

Efecto de la interacción entre cambio climático y erosión sobre la vegetación y el suelo. Un caso de estudio en Teruel

Patricio García-Fayos y Esther Bochet*

RESUMEN. Mediante un diseño factorial, se analizaron las consecuencias de la actuación simultánea de dos factores de cambio global sobre las propiedades de los ecosistemas. Usamos como factores el clima y la pendiente del terreno como aproximaciones respectivamente del efecto del cambio climático esperado para mitad del siglo XXI y del efecto de la deforestación. Como propiedades del ecosistema se usaron variables de vegetación y suelo.

Los resultados muestran un efecto negativo del cambio climático y de la erosión sobre la riqueza de especies y las propiedades del suelo cuando ambos actúan de manera aislada. Ahora bien, cuando ambos factores actúan simultáneamente, el efecto total es menor que la suma del efecto de ambos por separado, menos para la cobertura vegetal en que el efecto fue igual a la suma.

También encontramos que las propiedades del suelo se correlacionan más fuertemente con la riqueza de especies que con la cobertura vegetal.

* Centro de Investigaciones sobre Desertificación -CIDE- (CSIC-UV-GV) - 46113 Moncada (Valencia).

ABSTRACT. In this study we analyze the consequences on ecosystems of the simultaneous action of several factors of global change. For this, we analyze separately and simultaneously the consequences of climate change and erosion on vegetation and soil variables using a factorial design of two climates and two terrain slopes. These factors were used as approximations to the effect of climate change expected for the middle of the 21st century and the effect of deforestation.

The results indicate that when climate change and erosion act independently, their effects are negative on all variables. However, when both factors act simultaneously, their effects on species richness and soil properties are lesser than the sum, except in the case of vegetation cover, where the effects of climate change and erosion add up. We also find that soil properties correlate more strongly with species richness than with plant cover.

Efecto de la interacción entre cambio climático y erosión sobre la vegetación y el suelo. Un caso de estudio en Teruel

Introducción

Existe un creciente reconocimiento por parte de la sociedad de que los ecosistemas son valiosos no sólo por se sino también porque proveen de servicios tales como regulación del clima, polinización, depuración de agua, etc., en lo que se ha dado en llamar “servicios ecosistémicos” (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Este reconocimiento ha estimulado a los científicos a buscar indicadores que, mediante la medición de una o unas pocas variables, informen del estado de un ecosistema en comparación con otros ecosistemas, en comparación consigo mismo en el pasado o predecir su futuro. Disponer de esos indicadores, proveería de una herramienta potente para la planificación de la gestión.

La biodiversidad –entendida como el número total de especies o el número de especies que pertenecen a un mismo grupo, p.ej. plantas, en un ecosistema dado– es uno de los indicadores más frecuentemente empleados como medida de estado del ecosistema debido a la sencillez de su medición. Pero resulta cada vez más evidente que el mero número de especies que coexisten en un ecosistema informa menos sobre la salud de dicho ecosistema que el conocer la identidad y función de las especies que componen dicha diversidad (Bannar Martin et al. 2018). Así, las evidencias científicas sobre la influencia del número de especies de plantas en la descomposición de la materia orgánica del suelo, los nutrientes disponibles y la resistencia a la erosión son contradictorias, mientras que existe un consenso general sobre el importante papel que juegan sobre esas mismas variables las características funcionales de las especies de plantas presentes, como el que esas especies sean herbáceas o leñosas, de hoja caduca o perenne, etc. (Bardgett 2005).

En la actualidad, pocas personas dudan que la biodiversidad en nuestro planeta está amenazada por distintas presiones o “motores de cambio” como los cambios de uso de la tierra, el cambio climático y la invasión de especies, entre otros (Sala et al. 2000). Sabemos que cada uno de estos motores tiene consecuencias negativas sobre la biodiversidad, pero no sabemos qué ocurre cuando más de un motor de cambio actúa a la vez. Podría ocurrir que el resultado fuese igual a la suma de los efectos independientes de cada uno de ellos (efecto aditivo), pero también que el resultado fuese mayor (efecto sinérgico) o menor (efecto antagónico) a dicha suma. En la Figura 1 hemos representado gráficamente estas alternativas.

En este artículo presentamos los resultados de una investigación sobre el efecto en la vegetación de los dos motores de cambio considerados de mayor impacto, el cambio de uso y el cambio climático, en una región, la Mediterránea, que ha sido identificada como una de las dos regiones climáticas del mundo en donde se prevé que el impacto de ambos motores de cambio sea proporcionalmente mayor (Sala et al.

