

## 4.3.

## Gestión integrada del agua a escala del paisaje:

### La ciencia como base del desarrollo – Un caso de estudio en Túnez

Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante y Hedi Hamrouni

La sección 1.5. ha dejado clara la importancia de tratar agua y suelo, en el Mediterráneo, como cuestiones interrelacionadas. La gestión integrada del agua y del suelo alrededor de la cuenca mediterránea se basa en diferentes enfoques que dependen del país. Entre el “ni una gota de agua más al mar” y la reducción del agua subterránea hasta su agotamiento en los acuíferos fósiles hay un abanico de posibilidades. Basándose en el ejemplo del programa nacional de gestión de cuencas en Túnez como un caso de estudio, esta sección pretende ilustrar cómo los recientes logros científicos pueden suministrar soluciones concretas para respaldar y mejorar la gestión integrada del agua a escala del paisaje.

Las estrategias dirigidas a aumentar la disponibilidad de recursos hídricos, a limitar las inundaciones y a reducir los efectos negativos de la erosión del suelo han evolucionado hacia el diseño y puesta a punto de un vasto programa de gestión de cuencas a pequeña escala (< 50 km<sup>2</sup>) del que se ha utilizado un subconjunto para una investigación paralela orientada a mejorar el conocimiento en vistas a una posterior ampliación del programa.

Parece reforzarse la idea de la construcción de **pequeñas presas** como instalaciones cuyos objetivos no se limitan a la utilización de los recursos hídricos superficiales, también tienen como objetivo el control de las inundaciones, protegiendo las grandes estructuras del tramo bajo y limitando su colmatación. En los últimos años, Túnez y Marruecos han optado por esta solución. En Túnez, en el contexto de un proyecto de 1.000 pequeñas presas, más de 500 ya han sido construidas con los siguientes objetivos: I) gestionar las pendientes para reducir la pérdida de suelo agrícola que suma 5.200 ha/año, II) reducir la colmatación de algunas de las 10 mayores presas en el tramo bajo, proceso que alcanza los 25 millones de m<sup>3</sup>/año; III) aumentar la recarga de agua subterránea; IV) movilizar la mayor parte de los 500 millones de metros cúbicos perdidos en *sebrkrhas* (es decir, depresiones saladas en zonas áridas) o en el mar y V) crear puntos de desarrollo del regadío.

Un embalse de vertiente se forma como resultado de la construcción de una pequeña presa hecha de tierra en el lecho de un río efímero o intermitente. La presa puede llegar a alcanzar los 10 metros de altura (pero siempre por debajo de los 15 metros, que es el umbral definido por la declaración de la comisión internacional para las grandes presas) y está equipada con un aliviadero lateral. Este aliviadero, se usa como seguro en caso de lluvias muy intensas. Los embalses de vertiente presentan una gran diversi-

**Tabla 8.** Colmatación de pequeñas presas en 13 lagos de retención de agua con variadas cubiertas del suelo. Fuente: Directorado –ACTA e IRD Túnez. Las figuras no muestran ni expresan las relaciones entre la cubierta forestal y la protección contra la erosión. Las tierras de cultivo protegen mejor los suelos al usar técnicas de conservación del agua y del suelo. El porcentaje de suelos desnudos en la cuenca tampoco es un indicador fiable del transporte de sólidos. Los suelos desnudos se pueden desarrollar en margas, muy sensibles a la erosión, o en material rocoso que produce muy pocos sedimentos.

Estación	Área de la cuenca	Año de construcción	Volumen de colmatación 96	Esperanza de vida	Vol. Exportado	Erosión total	Erosión esperada	% de Vegetación		
								hectáreas	103m <sup>3</sup>	Años
Sadine 1	384,0	1988	31,2	9	4,7	54,8	17,8	0	68	32
Fidh Ali	412,5	1991	29,6	23	0	47,4	23,0	0	12	88
M'Richet el Anse	158,0	1991	5	42	0	8	10,1	0	92	8
El Gouazine	1.810,0	1990	16,8	83	4,4	28,3	2,6	20	65	15
Hadada	469,0	1992	14	24	1,3	23,8	12,7	0	76	24
Janet	521,0	1992	36	11	3,5	61,1	29,3	0	62	38
Dekikira	307,0	1991	21	51	0	34,1	22,2	33	35	42
Es Senega	363,0	1991	12	36	0,4	19,3	10,6	0	34	66
Arara	708,0	1993	41	7	4,1	70,1	33,0	59	41	0
Saadine	272,0	1992	27	7	6,6	50,3	46,3	30	70	0
Es Seghir	431,0	1992	2	>100	0	3,2	1,9	20	80	0
Kemech	245,5	1993	11,4	38	10	282	38,3	0	75	25
Brahim Zaher	464,4	1992	14,4	24	0,2	23,1	12,5	30	27	43

