



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

9CFE-1873

Organiza





Regímenes dinámicos ecológicos: un concepto clave para evaluar la resiliencia ecológica forestal

SÁNCHEZ-PINILLOS, M. (1), DAKOS, V. (2) y KÉFI, S. (2)

(1) Université du Québec à Montréal (UQAM).

(2) Centre Nationale de la Recherche Scientifique (CNRS).

Resumen

En el actual contexto de cambio global, promover la resiliencia forestal se ha convertido en un objetivo fundamental de la gestión y planificación. Sin embargo, la urgencia de comprender empíricamente la resiliencia de los sistemas forestales ha dado lugar al desarrollo de métricas y análisis que no siempre están relacionadas con la teoría de la resiliencia, asumiendo, por ejemplo, que el estado pre-perturbación de un bosque se encuentra en equilibrio.

En esta contribución, se presentan las características de un nuevo marco metodológico basado en regímenes dinámicos ecológicos y trayectorias sucesionales. Este marco metodológico comprende un conjunto de métricas y análisis que permiten identificar, caracterizar y comparar los regímenes dinámicos de los bosques a partir de grandes bases de datos. Además, esta metodología incluye una serie de indicadores para evaluar la resiliencia ecológica en función de la desviación de las dinámicas de los bosques perturbados con respecto a un régimen dinámico de referencia. Notablemente, el uso de regímenes dinámicos ecológicos en el análisis de la resiliencia facilita la identificación de los factores más relevantes para promover la resiliencia de los sistemas forestales y proporcionan información más precisa sobre el esfuerzo de gestión necesario para restaurar un sistema perturbado.

Palabras clave

Dinámica forestal, trayectorias ecológicas, cambios de régimen, inestabilidad ecológica, perturbaciones.

1. Introducción

La creciente incidencia de perturbaciones forestales extremas como grandes incendios, plagas y sequías combinadas con perturbaciones de presión debidas al cambio climático amenazan seriamente a sistemas forestales de todo el mundo, así como su funcionamiento y servicios ecosistémicos asociados. En este contexto, fomentar la resiliencia de los bosques se ha convertido en un objetivo fundamental para la gestión y planificación forestales en las últimas décadas. El concepto de resiliencia ecológica fue introducido por HOLLING en 1973 como la capacidad de un ecosistema para “absorber” los cambios en las variables de estado y procesos ecológicos, manteniendo su funcionamiento tras las perturbaciones. En su artículo seminal, HOLLING (1973) fundamentó la teoría de la resiliencia en la de sistemas dinámicos y destacó dos componentes a tener en cuenta en la evaluación de la resiliencia: el comportamiento dinámico del sistema, incluyendo sus ciclos y fluctuaciones, y la configuración de “fuerzas” derivadas de relaciones de retroalimentación positivas y negativas capaces de mantener o desviar el sistema



de su dominio de atracción (HOLLING ,1973).

Si bien ambos componentes han estado siempre presentes en la gestión y planificación forestales (HAWLEY & SMITH, 1962), la necesidad urgente de obtener medidas de resiliencia que ayuden a la toma de decisiones y la falta de inventarios que abarquen largas escalas temporales han dado lugar al empleo de métricas y análisis que no siempre están relacionadas con la teoría de la resiliencia. Concretamente, en una revisión bibliográfica realizada por NIKINMAA et al. (2020), los autores encontraron que la mayoría de los estudios en ciencias forestales utilizan el concepto de resiliencia de ingeniería (i.e., la capacidad del sistema para recuperarse después de una perturbación). De acuerdo con esta definición, se asume que el sistema permanece próximo a un único estado de atracción al que regresa tras haber sido perturbado. La cuantificación de la resiliencia de ingeniería normalmente requiere la identificación de tres estados: un estado de referencia de las condiciones previas a la perturbación, otro durante o inmediatamente después de la perturbación y un estado posterior, tras el cese de la perturbación. La comparación entre los estados pre- y post-perturbación sirven para cuantificar en qué medida el sistema ha resistido los efectos de la perturbación y su capacidad para recuperar el estado de referencia definido (INGRISCH & BAHN, 2018; YI & JACKSON, 2021).

El concepto de resiliencia de ingeniería puede resultar útil para cuantificar la recuperación de un estado concreto del bosque (e.g., la productividad de las masas forestales después de una sequía). Sin embargo, al utilizar un estado estático como referencia (e.g., el estado inmediatamente anterior a la perturbación o un valor medio de estados no perturbados) se asume que los bosques permanecen en torno a ese estado estacionario, eludiendo la estocasticidad y variabilidad de las dinámicas forestales y pasando por alto la importancia de las dinámicas transicionales y sus fluctuaciones (HASTINGS, 2004; ABBOTT et al., 2021).