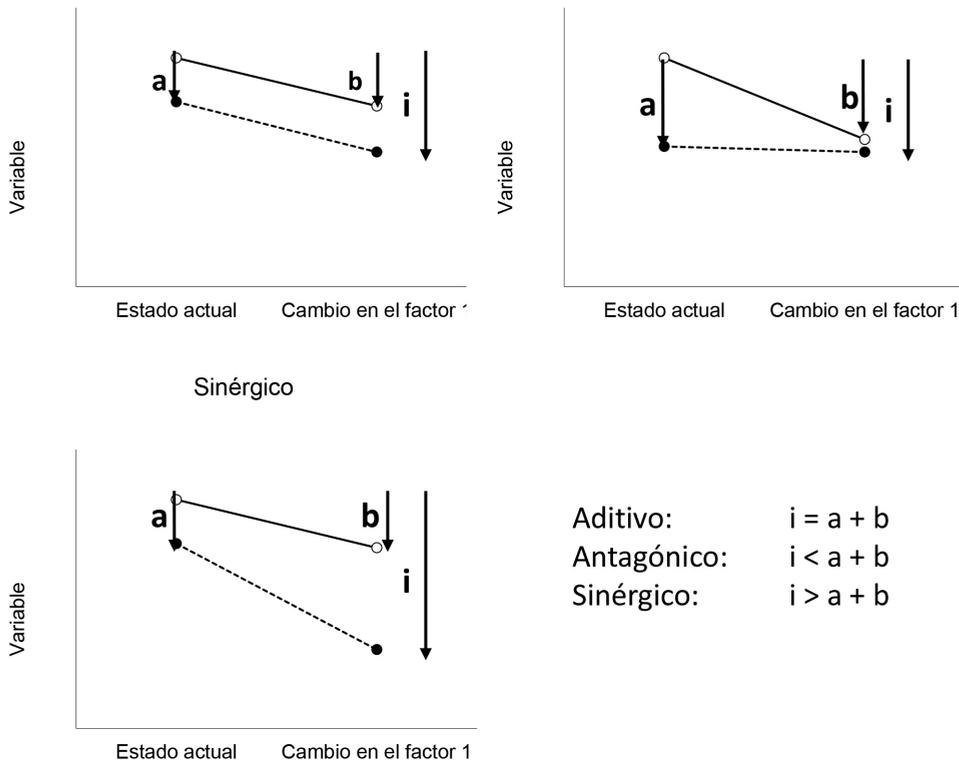


Figura 1. Modelos de interacción entre factores de cambio (adaptado de la referencia Sala et al. 2000). Los factores implicados pueden ser cambio climático, cambio de uso, invasiones, etc. Las variables de interés pueden ser la riqueza de especies, la cobertura vegetal, la materia orgánica del suelo, etc. El término "a" representa la magnitud de cambio en la variable que es producido por el factor 1 solamente. El término "b" es la magnitud de cambio en la variable que es producido por el factor 2 solamente. El término "i" es la magnitud de cambio en la variable que es causado por la interacción entre los factores 1 y 2 cuando actúan a la vez.

2000). Al mismo tiempo, para comprobar que las variables de vegetación escogidas son indicadoras de funcionalidad del ecosistema, analizaremos la relación entre ellas y parámetros del suelo relacionados con funciones importantes como la nutrición vegetal, así como con la degradación.

Dada la complejidad de manipular experimentalmente el clima y la erosión o de observar sus efectos durante largo tiempo, el enfoque utilizado en esta investigación es observacional e indirecto. Así, como aproximación al efecto del calentamiento global, comparamos dos zonas cuya actual diferencia de temperaturas coincide con el cambio de temperatura pronosticado en la zona más fría para 2050 (de Castro et al. 2015). Como aproximación al aumento de la erosión del suelo, comparamos pla-

Efecto de la interacción entre cambio climático y erosión sobre la vegetación y el suelo. Un caso de estudio en Teruel

nicies de las montañas con sus laderas, entendiendo que el proceso es ilustrativo del impacto del cambio de uso del suelo cuando se deforesta una ladera. La consecuencia en el funcionamiento del ecosistema del cambio climático y la erosión se midieron a través de variables de suelo. La cobertura vegetal, la riqueza de especies de plantas y la proporción de cobertura y riqueza que corresponde a especies anuales, herbáceas perennes y leñosas, se utilizaron como indicadores del estado del ecosistema. La subdivisión por tipos de plantas se hizo con la intención de recoger la influencia diferencial de los principales tipos de plantas en términos de aporte de restos vegetales y su velocidad de descomposición.