dad y capacidad, variando desde centenares a varios cientos de miles de metros cúbicos, mientras que las áreas de las cuencas varían de unas pocas hectáreas a varias decenas de kilómetros cuadrados

Desde 1995 se han seleccionado veintiséis de ellas y se han equipado para construir una red de observatorios hidrológicos con el objetivo de evaluar su colmatación y, de ese modo, su período de vida y la erosión total de la cuenca (Tabla 8).

Se han llevado a cabo experimentos de simulación de lluvia y modelización de la escorrentía, almacenamiento hídrico y pérdida de suelo de las laderas que permiten abogar por la implantación de medidas de gestión y conservación a escala de la cuenca sobre una sólida base científica.

El conocimiento basado en los cálculos de la reserva hídrica útil del suelo (RU) permite: I) simular una variedad de resultados según la lluvia anual, II) comparar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo de las cuencas con la de las instalaciones que retienen el agua (presas), y III) simular las necesidades de irrigación en relación con diversas cubiertas forestales. Finalmente, proporciona herramientas para lograr el equilibrio entre agua azul y verde.

La capacidad de almacenamiento se estimó inicialmente, a partir de parámetros climáticos, para suelos con características hidro-físicas que se asumió que eran homogéneas a una profundidad constante. Posteriormente, se utilizó una evaluación mejor del

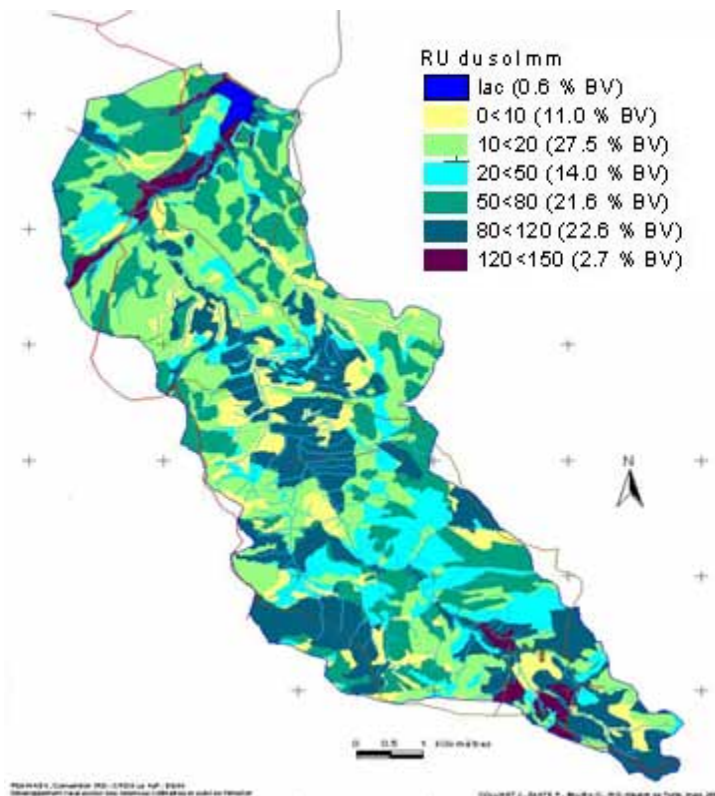
**Cuadro 15. Cálculo de las reservas hídricas útiles en la cuenca de Zanfour**

Los mapas de suelo a nivel de la cuenca y su incorporación a un SIG se utilizaron para elaborar espacialmente la información hidrofísica. La cuenca de Zanfour, que tiene un área de 42 km<sup>2</sup> y un embalse de 710.000 m<sup>3</sup>, forma parte de la red tunecina piloto de cuencas hidrológicas. Por este motivo resulta interesante calcular el ADT, simular diversos resultados según la precipitación anual, comparar la capacidad hídrica del suelo de la cuenca con los suelos de mayor capacidad de retención y simular las necesidades de riego en relación con los diversos tipos de cubierta.