Existe, por tanto, una necesidad urgente de desarrollar nuevas herramientas capaces de cuantificar y evaluar la resiliencia ecológica en sistemas forestales fuera del equilibrio, teniendo en cuenta su estocasticidad, fluctuaciones y dimensionalidad (i.e., los múltiples componentes que interactúan entre sí). En este trabajo, se abordan los principales retos que hay que superar para evaluar empíricamente la resiliencia ecológica en sistemas forestales y se resume un nuevo enfoque metodológico que permite evaluar la resiliencia ecológica empíricamente utilizando regímenes dinámicos como referencia (SANCHEZ-PINILLOS et al., 2023 y, 2024), en contraposición al uso de estados estables estáticos. Finalmente, se resaltan las implicaciones para la gestión forestal de evaluar la resiliencia ecológica de sistemas forestales utilizando sus regímenes dinámicos.

2. Retos para cuantificar la resiliencia ecológica de sistemas forestales empíricamente

Existen cuatro retos principales a la hora de evaluar la resiliencia ecológica empíricamente: (1) el tipo de atractor y las dinámicas transicionales, (2) la



estocasticidad y variabilidad de las dinámicas de los ecosistemas, (3) la dimensionalidad de los dominios de atracción y (4) la estabilidad de los dominios de atracción (SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2024). Primero, sería deseable evitar en la medida de lo posible los enfoques metodológicos que asuman el equilibrio de los bosques en un estado estacionario (e.g., un pinar en estado de fustal bajo). **Reconocer y entender la dinámica forestal** es esencial en cualquier plan de ordenación y gestión forestal. Aunque después de una perturbación el bosque no haya recuperado el mismo estado previo a la perturbación, no significa que éste no sea resiliente, pues puede estar en un estado sucesional o de desarrollo previo (e.g., matorral con regenerado de pinos) o incluso posterior (e.g., pinar en estado de fustal medio o alto). Segundo, es importante tener en cuenta que **los sistemas forestales están constantemente sometidos variaciones en las condiciones ambientales y pequeñas perturbaciones difíciles de detectar** que pueden afectar a su dinámica. Por tanto, además de entender la tendencia general de la dinámica forestal, es importante tener en cuenta un rango de variación dentro del cual el sistema mantiene su funcionamiento (e.g., mayor o menor abundancia relativa de pino y roble en una masa mixta). Tercero, es importante también evitar indicadores univariantes. Al igual que otros ecosistemas, **los sistemas forestales dependen de múltiples componentes que interactúan entre sí**. De esta manera, una especie puede ser muy resiliente a una perturbación concreta (e.g., especies rebrotadoras después de un incendio). Sin embargo, si se trata por ejemplo de un bosque mixto de pino laricio (*Pinus nigra*) y quejigo (*Quercus faginea*), aunque el quejigo sea capaz de rebrotar después de un incendio, si se ha perdido por completo la presencia de pino, el funcionamiento del sistema habrá cambiado sustancialmente. Finalmente, ante el actual contexto de cambio global, es importante considerar que **las observaciones históricas de la dinámica forestal no son necesariamente constantes** y que, por tanto, en un paisaje de estabilidad formado por múltiples dominios de atracción, uno o varios de ellos pueden desaparecer debido a los cambios en las condiciones ambientales. Esto es especialmente relevante para especies o comunidades en sus límites de distribución.

El marco metodológico basado en regímenes dinámicos (SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2023, 2024) permite evaluar la resiliencia ecológica de los sistemas forestales haciendo frente a estos retos, caracterizando la dinámica de los sistemas forestales cuantitativamente desde una perspectiva multidimensional y sin asumir el equilibrio de ningún estado forestal.

3. Regímenes dinámicos ecológicos: un enfoque metodológico multidimensional para evaluar la resiliencia ecológica empíricamente

El marco metodológico basado en regímenes dinámicos ecológicos comprende un conjunto de métricas y análisis que permiten identificar, caracterizar y comparar cuantitativamente las tendencias generales y variabilidad de la dinámica sucesional de una gran variedad de ecosistemas, así como evaluar su resiliencia ecológica a perturbaciones de pulso y de presión (SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2023 y, 2024). Este marco metodológico está basado en el concepto de **régimen dinámico ecológico (EDR, según sus siglas en inglés)**, definido como las “*fluctuaciones naturales en los estados de los ecosistemas en torno a una tendencia o media*”



resultante de un conjunto de procesos internos y fuerzas externas que mantienen al sistema dentro de un dominio de atracción” (SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2023).