Material y Métodos

Sistema de estudio

Se escogieron dos zonas de estudio, una en el extremo norte y la otra en el extremo sur de la cuenca del río Alfambra (40° 50' N, 1° 9' W y 40° 19' N, 1° 9' W) con marcado contraste climático, pero con el mismo patrón estacional de temperatura y precipitación. La temperatura media y la precipitación anual para cada una de estas zonas durante el período 1960-1990 fue de 10.3 °C y 484 mm y de 11.9 °C and 368 mm (datos de las estaciones meteorológicas de Bueña y Teruel, respectivamente). Las diferencias climáticas actuales entre ambos extremos de la cuenca reproducen el cambio pronosticado para mediados del s. XXI en la zona norte: un aumento de 2 °C en la temperatura media anual y un 25% de reducción en la precipitación anual (de Castro et al. 2005). Los suelos son entre limosos y areno-limosos, calcáreos (10-40% contenido en CO₃Ca) y no salinos (<0.45 dS.m⁻¹).

Asociadas al clima, existen variaciones paralelas en la vegetación. Esta varía desde bosques de quejigos (*Quercus faginea*) al norte de la cuenca hasta bosques dominados por carrasca (*Q. ilex subsp. ballota*) y sabina albar (*Juniperus thurifera*) en el sur. A pesar de estas diferencias climáticas y de vegetación potencial, ambas zonas comparten el 47% de las especies.

En cada zona escogimos sistemas de planicie y ladera orientados al sur. Las planicies tenían un tamaño entre 10 y 100 km², tenían una pendiente menor de 5°, sin signos de erosión del suelo y estaban dominadas por bosque. Las laderas tenían 100-500 m de longitud, una pendiente entre 25-30°, presentaban el 25-30% de su superficie afectada por regueros y cárcavas de 5 m de ancho o mayores y estaban cubiertas de vegetación arbustiva y herbácea. Haciendo una estimación de la erosión de las planicies y laderas mediante la fórmula universal de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1978), la tasa de erosión en las laderas sería 650-790% mayor que en las pla-

nicies. Diferencia que se encuentra dentro del rango de erosión en laderas de montaña mediterránea cuando se deforestan, cultivan o incendian (Campo et al. 2006).

Diseño experimental y análisis de los datos

Se utilizó un diseño factorial 2x2 con dos factores, clima y erosión. Clima incluyó los niveles “fresco y húmedo” (zona en el extremo norte de la cuenca) y “cálido y seco” (zona en el extremo sur); y erosión, los niveles “sin erosión” (planicies) y “erosión elevada” (laderas). En cada una de las cuatro combinaciones se seleccionaron 15 lugares independientes que no mostraran signos de haber sido cultivadas ni de incendios, y en cada lugar se instaló una parcela de muestreo de 1x20 m con el eje mayor perpendicular a la pendiente. En el caso de las planicies, las parcelas se localizaron en claros de bosque con un tamaño mínimo de 0.05 km² y separados al menos 100 m de otros claros. En el caso de las laderas, las parcelas se situaron en porciones de ladera separadas de otras al menos por un barranco.

La vegetación se muestreó durante la primavera de 2006. Con una cinta métrica de 20 m situada en el borde sur de cada parcela se midió los centímetros que cada especie interceptaba con la cinta. Como algunas especies se solapaban, la cobertura vegetal total se calculó considerando el valor de intercepción de vegetación con la cinta. La riqueza de especies se obtuvo identificando todas las especies presentes en cada parcela. Cada especie se asignó a cada una de las siguientes categorías funcionales: anuales, herbáceas perennes y leñosas. Las especies herbáceas nacen, se reproducen y mueren dentro del mismo año (p. ej. el cantarillo (*Androsace máxima*) y la linaria (*Linaria glauca* subsp. *aragonensis*)); las especies herbáceas perennes no poseen partes leñosas, pero viven más de un año (p. ej. el lastón (*Brachypodium retusum*), el junquillo (*Aphyllantes monspeliensis*) y el gamón (*Asphodelus fistulosus*)); mientras que las especies leñosas viven muchos años, pero tienen sus partes aéreas leñosas (p. ej. el quejigo (*Quercus faginea*), la sabina mora (*Juniperus phoenicea*) y el tomillo (*Thymus vulgaris*)). Como consecuencia de las diferencias entre estos tres grupos funcionales de plantas, el aporte de restos orgánicos al suelo es distinto y estos restos se degradan a diferente velocidad, por lo que tendrá consecuencias diferentes sobre los suelos y el reciclaje de los nutrientes. Así, las especies anuales aportan muy pocos restos vegetales que son rápidamente descompuestos, las herbáceas leñosas aportan muchos más restos también de rápida descomposición, mientras que las especies leñosas aportan más o menos restos, dependiendo de la especie, los cuales se descomponen lentamente.