Las profundidades, texturas y cantidad de materiales gruesos se obtienen a partir del mapa de suelo, mientras que los umbrales de humedad crítica del suelo para potenciales de 2,5 para la capacidad de campo y 4,2 para el punto de marchitez permanente, se calculan con el método de A. Bruand et al. (2002). Se elaboró un GIS (ArcView) para relacionar las unidades de suelo con las variaciones de profundidad, textura, elementos gruesos, humedad, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, y finalmente, contabilizar las isólineas y dibujar el mapa ADT (Figura 42). De entre todas las posibles simulaciones, se tomaron en consideración las siguientes:

- **Una simulación de la recarga parcial del ADT de los suelos de la cuenca**  
En 2001, con una precipitación de 350 mm, la recarga de las reservas del suelo se obtuvo por acumulación anual de volúmenes de diferentes clases. La recarga parcial de las reservas hídricas útiles de todos los suelos en la cuenca hidrológica proporciona una capacidad de almacenamiento de la cuenca hidrológica de 1,4 millones de m<sup>3</sup> (Tabla 9) que supone dos veces la capacidad del embalse.
- **Una simulación de la saturación ADT de los suelos de la cuenca**  
La comparación de las reservas insaturadas del año 2001 con las saturadas permite establecer los coeficientes de reducción de la columna 4 de la Tabla 9.

La recarga completa de las reservas hídricas de todos los suelos de la cuenca proporciona una capacidad de almacenamiento de 2,2 millones de m<sup>3</sup> que representan tres veces la capacidad de reserva de la presa. Con esta reserva y los resultados de 2001 (precipitación anual: P 350 mm, evapotranspiración de referencia del cultivo: 1.896 mm), se pudo calcular la precipitación anual teórica que permitiría llenar las reservas hídricas del suelo. Debería alcanzar un valor de 553 mm, a efectos comparativos, la precipitación anual media de la cuenca de Zafour es de 400 mm.



**Figura 45.** Mapa de isólineas de reserva hídrica útil del suelo RU. Fuente: Collinet et al. 2001.

**Tabla 9.** Reservas hídricas de la cuenca para saturación total y parcial del suelo.

UR promedio por clase (mm)	Área de cada clase (ha)	Saturación total UR x área (103.m <sup>3</sup> )	Coefficiente de reducción reserva/P acumulada	Recarga 2001 UR x área x coefic (103.m <sup>3</sup> )
5	481	24	0,29	7
15	1.202	180	0,51	92
35	609	213	0,63	134
65	943	613	0,65	398
100	988	988	0,65	642
135	117	158	0,65	103
total	4.340	2.176		1.376

Agua Disponible Total (ADT) mediante un coeficiente de utilización de estas reservas, por parte de una planta, cuyo desarrollo del sistema radical permitiese un uso progresivo de 100 cm de suelo no compacto. El uso de la profundidad del suelo accesible a las raíces representa un importante avance pero, ni proporciona información sobre las características físicas de los materiales que pueden controlar el volumen y el acceso a las reservas, ni sobre las posibilidades del ascenso por capilaridad desde un acuífero más profundo. Un ejemplo de los métodos usados para superar estas dificultades se presenta en el Cuadro 15, Tabla 9 y Figura 45.

Los resultados muestran la utilidad de los métodos que proporcionan valiosos datos cuantitativos espaciales para la gestión del agua en la cuenca, en particular con respecto a los cultivos de regadío y de secano según la precipitación y el agua almacenada en la presa y, así, permite equilibrar las aguas verdes y azules.

---

**Los efectos del cambio en la cubierta forestal, incluyendo el bosque, y de las técnicas de conservación de suelo y agua se pueden predecir en base a los cálculos de la erosión laminar y embarrancamiento y del uso de técnicas de simulación.**

---

En los próximos párrafos se presentan tres ejemplos de cómo el progreso científico puede mejorar la gestión del agua en relación a la erosión del suelo. Estos ejemplos emanan de la investigación llevada a cabo en la cuenca del Abdessadok, que presenta las siguientes características: 307 ha, con una capacidad inicial de reserva de 92.500 m<sup>3</sup>, una capacidad en 2001 de 65.000 m<sup>3</sup> debido a la colmatación específica de 10.6 m<sup>3</sup>/ha/año como consecuencia de que un 50% de la cuenca se usa para la agricultura (cultivo de cereal de bajo rendimiento + cría extensiva de ganado ovino en las pendientes).