Para analizar EDRs a partir de datos empíricos, el enfoque metodológico basado en EDRs utiliza como elemento fundamental un **espacio de estados (Ω)** definido a partir de un espacio de semejanza multidimensional entre las variables de estado. Más concretamente, el espacio de estados está definido por una matriz de disimilaridades entre los estados (observaciones) de series temporales empíricas. De esta manera, esta metodología puede ser aplicada a distintas escalas ecológicas (e.g., poblaciones, comunidades) y variables de estado (e.g., clases de edad, abundancia de especies, teselas de paisaje) siempre y cuando sus cambios puedan ser cuantificados mediante una métrica de disimilaridad. Una trayectoria ecológica queda definida en el espacio de estados a partir de los cambios temporales en las variables de estado en una unidad de muestreo (e.g., una parcela permanente): $T=\{(x_1,t_1),\dots,(x_n,t_n)\}$, donde x es un vector con información sobre las variables de estado en el momento t .

Identificación, caracterización y comparación de regímenes dinámicos ecológicos

Un EDR es identificado empíricamente como un conjunto de trayectorias ecológicas que muestran procesos semejantes en cuanto al desarrollo, interacción y reorganización de las variables de estado a través del tiempo y que, por tanto, comparten similares patrones geométricos en el espacio de estados. Para ello, se pueden utilizar análisis de *cluster* (o análisis de grupos) y una métrica de disimilaridad entre trayectorias (e.g., DE CÁCERES et al., 2019). De esta manera, el marco metodológico basado en EDRs permite identificar sucesiones forestales a partir de series temporales relativamente cortas utilizando datos de inventarios forestales. En SÁNCHEZ-PINILLOS et al., (2023), por ejemplo, se reconstruyó la dinámica de bosques boreales canadienses a partir de los cambios en composición específica y estructura monitorizados en parcelas de muestreo permanentes (Figura 1).

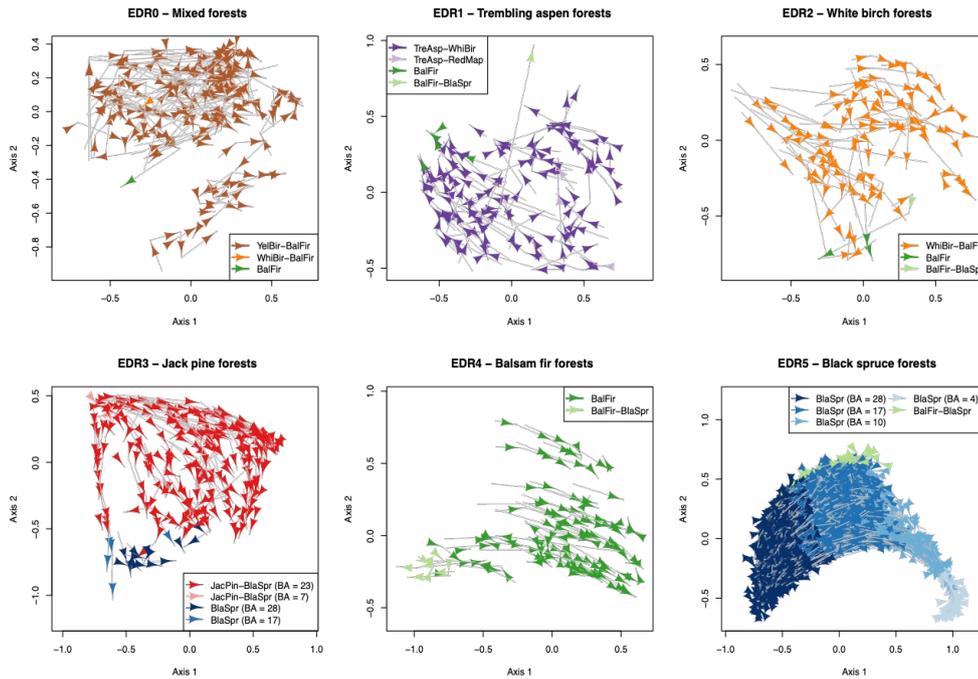


Figura 1. Regímenes dinámicos ecológicos (EDRs) de los principales bosques de Quebec (Canada) reconstruidos a partir de parcelas de muestreo permanentes. Cada trayectoria simboliza los cambios temporales en la composición y estructura del bosque. EDR0: bosques mixtos; EDR1: bosques dominados por *Populus tremuloides*; EDR2: bosques dominados por *Betula papyrifera*; EDR3: bosques dominados por *Pinus banksiana*; EDR4: bosques dominados por *Abies balsamea*; EDR5: bosques dominados por *Picea mariana*. Figura de SÁNCHEZ-PINILLOS et al., (2023.)