En el otoño del mismo año en cada parcela tomamos de manera equidistante 5 submuestras de 300 cm³ de suelo hasta 5 cm de profundidad, los mezclamos, los dejamos secar al aire en el laboratorio y los tamizamos hasta 2 mm de luz de malla. En cada muestra determinamos el contenido de arena fina (0.50-0.05 mm), la capacidad

Efecto de la interacción entre cambio climático y erosión sobre la vegetación y el suelo. Un caso de estudio en Teruel

de almacenar agua, expresada como la diferencia en el volumen de agua en un suelo desde que se ejerce una presión de 33 KPa (capacidad de campo) hasta una presión de 1500 KPa (punto de marchitez de las plantas) medidas con una cámara de presión, el contenido en materia orgánica (por oxidación con dicromato potásico), nitrógeno total (método de Kjeldalh) y fósforo soluble (método de Olsen). Los análisis los realizamos siguiendo los procedimientos estándar del laboratorio de suelos del CIDE (Forteza et al. 1995).

El contenido de arena fina lo usamos como un indicador de degradación del suelo. La capacidad de almacenar agua la usamos como indicador de la máxima cantidad de agua disponible para las plantas, mientras que el contenido en materia orgánica, nitrógeno total y fósforo los usamos como indicadores de fertilidad del suelo.

Utilizamos Modelos Generales Lineales (MGL) para analizar los efectos de las variables independientes (clima, erosión y su interacción –por interacción nos referimos al efecto conjunto de ambas variables) sobre las variables dependientes (cobertura y riqueza de especies, proporción de anuales, herbáceas perennes y leñosas, y parámetros de suelo). A partir de los modelos lineales ($|i-(a+b)|$) se puede obtener el balance de cambio neto en una variable dependiente que es causado por los efectos individuales de clima (a) y erosión (b) comparado con el cambio causado por la interacción de ambos (i). Si el balance neto no es distinto de 0, entonces asumimos que los efectos de la erosión y cambio climático son aditivos. Si el balance es mayor que 0, entonces asumimos que los efectos son sinérgicos. Y si es menor que 0, entonces asumimos que los efectos son antagónicos (ver Figura 1). Los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS v. 9.1.

Adicionalmente, y para determinar la fuerza de la relación entre las variables de suelo y vegetación usamos el coeficiente de correlación de Pearson (r) usando el procedimiento de Bonferroni para corregir el efecto que tiene usar varias veces la misma variable (i. e. la correlación de la riqueza de especies con cada una de las cinco variables de suelo) sobre la probabilidad (p) de que la correlación sea significativa.

Previo a los análisis se comprobó que las variables cumpliesen con los requisitos de normalidad y homogeneidad de varianzas y se transformaron cuando fue necesario. Tuvimos que descartar de los análisis una parcela perteneciente al tratamiento “fresco y húmedo” y “erosión elevada” debido a que su valor en la mayoría de las variables analizadas se situaba muy alejado del resto de los valores de parcelas con el mismo tratamiento. Tras volver a visitar dicha parcela, pudimos comprobar que la ladera en la que ésta se situaba estaba afectada por la reciente construcción de una carretera 100 m más abajo, lo que estaba causando procesos de erosión por regularización de la pendiente.