- a) Se analizó y cuantificó la erosión de las laderas asociadas a los diferentes usos del suelo de la cuenca, tanto en parcelas experimentales, como a escala de toda la cuenca. El análisis del comportamiento de las parcelas a gran escala ha permitido entender el fenómeno a menor escala (cuenca) y, en particular, distinguir la transición entre erosión areolar a erosión lineal hasta los embarrancamientos. Los modelos estadísticos como el RUSLE2 (ecuación universal de pérdida de

### Cuadro 16. Cálculo de la erosión desde la construcción de la presa (1993 a 2001)

El modelo ha dado las siguientes erosiones generales:

- a) 1,75t/ha/año en un año seco que se ha calculado con un índice de precipitación  $R_{si} = 25 \text{ Mj.mm/ha.h}$
- b) 4,12t/ha/año en un año medio con un  $R_{si} = 64 \text{ Mj.mm/ha.h}$
- c) 6,03 t/ha/año en un año húmedo con un  $R_{si} = 93 \text{ Mj.mm/ha.h}$

Parece que las tormentas fuertes (superiores a 50 mm por día y con elevada intensidad, por encima de 90 mm/h durante 5 minutos) a pesar de ser excepcionales afectan de un modo importante a estas estimaciones calculadas a durante largos períodos de tiempo. El año 1994–95 resultó ser particularmente agresivo, con un índice de anual de precipitación calculado en 276 episodios de lluvia (intensidad calculada cada 30 minutos) con 219 episodios durante el mes de octubre de 1994, un período de alta vulnerabilidad del suelo debido al arado de la tierra : el cálculo de la erosión total, ponderada por área y con un índice de suelo desnudo ( $C=1$ ) durante la temporada de arado, da 22,5 t/ha/año que es suficiente para explicar la colmatación previamente observada.

### Cuadro 17. Simulación de reforestación con pino carrasco de matorrales de cabecera sobre suelos calcáreos (litosoles)

La primera simulación se centró en la reforestación, con pino carrasco, de las vertientes pronunciadas (pendiente > 25%) en suelos pedregosos y someros (litosoles sobre suelo de la unidad 3 y regosoles sobre suelos de la unidad 7). En lugar de esperar 20 años a que crezca el bosque y observar cómo mejora la protección de la cuenca, la simulación permitió detectar un incremento de la protección en un 12% (Figura 45). Se deberían considerar otros factores como el incremento de la reserva hídrica (como se observó en la cuenca de Zanfour), la disponibilidad de madera y leña – bienes esenciales para la comunidad rural de la cuenca - así como los beneficios relacionados con la reducción de la erosión.