Una vez se hayan identificado los EDRs, la metodología permite caracterizar y sintetizar las dinámicas ecológicas a partir de un conjunto de **trayectorias representativas** que pasan por las regiones más densas del EDR (i.e., con una mayor densidad de trayectorias) y definen los cambios en las variables de estado más representativas y más observadas en la naturaleza (Figura 2). La distribución de las trayectorias y su variabilidad dentro de un EDR puede ser evaluada a partir de tres métricas de **dispersión dinámica (*dDis*)**, **diversidad beta dinámica (*dBBD*)**, DE CÁCERES et al., 2019) y **regularidad dinámica (*dEve***, variación del índice de regularidad funcional propuesto por (VILLÉGER et al. 2008) (Figura 2). Estos análisis son de gran utilidad para identificar las dinámicas generales de un sistema forestal a lo largo de la sucesión y cuantificar su variabilidad como respuesta a la estocasticidad intrínseca del sistema y las variaciones en las condiciones medioambientales.

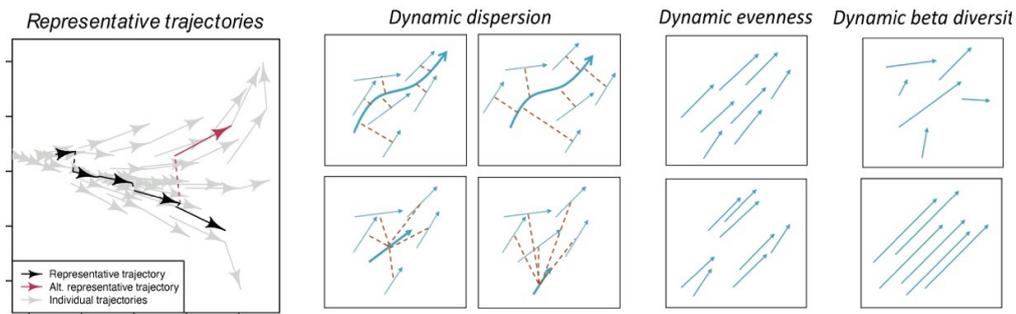


Figura 2. Trayectorias representativas (negro y rojo) definidas a partir de un EDR generado a partir de trayectorias simuladas (gris). La dispersión dinámica (dynamic dispersion) es mayor cuanto más alejadas están las trayectorias de un EDR con respecto a una trayectoria de referencia (representada por una trayectoria más gruesa). La regularidad dinámica (dynamic evenness) es mayor cuanto menos agrupadas estén las trayectorias de un EDR. La diversidad beta dinámica (dynamic beta diversity) es mayor cuanto más diferentes entre sí sean las trayectorias de un EDR. Figuras de SÁNCHEZ-PINILLOS et al. (2023).

El marco metodológico ofrece también una **métrica de disimilaridad entre EDRs (dDR)**. Dicha métrica permite comparar la redundancia entre dos EDRs por ejemplo, para comparar las dinámicas entre bosques dominados por las mismas especies en lugares distintos (e.g., bosques de pino silvestre en el Sistema Ibérico y el Sistema Central) o los cambios temporales de un mismo EDR, pudiendo comparar de esta manera los efectos de las condiciones ambientales en la dinámica forestal.

Evaluación de la resiliencia ecológica a partir de regímenes dinámicos ecológicos

Para evaluar la resiliencia ecológica de un sistema forestal (o de cualquier otro ecosistema) a una perturbación de pulso, el marco metodológico basado en EDRs propone utilizar regímenes dinámicos formados a partir de trayectorias no perturbadas como una aproximación de su dominio de atracción y una trayectoria representativa como una trayectoria de referencia (SÁNCHEZ-PINILLOS et al. 2024). De esta manera, el empleo de EDRs permite considerar las fluctuaciones del bosque a lo largo del tiempo, además de la variabilidad entre distintas unidades de muestreo y la estocasticidad generada por pequeñas perturbaciones no detectadas. El uso de espacios de ordenación permite representar las trayectorias de unidades de muestreo no perturbadas, así como las perturbadas. Esto permite identificar tres tipos de respuesta de los sistemas perturbados en relación a sus regímenes dinámicos: (1) **trayectorias de resistencia**, si todos los estados post-perturbación permanecen dentro de los límites del régimen dinámico al que pertenecen los estados anteriores a la perturbación (Figura 3: trayectoria B); (2) **trayectorias de recuperación**, cuando los estados post-perturbación visitan los márgenes del régimen dinámico antes de retornar hacia el núcleo del EDR o una trayectoria representativa (Figura 3: trayectoria C) y (3) **cambio de régimen dinámico**, si los estados post-perturbación migran hacia un régimen alternativo definido por

dinámicas forestales distintas al régimen al que pertenecen los estados pre-perturbación (Figura 3: trayectoria A).