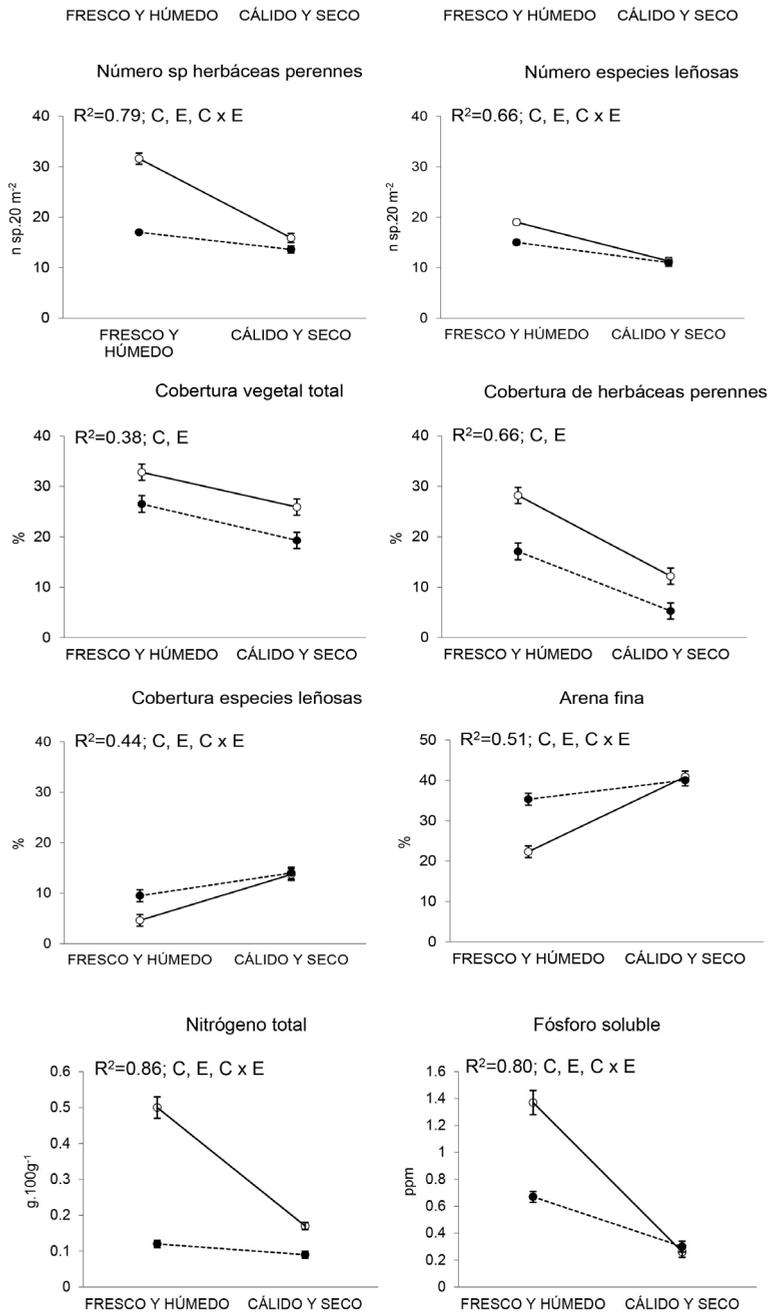


Figura 2. Gráficas representando el efecto del cambio climático y la erosión sobre diversas variables de vegetación y suelo. Los valores en el eje de ordenadas representan las medias \pm 1 desviación estándar de las variables sin transformar. La presencia de texto encima de una figura indica que el modelo lineal para la variable representada es significativo ($p < 0.05$), e informa del valor del coeficiente de determinación (R^2) y cuáles factores han sido significativamente incluidos por el modelo (C: clima; E: erosión; C x E: interacción entre clima y erosión).

Efecto de la interacción entre cambio climático y erosión sobre la vegetación y el suelo. Un caso de estudio en Teruel

Resultados

Los datos obtenidos de las parcelas se presentan en la Figura 2, y evidencian que, como esperaríamos, la mayoría de las propiedades de vegetación son más favorables bajo clima “fresco y húmedo” que bajo clima “cálido y seco”, y también en las zonas situadas en planicies (“sin erosión”) respecto aquellas situadas en ladera (“erosión elevada”). Los datos también evidencian que el clima y la erosión y la interacción entre ambas afectan negativamente a la mayoría de las variables y, lo que es más interesante, que el efecto de aplicar ambos factores simultáneamente es antagónico; es decir, que el efecto conjunto es menor que la suma de los efectos del clima y la erosión por separado.

En el caso de la riqueza de especies, cuando el clima se hace más cálido y seco el número de plantas presentes en las parcelas disminuye en 16 especies en promedio, y cuando pasamos de planicies a laderas esa disminución es de 11 especies (Figura 2). Además, la pérdida de especies al pasar de planicies a laderas no es igual en ambos climas, y eso es lo que significa que exista interacción entre los factores. Así, en el clima “fresco y húmedo” la pérdida media de especies por parcela al pasar de planicie a ladera es de 13 especies, mientras que sólo es de 3 especies en el clima “cálido y seco”. Por último, si sumamos la pérdida de especies por parcela que cada factor causa por separado y la comparamos con la pérdida debida a la interacción de ambos factores (Tabla 1), comprobamos que el efecto de la suma de ambos factores es mayor que el de la acción simultánea y, por tanto, podemos afirmar que ambos factores actúan de manera antagónica. En términos estadísticos, podemos decir que más del 80% ($R^2=0.81$) de la variación de los datos de riqueza de especies obtenidos en las parcelas es explicada por el modelo lineal que incluye el clima, la erosión y su interacción y, además, la probabilidad de que este resultado se deba a la casualidad es muy baja ($p<0.05$) y, en consecuencia, estos resultados son significativos. Si desglosamos la riqueza de especies entre número de especies anuales, herbáceas perennes y leñosas, en los tres casos se repite el mismo efecto antagónico, aunque los modelos lineales explican una proporción algo menor de la variación de los datos (Figura 2, Tabla 1). En el caso de las especies anuales, el efecto del clima y la erosión es positivo, hace aumentar el número de especies anuales, al revés que ocurre con la riqueza de los otros grupos de especies.