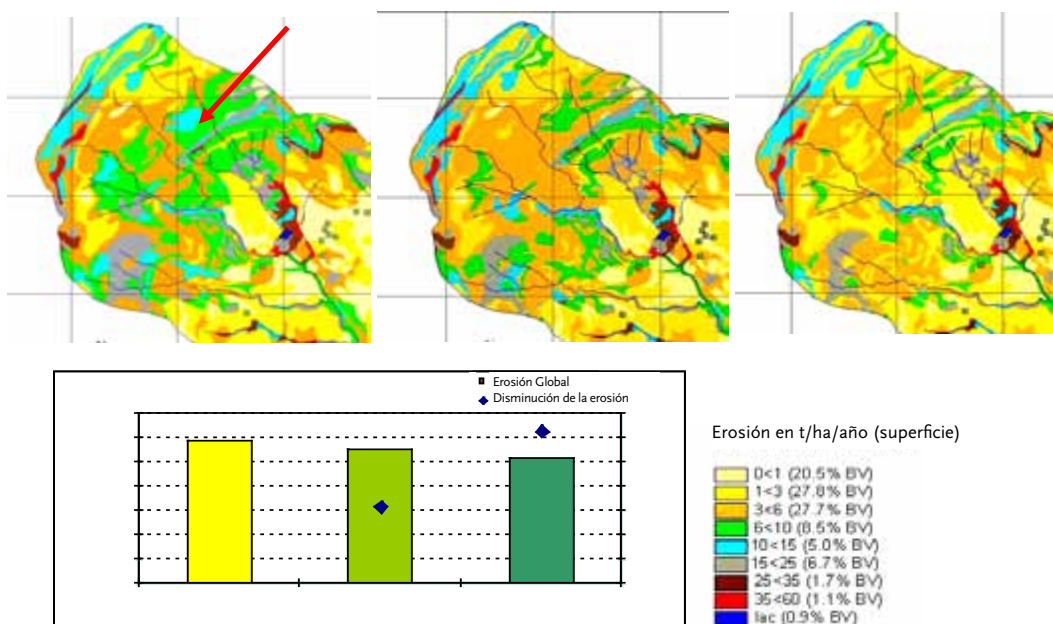


Figura 46. Cuenca de Abdessadok (parcial), control de la erosión al reemplazar los matorrales (izquierda) en los litosoles de la cabecera por un bosque joven (centro) que madura (derecha).

### Cuadro 18. Simulación de la retirada de los aterrazamientos

Esta simulación analizó los efectos de la eliminación total de los aterrazamientos a ambos lados del río. Esta eliminación aumentaría en un 30% la erosión total de la cuenca (Figura 47). Retirando sólo las terrazas del margen derecho o sólo las del izquierdo, se obtiene como resultado que sus efectos protectores varían significativamente, dependiendo de los márgenes: el derecho parece ser más frágil puesto que los suelos desnudos ocupan un área mayor y las pendientes son más pronunciadas.

suelo revisada-versión 2) de G.R. Foster, permiten aplicaciones en pendientes de geometría compleja. Se aplicaron y combinaron con GIS en diferentes cuencas de Túnez (ver Cuadro 16). Los resultados se han comparado con la colmatación de los embalses de vertiente, y muestran que los métodos usados para simular la erosión del suelo concuerdan con las observaciones reales y que pueden ofrecer valiosos datos para mejorar aún más el uso del suelo y las técnicas agrícolas.

- b) La cubierta vegetal influencia los procesos del agua y de erosión del suelo (ver capítulos 1 y 2). Por lo tanto, al diseñar planes para la gestión de las cuencas, es importante predecir las consecuencias sobre la erosión del uso de ciertos tipos de cubiertas en determinadas partes de la cuenca. Puesto que la experimentación es un proceso largo (¡especialmente si hay que plantar un bosque!), unas técnicas de modelización robustas pueden ofrecer excelentes alternativas. En la misma cuenca del Abdessadok, esos métodos se han aplicado con éxito tal y como se aprecia en el Cuadro 17. Los resultados muestran que sustituir algunas unidades de vegetación arbustiva por superficies plantadas de pino carrasco reduciría las pérdidas de suelo y la colmatación de las presas, aparte de suministrar otros bienes.
- c) Además de las presas, la gestión de las cuencas a menudo incluye aterrazamientos para la retención de agua y suelo en ambas riberas del río mientras fluye a través del glacis cultivado. Las técnicas de modelización pueden simular los efectos de la ausencia o la retirada de estos aterrazamientos. Algunos resultados de

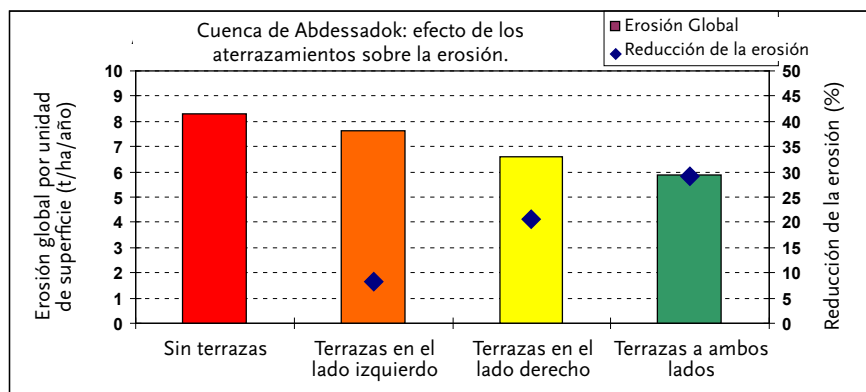


Figura 47. Cuenca de Abdessadok: Cambio de la erosión como resultado de la retirada parcial o total de los aterrazamientos en el tramo bajo de la cuenca.

simulaciones llevadas a cabo en la cuenca del Abdessadok se pueden ver en el Cuadro 18. Muestran que, mientras las terrazas juegan un papel significativo en la reducción de la erosión, su eficiencia protectora difiere en función del suelo y su cubierta.