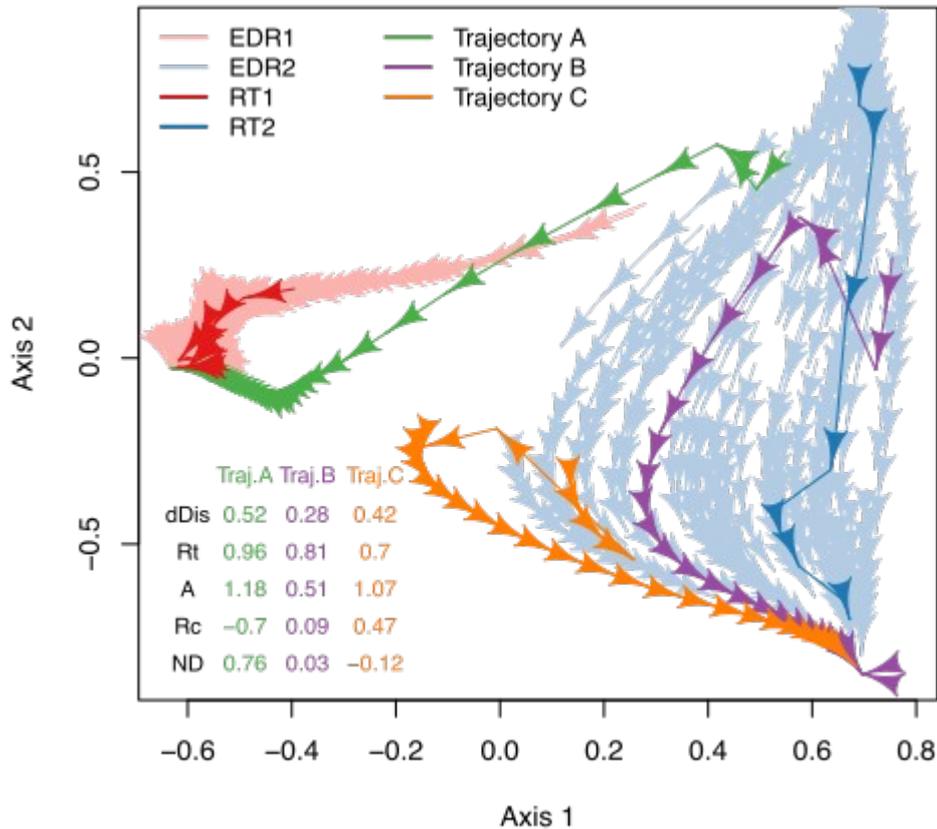


Figura 3. Tipos de respuesta que puede mostrar un sistema ecológico perturbado por una perturbación de pulso: resistencia (trayectoria B, morada), recuperación (trayectoria C, naranja) o cambio de régimen dinámico (trayectoria A, verde). En rojo y azul se representan dos EDRs alternativos (EDR1, EDR2) y sus correspondientes trayectorias representativas (RT1, RT2). Las métricas de dispersión dinámica (dDis), resistencia (Rt), amplitud (A), recuperación (Rc) y cambio neto (NC) permiten cuantificar la divergencia de las trayectorias perturbadas en relación a un EDR de referencia (EDR2, azul). Figura de SÁNCHEZ-PINILLOS et al. (2024).

Además de la caracterización descriptiva de las trayectorias perturbadas en relación a un EDR de referencia (Figura 3), la metodología permite utilizar la trayectoria representativa u otra trayectoria utilizada como referencia para determinar la desviación de las trayectorias perturbadas de su dominio de atracción (i.e., un EDR tomado como referencia). Para ello, la metodología aporta cuatro indicadores de resistencia, amplitud, recuperación y cambio neto (Figura 4, Tabla 1).