La cobertura vegetal total en las parcelas es baja en general, menos del 40%, y el efecto de ambos factores es negativo (Figura 2). El modelo lineal explica bastante poco de la variación de la cobertura, sólo el 38%, y, a diferencia de lo que ocurriría con la riqueza de especies, no hay interacción entre ambos factores (Figura 2); su efecto es aditivo (Tabla 1), es decir, pasar de planicies a laderas produce una reducción de la cobertura vegetal en la misma proporción en ambos climas; y, por último, la reduc-

Tabla 1. Balance neto entre el cambio en las variables dependientes causado por la interacción entre el clima y la erosión y el cambio causado por la suma de los efectos de cada uno

	$ i - (a + b) $	Modelo
RIQUEZA DE ESPECIES (n)		
Todas las especies	-16.05 ± 5.25	antagónico
Especies anuales	-2.50 ± 2.04	antagónico
Especies herbáceas perennes	-12.27 ± 3.86	antagónico
Especies leñosas	-3.67 ± 2.49	antagónico
COBERTURA VEGETAL (%)		
Todas las especies	0.30 ± 6.39	aditivo
Especies herbáceas perennes	-4.30 ± 6.33	aditivo
Especies leñosas	-4.60 ± 4.57	antagónico
PROPIEDADES DEL SUELO		
Arena fina (%)	-9.28 ± 4.00	antagónico
Capacidad almacenar agua (g.100g ⁻¹)	-12.33 ± 3.33	antagónico
* Materia orgánica (g.100g ⁻¹)	-0.90 ± 0.29	antagónico
* Nitrógeno total (g.100g ⁻¹)	-0.81 ± 0.27	antagónico
Fósforo soluble (ppm)	-0.73 ± 0.23	antagónico

Los valores son valores absolutos de la media ± 1 Desviación estándar, i representa la cantidad de cambio de la variable que es causado por la interacción entre clima y erosión, a representa la cantidad de cambio en la variable que es causado por el cambio en el clima, b representa la cantidad de cambio en la variable que es causado por la erosión del suelo. El balance neto no difiere de 0 cuando el modelo es aditivo, es mayor que 0 cuando el modelo es sinérgico o multiplicativo, y es menor que cero cuando el modelo es antagónico o sustractivo (ver también la Figura 1). Los números en negrilla indican que el resultado difiere significativamente de 0 (la probabilidad de que se deba al azar es $p < 0.05$).

ción de la cobertura es la misma si aumentamos primero la temperatura y disminuimos la precipitación en la proporción indicada y luego las sometemos a intensa erosión, que si sometemos las parcelas a la vez al cambio climático y la erosión. Ahora bien, cuando analizamos los cambios en la cobertura vegetal por parte de los grupos de especies considerados el resultado difiere. Así, la cobertura vegetal de las especies herbáceas perennes se ve afectada negativamente por el cambio climático y la erosión mientras que la cobertura de especies leñosas aumenta (Figura 2). La cobertura de especies anuales es tan escasa (<0.1%) que no la hemos considerado en los análisis. El total de la variación explicado por el modelo lineal para las especies herbáceas perennes (66%) y las leñosas (44%) es mucho mayor que el explicado por la cobertura vegetal total, lo que se justifica por el efecto opuesto del clima y la erosión en cada grupo de plantas. Ahora bien, mientras que la interacción sigue sin intervenir en el modelo de las especies herbáceas perennes, y por tanto el efecto de ambos factores es aditivo, el modelo para las especies leñosas muestra interacción entre ambos factores y un efecto antagonista como ocurría con la riqueza de especies (Figura 2 y Tabla 1). En el caso de las especies herbáceas perennes, la reducción en cobertura debida al clima es mayor que la reducción debida a la erosión (14 y 9%, respectivamente).

Efecto de la interacción entre cambio climático y erosión sobre la vegetación y el suelo. Un caso de estudio en Teruel

Lo mismo que encontramos para los indicadores vegetales lo hallamos para las variables edáficas. Así, los modelos lineales explican una proporción importante de la variación de los datos (ver Figura 2) y muestran que el suelo es negativamente afectado por ambos factores, pero que el efecto de la erosión es más fuerte en la zona con clima “fresco y húmedo” que en la zona “cálida y seca” (existe interacción). Además, y al igual que en la vegetación, los efectos de ambos factores son antagónicos, es decir, son menores cuando actúan a la vez que si lo hacen de manera independiente (Tabla 1).