Es conveniente afinar el sentido crítico ante un modelo que es más estadístico que físico. El modelo usado presenta varios términos multiplicativos que no explican la falta de linealidad entre factores, pero los cálculos de la erosión en los cuatro estudios anteriores en cuencas de áreas equivalentes producen resultados que concuerdan con los valores medidos por la batimetría en los embalses de ladera.

Esta concordancia se debe, probablemente, al hecho de que el sedimento que se produce en los diferentes segmentos de las pendientes se transportan totalmente a la presa sin sedimentación intermedia –puesto que las pendientes son cortas y, generalmente, muy pronunciadas, los flujos de agua mantienen su capacidad de transporte, dada su velocidad y el fino tamaño de los elementos que transporta. La erosión total calculada según su peso también confirmó unos resultados razonables del modelo. Las simulaciones acaban dando una valoración apropiada de los efectos de cualquier cambio propuesto incluyendo la reforestación, en las áreas con recurso hídricos apropiados para el establecimiento de las plántulas. Un caso específico que no se ha cubierto en los estudios de los que hemos hablado se refiere a las cuencas que están parcial o totalmente sobre margas y que, por ello, son especialmente propensas al embarrancamiento. En estas condiciones, la erosión puede ser entre 10 y 100 veces superior a la erosión laminar calculadas en los modelos anteriores.

### Lecturas recomendadas

- Albergel, J. and Rejeb, N., 1997. Les lacs collinaires en Tunisie: Enjeux, contraintes et perspectives. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. Pp.77–88.
- Bruand, A., Perez Fernandez, P., Duval, O., Quetin, P., Nicoullaud, B., Gaillard, H. and Raison, L. 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols, utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *EGS / AFES* 9(2) 105–125.
- Collinet J., Zante P. and Ghesmi M. 2001. Cartographie des risques érosifs sur le bassin versant du barrage collinaire de Zanfour (nord dorsale tunisienne). Pour la convention CRDA Le Kef / ESAK / IRD dans le cadre du Programme: Développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion., Mission I R D de Tunis. 60 p.
- Hentati, A., Kawamura, A., Amaguchi, H. and Iseri Y. 2010. Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the Self-Organizing Map. *Geomorphology* 122: 56–64.
- Foster, G.R., Yoder, D.C., McCool, D.K., Weesies, G.A., Toy T.J. and Wagner L.E. 2001. The Design Philosophy Behind RUSLE2: Evolution of an Empirical Model. Pp. 95–98. In: *Soil Erosion Research for the 21st Century*, Proc. Int. Symp. (3-5 January 2001, Honolulu, HI, USA). Eds. J.C. Ascough II and D.C. Flanagan. St. Joseph, MI: ASAE. 701P0007.





What Science  
Can Tell Us

# Agua para los Bosques y la Sociedad en el Mediterráneo

– Un difícil equilibrio

Yves Birot, Carlos Gracia y Marc Palahí (editores)





# What Science Can Tell Us

Marc Palahí, Editor-In-Chief  
Minna Korhonen, Managing Editor  
The editorial office can be contacted at [publications@efi.int](mailto:publications@efi.int)

Layout: Kopijyvä Oy / Janne Kuivalainen  
Printing: Kopijyvä Oy

Disclaimer: This volume has been developed with the support of the SylvaMED Project “Mediterranean forests for all”, with the financial contribution of the European Union through its European Regional Development Fund and the Programme MED. The views expressed are those of the authors and do not necessarily represent those of the European Forest Institute or the European Union.

ISBN 978-952-5453-87-4 (printed)  
ISBN 978-952-5453-88-1 (pdf)



EUROPEAN FOREST INSTITUTE