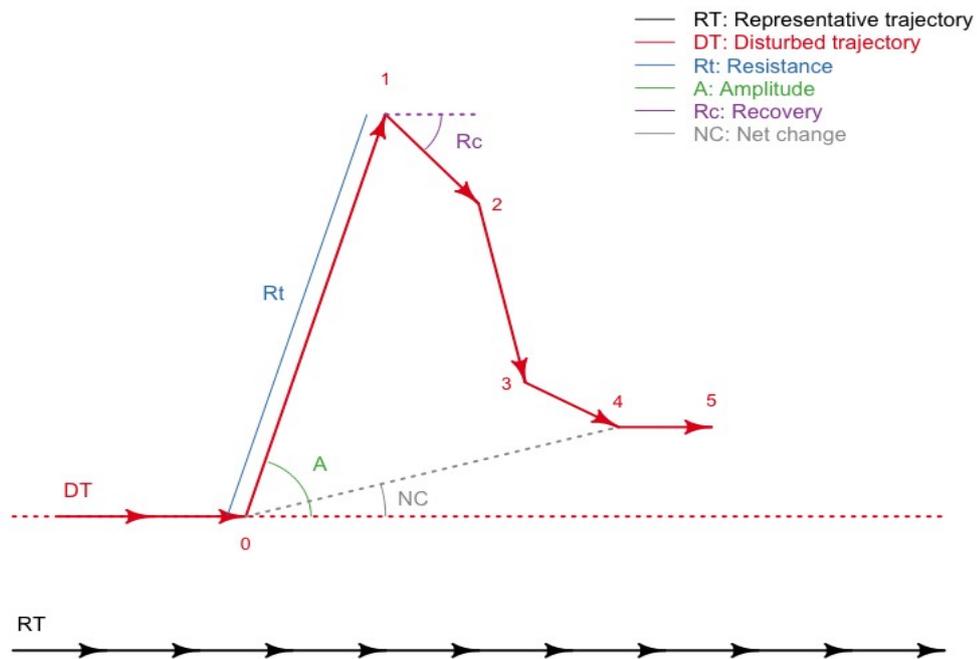


Figura 4. Representación gráfica de los índices de resistencia (R_t), amplitud (A), recuperación (R_c) y cambio neto (NC) en una trayectoria perturbada (DT) en relación a una trayectoria de referencia (RT) perteneciente a un régimen dinámico ecológico. Figura extraída de la viñeta “Ecological resilience to pulse disturbances” del paquete de R ‘ecoregime’ (SÁNCHEZ-PINILLOS et al. 2024).

La **resistencia (R_t)** es independiente a la posición de la trayectoria perturbada dentro del régimen dinámico y cuantifica el impacto directo de la perturbación en las variables de estado. Es decir, cuánto han cambiado las variables que definen el sistema durante la perturbación. La **amplitud (A)** cuantifica la dirección del sistema durante la perturbación en relación al impacto de la perturbación y su proximidad a la trayectoria de referencia. Una amplitud positiva indicaría que la perturbación ha desplazado al sistema hacia los márgenes del régimen dinámico, mientras que valores negativos indicarían un acercamiento a la trayectoria de referencia. La **recuperación (R_c)** cuantifica la habilidad del sistema para retornar hacia la trayectoria de referencia (valores positivos) o alejarse de esta (valores negativos) inmediatamente después de la perturbación. Por último, el **cambio neto (NC)** cuantifica la proximidad de los estados post-perturbación a la trayectoria de referencia en relación al cambio neto producido en el sistema. La amplitud, recuperación y cambio neto pueden ser expresados de forma absoluta (i.e., mediante las distancias que separan cada uno de los estados de la trayectoria de referencia) o relativa (i.e., en función de la capacidad del sistema para reorganizarse después de cambios en las variables de estado me mayor o menor intensidad) (Tabla 1).

Tabla 1. Ecuaciones de las métricas de resistencia, amplitud, recuperación y cambio neto para evaluar la desviación de una trayectoria perturbada en relación a una trayectoria de referencia en un EDR.

Métrica	Absoluto	Relativo
Resistencia		$R_t=1-d_{0,1}$
Amplitud	$A_{abs}=d_{1,RT-d0,RT}$	$A_{rel}=d_{1,RT-d0,RTd0,1}$
Recuperación	$R_{cabs}=d_{1,RT-d1+,RT}$	$R_{crel}=d_{1,RT-d1+,RTd1,1+}$
Cambio neto	$NC=d_{1+,RT-d0,RT}$	$ND=d_{1+,RT-d0,RTd0,1+}$

$d_{i,j}$: disimilaridad entre dos estados, $i, j, 0, 1, y 1+$ hacen referencia a estados antes, durante y después de la perturbación, respectivamente. R_t es la trayectoria de referencia.

Además, la métrica de **dispersión dinámica ($dDis$)** puede ser utilizada para cuantificar el grado de dispersión (o, complementariamente, el grado de pertenencia) de las trayectorias perturbadas con respecto a las trayectorias que forman el EDR de referencia.

Como se ha mencionado anteriormente, evaluar la resiliencia ecológica de los bosques implica reconocer que sus regímenes dinámicos no son necesariamente estables y que pueden variar e incluso desaparecer como consecuencia de cambios en los factores medioambientales. El marco metodológico basado en EDRs permite evaluar los cambios producidos en los regímenes dinámicos forestales mediante la comparación de sus trayectorias representativas y las métricas de distribución de trayectorias (i.e., $dDis$, $dEve$, dBD) o, directamente mediante la **métrica de disimilaridad de un EDR (dDR) en diferentes momentos** bajo los efectos de una perturbación de presión (Figura 5).