Tabla 2. Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables de planta y de suelo

	AF	CAA	MO*	N*	P
RIQUEZA DE ESPECIES (n)					
Todas las especies de plantas	-0.7840	0.8176	0.8102	0.7852	0.7964
Plantas anuales	-0.0980	0.0199	0.1524	0.1600	-0.2141
Plantas herbáceas perennes	-0.7931	0.8237	0.8013	0.8097	0.7665
Plantas leñosas	-0.6290	0.6713	0.6734	0.5882	0.7074
COBERTURA VEGETAL (%)					
Todas las especies de plantas	-0.3750	0.5149	0.5971	0.5506	0.5172
Plantas herbáceas perennes	-0.5790	0.7310	0.7272	0.7074	0.6969
Plantas leñosas	0.5320	-0.6157	-0.4998	-0.5264	-0.5519

* Valores transformados logarítmicamente

Los coeficientes en negrilla indican que las correlaciones son significativas; es decir, que la probabilidad de que el coeficiente de correlación obtenido se deba al azar es $p < 0.05$; (AF: Arena fina; CAA: Capacidad de Almacenar Agua; MO: Contenido en Materia Orgánica; N: Nitrógeno total; P: Fósforo soluble).

Aunque la riqueza de especies y la cobertura vegetal totales no difieren en el signo de su correlación con las variables de suelo, sí que lo hace la fuerza de dicha correlación (Tabla 2). Así, todas las variables del suelo se correlacionan más fuertemente con la riqueza total de especies que con la cobertura vegetal, y lo mismo ocurre al considerar por separado los grupos funcionales de plantas (Tabla 2). Todas las correlaciones, menos la riqueza de especies anuales, fueron significativas, es decir, que la probabilidad de que las propiedades estén relacionadas entre sí por azar es muy baja ($p < 0.05$).

La riqueza de especies y la cobertura vegetal se correlacionaron positivamente con todas las variables excepto con la arena fina, que presentó una correlación negativa (Tabla 2). Al considerar por separado cada grupo funcional de plantas, el signo y la fuerza de esta correlación se mantuvo para la riqueza de especies herbáceas perennes y leñosas, pero no para la cobertura de plantas leñosas, que se correlacionó más débilmente que la de la cobertura de herbáceas perennes (Tabla 2).

Discusión

Como era de esperar, en nuestro sistema de estudio la riqueza de especies y la cobertura vegetal se correlacionan fuertemente con la mayoría de las variables de suelo, las cuales son afectadas negativamente por el cambio climático predicho para mitad del s. XXI en la zona y por la erosión. En el caso de las variables de riqueza de plantas y de las propiedades del suelo, la acción conjunta del cambio climático y la erosión produce un efecto antagónico. Es decir, que el efecto de uno de los factores de cambio sobre las variables del ecosistema es tal, que añadir otro factor de degradación al mismo tiempo no aumenta el deterioro del sistema, pues éste ya está muy degradado. Sin embargo, para el caso de la cobertura vegetal total y de herbáceas perennes, el efecto de ambos factores de cambio es aditivo, es decir que además del deterioro producido por el cambio climático, estos sitios sufren un deterioro adicional debido a la erosión, de manera que el efecto conjunto es igual a la suma de los efectos de ambos factores por separado.

Otro resultado de esta investigación es el diferente papel de grupos de plantas con características funcionales distintas. Así, la correlación positiva entre riqueza de especies y cobertura vegetal y propiedades del suelo se considera una consecuencia directa de la incorporación de los restos vegetales y raíces y la subsiguiente descomposición e incorporación al suelo y liberación de nutrientes que incrementan la estabilidad del suelo. Pero cuando miramos la correlación entre los distintos grupos de plantas encontramos que la distinta calidad de esos restos vegetales de esos grupos importa (Wardle et al. 2006). Así, la hojarasca de las especies herbáceas tiene mayores tasas de descomposición que las de las especies leñosas debido a las diferencias en el contenido y proporción de lignina, celulosas y compuestos químicos secundarios (terpenos y otras sustancias aromáticas) (Cornelissen et al. 1999). Por tanto, a mayor proporción de especies herbáceas en una comunidad vegetal, mayor será la incorporación de materia orgánica en el suelo y sus beneficios. Como las diferencias en cobertura vegetal total entre los tratamientos en nuestra zona de estudio se deben principalmente a las diferencias en cobertura de las especies herbáceas perennes (r cobertura vegetal x cobertura herbáceas perennes = 0.8311, $p < 0.0001$), la correlación positiva entre cobertura vegetal y materia orgánica, nitrógeno y fósforo del suelo debe ser atribuida principalmente a la cobertura de especies herbáceas. Esta interpretación es reforzada también por la correlación inversa que existe entre la cobertura de especies leñosas y las propiedades del suelo.

