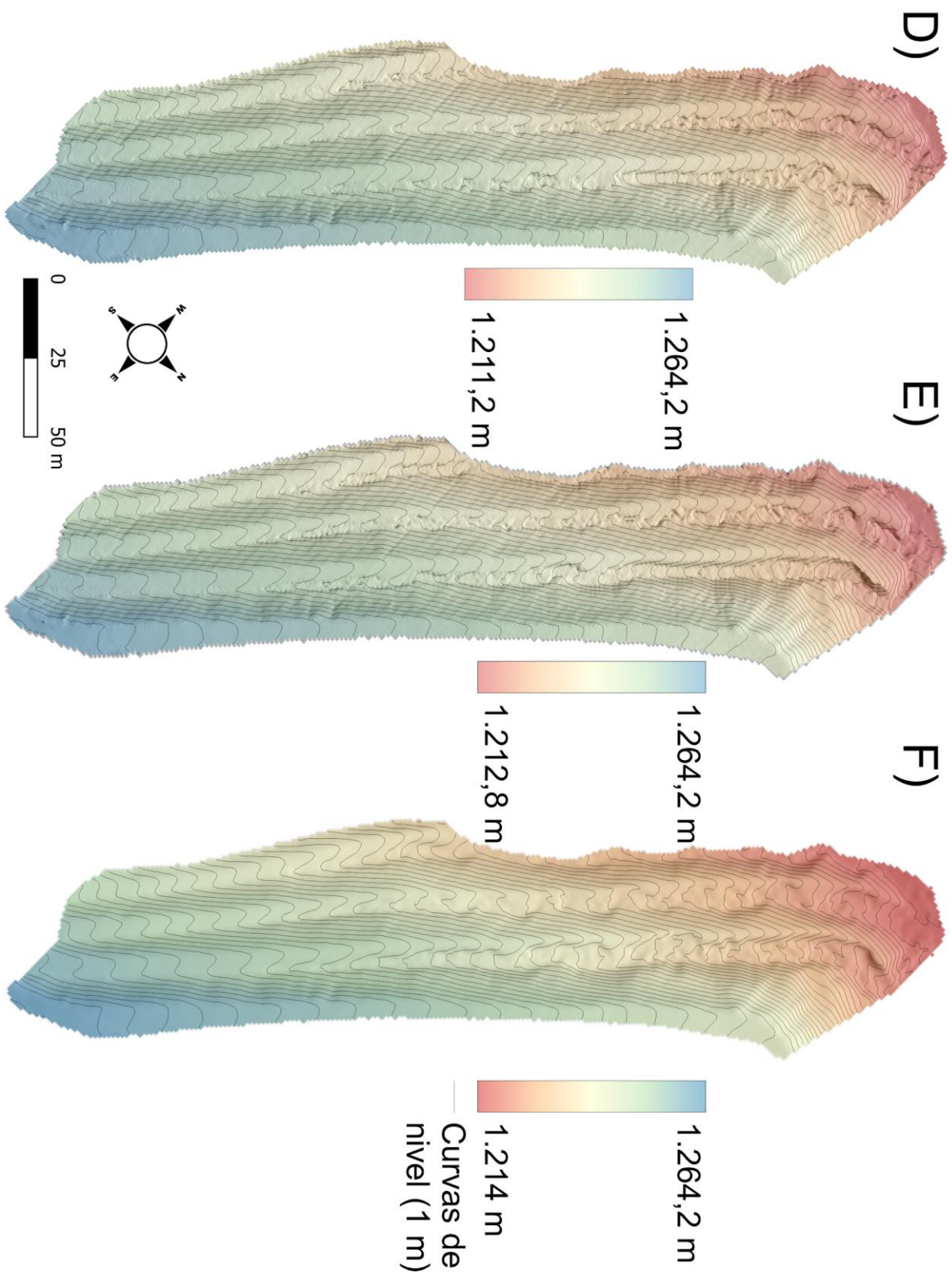


Anexo 6: Topografías de la segunda fase de evaluación donde se muestra el C) DoD simulado y el D) DoD Real del 2019 al 2024.



Curvas de nivel (1 m)

Anexo 7: Topografías de la restauración geomorfológica simuladas para la tercera fase de estimación donde se muestra el DoD simulado para D) 2024-2034, el DoD para F) 2024-2049, y el DoD para G) 2024-2099.



Anexo 8: Topografías de las terrazas simuladas para la tercera fase de estimación donde se muestra el DoD simulado para D) 2024-2034, el DoD para F) 2024-2049, y el DoD para G) 2024-2099.