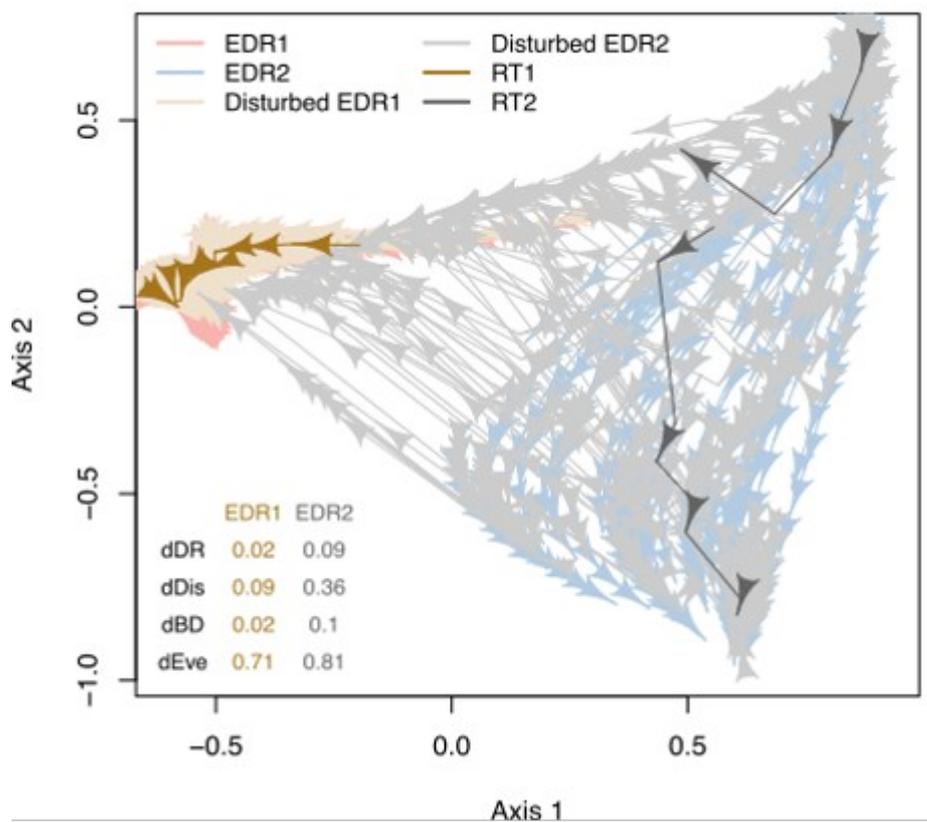


Figura 5. Cambios producidos en dos EDRs (EDR1, EDR2) antes (EDR1: rojo, EDR2: azul) y durante (EDR1: beige, EDR2: gris) una perturbación de presión causada por una modificación de las condiciones ambientales. RT1 y RT2 representan las trayectorias representativas de los EDRs perturbados. Figura de SÁNCHEZ-PINILLOS et al. (2024).

4. El paquete de R ‘*ecoregime*’

Todos los análisis y métricas desarrollados dentro del marco metodológico basado en EDRs están implementados en el paquete de R ‘*ecoregime*’ (disponible en CRAN). Este paquete de R incluye un conjunto de funciones para caracterizar, comparar, representar y cuantificar la resiliencia ecológica de cualquier ecosistema a partir de una matriz de disimilaridades entre los estados de múltiples trayectorias ecológicas. Además, ‘*ecoregime*’ incluye una base de datos que sirve como ejemplo de aplicación en la documentación de cada función, así como dos exhaustivas viñetas que explican con gran detalle el procedimiento a seguir para identificar, caracterizar y comparar EDRs (“*Ecological Dynamic Regime framework*”) y para evaluar la resiliencia ecológica de un sistema a perturbaciones de pulso (“*Ecological resilience to pulse disturbances*”). Otra información relativa al uso de ‘*ecoregime*’ puede consultarse en <https://github.com/MSPinillos>.

5. Conclusiones e implicaciones para la gestión forestal

Entender los factores que afectan la dinámica forestal es imprescindible a la hora de planificar la ordenación forestal de un monte y anticipar los efectos de potenciales perturbaciones en un contexto de cambio global sin precedentes.



Desde el punto de vista de la conservación de los servicios ecosistémicos de un bosque, promover la resiliencia de ingeniería puede parecer una decisión lógica para garantizar una provisión constante de servicios reduciendo el rango de variación espacial y/o temporal del sistema. Sin embargo, las prácticas de gestión basadas en el “comando y control” que pretenden mantener los sistemas forestales en un estado estático particular pueden tener serias consecuencias negativas a largo plazo (HOLLING & MEFFE, 1996). Por ejemplo, la extinción de incendios o el control de otras perturbaciones de baja severidad contribuyen a la homogeneización del paisaje, la densificación del bosque y, en definitiva, un riesgo elevado de perturbaciones de alta intensidad en el futuro debido a la gran acumulación de biomasa. Por otro lado, tratar de mantener el sistema en un estado transicional requeriría frecuentes intervenciones selvícolas que, a largo plazo, resultarían económicamente inviables.

El primer paso para mejorar la resiliencia ecológica de los sistemas forestales en el futuro es adoptar una perspectiva fuera del equilibrio que reconozca la variabilidad y fluctuaciones de la dinámica forestal. El marco metodológico basado en regímenes dinámicos ecológicos definido en las secciones anteriores pretende ser una herramienta de utilidad para evaluar la resiliencia ecológica de los bosques, en contraposición a otras perspectivas estáticas que promuevan las prácticas de gestión de comando y control. En concreto, la aplicación de este marco metodológico a los sistemas forestales aportaría información relevante para el desarrollo de dos estrategias fundamentales de conservación: la prevención y la restauración. Por un lado, esta metodología permite reconocer qué regiones de un régimen dinámico forestal son más vulnerables a un cambio en el régimen dinámico. Es decir, qué estados de desarrollo del bosque, en términos de las variables de estado (e.g., composición, estructura, rasgos funcionales) muestran un cambio sustancial en sus dinámicas tras los efectos de una perturbación o alteraciones ambientales. Conocer estos estados permitiría a los gestores forestales hacer un uso más eficiente de los recursos, favoreciendo medidas de prevención durante las etapas y procesos más vulnerables. Por otro lado, reconocer los estados post-perturbación que han sufrido un cambio en el régimen dinámico aporta una información pragmática sobre la necesidad y efectividad de las prácticas de restauración. De este modo, resultará innecesario tratar de restaurar un bosque dentro de los rangos de variación naturales del sistema (e.g., trayectoria B, Figura 3) y posiblemente inviable restaurar un bosque en el que ha ocurrido un cambio del régimen dinámico (e.g., trayectoria A, Figura 3). Por el contrario, los esfuerzos de restauración deberían centrarse en los bosques próximos a los márgenes del régimen dinámico (e.g., trayectoria C, Figura 3).

Dado que el desarrollo del marco metodológico basado en regímenes dinámicos es muy reciente, futuras aplicaciones en sistemas forestales reales afectados por perturbaciones de distinta intensidad y duración son esenciales para entender su relevancia en la conservación y gestión de los sistemas forestales. Se espera, por tanto, que esta contribución sirva de inspiración para la ciencia forestal, con el objetivo último de aportar información precisa que los gestores forestales puedan utilizar para evitar respuestas indeseables de los bosques ante el actual contexto de cambio global.



6. Agradecimientos

Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 bajo el acuerdo de ayudas Marie Skłodowska-Curie N° 891477 (proyecto RESET).

7. Bibliografía

ABBOTT K.C., CUDDINGTON K., HASTINGS A. 2021. Transients in Ecology: Stochasticity, Management, and Understanding. *Theor. Ecol.* 14: 623–624.

DE CÁCERES M., COLL L., LEGENDRE P., ALLEN R.B., WISER S.K., FORTIN M.J., CONDIT R., HUBBELL S. 2019. Trajectory Analysis in Community Ecology. *Ecol. Monogr.* 89: 1–20.

HASTINGS A. 2004. Transients: The Key to Long-Term Ecological Understanding? *Trends Ecol. Evol.* 19: 39–45.

HAWLEY R.C., SMITH D.M. 1962. *The Practice of Silviculture*. Wiley. 578

HOLLING C.S. 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 4: 1–23.

HOLLING C.S., MEFFE G.K. 1996. Command and Control and the Pathology of Natural Resource Management. *Conserv. Biol.* 10: 328–327.

INGRISCH J., BAHN M. 2018. Towards a Comparable Quantification of Resilience. *Trends Ecol. Evol.* 33: 251–259.

NIKINMAA L., LINDNER M., CANTARELLO E., JUMP A.S., SEIDL R., WINKEL G., MUYS B. 2020. Reviewing the Use of Resilience Concepts in Forest Sciences. *Curr. Forestry Rep.* 6: 61–80.

SÁNCHEZ-PINILLOS M., DAKOS V., KÉFI S. 2024. Ecological Dynamic Regimes: A Key Concept for Assessing Ecological Resilience. *Biol. Conserv.* 289: 110409.

SÁNCHEZ-PINILLOS M., KÉFI S., DE CÁCERES M., DAKOS V. 2023. Ecological Dynamic Regimes: Identification, Characterization, and Comparison. *Ecol. Monogr.* 93(4): e1589

VILLÉGER S., MASON N.W.H., MOUILLOT D. 2008. New Multidimensional Functional Diversity Indices for a Multifaceted Framework in Functional Ecology.



Ecology 89: 2290–301.

YI C., JACKSON N. 2021. A Review of Measuring Ecosystem Resilience to Disturbance. *Environ. Res. Lett.* 16: 053008.