La disparidad entre el modelo antagónico para la riqueza de especies y el aditivo para los de cobertura total y de herbáceas perennes y la mayor correlación entre propiedades del suelo con la riqueza de especies que con la cobertura vegetal podrían explicarse por medio de la existencia de interacciones positivas entre plantas conocidas

Efecto de la interacción entre cambio climático y erosión sobre la vegetación y el suelo. Un caso de estudio en Teruel

como “facilitación”. Este proceso de facilitación consiste en que algunas especies de plantas son capaces de colonizar los sitios con condiciones ambientales duras (suelo, clima, etc.). Conforme esas plantas se desarrollan, sus raíces, el aporte de restos orgánicos, la sombra que producen, etc. retienen los sedimentos arrastrados por la erosión y aumentan el volumen de suelo disponible y mejoran sus propiedades y modifican el microclima bajo de la planta y en su entorno, de tal manera, que hacen posible la entrada de otras especies que son incapaces de colonizar por si solas estos ambientes. Pero esas especies “facilitadas” generalmente son pequeñas especies herbáceas que viven al abrigo de las colonizadoras y aportan poco a la cobertura vegetal en términos cuantitativos, pero la calidad de los aportes de restos orgánicos al suelo es elevada y de rápida incorporación al suelo. Así, encontramos en nuestro estudio que en las parcelas con peores condiciones ambientales hay más especies raras (especies que sólo aparecen en 4 de las 15 parcelas o en menos) que en las parcelas con las mejores condiciones, el 44% de las especies en parcelas de clima “cálido y seco” y “erosión elevada” frente a 35% de las especies en parcelas bajo clima “fresco y húmedo” y “sin erosión”; y que, además, la proporción de especies anuales en esos sitios desfavorables fue casi el doble que en los favorables, el 30% frente el 16%, respectivamente. Este proceso de “facilitación” es más frecuente e intenso cuanto más severas son las condiciones del medio, como ocurre en los ambientes de clima seco y semiárido, caso de la mayor parte del territorio mediterráneo de la Península Ibérica (Maestre et al. 2016). Ahora bien, este fenómeno de facilitación tiene límites (Brooker et al. 2007), que son cuando las condiciones ambientales son tan favorables, y entonces se producen fenómenos de competencia entre plantas por los recursos (luz, nutrientes, etc.) y cuando las condiciones se hacen tan desfavorables que hay muy pocas especies capaces de sobrevivir (p. ej. pre-desierto, ausencia de suelo).

Los resultados presentados aquí forman parte de un trabajo más extenso (v. García-Fayos & Bochet, 2009) y aunque son coherentes con la teoría y con resultados de otros trabajos experimentales y observacionales, nuestra aproximación, más correlacional que causal, impide inferir relaciones causales. Quizá otros usos y otras perturbaciones antiguas, así como procesos geomorfológicos no detectados podrían explicar también el patrón encontrado aquí y que atribuimos al clima y a la erosión.

Por último, nuestros resultados deberían hacer pensar sobre cuáles deben ser las prioridades de conservación en relación con el cambio climático, si los ecosistemas ricos de especies que sufren grandes cambios si se erosionan más que aquellos ya pobres por sus condiciones y que cuando otro factor como la erosión opera, no tiene consecuencias tan fuertes.

Agradecimientos

Queremos agradecer especialmente a Jean Poesen (Catholic University of Leuven) por sus sugerencias en las fases preliminares de esta investigación. A Vicente Monleon (Pacific North West Research Station, US Forest Service, Corvallis, Oregón) por su ayuda con los análisis estadísticos. La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) nos suministró los datos de las estaciones de Bueña y Teruel para el período 1990-2006. Roberto Ruilope (AGROLAB S.A.), David Chiralt, Lourdes Tellols, Sonia Capitán y Julia Martín nos ayudaron con los análisis de suelo. Esta investigación se pudo realizar gracias al Proyecto CGL2005-03912/BOS del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Referencias

- BANNAR MARTIN, K. H., KREMER, C. T., ERNEST, S. M., LEIBOLD, M. A., AUJE, H., CHASE, J., DECLERCK, S. A., EISENHAUER, N., HARPOLE, S., HILLEBRAND, H., ISBELL, F., KOFFEL, T., LARSEN, S., NARWANI, A., PETERMANN, J. S., ROSCHER, C., CABRAL, J. S. y SUPP, S. R. (2018): Integrating community assembly and biodiversity to better understand ecosystem function: the Community Assembly and the Functioning of Ecosystems (CAFE) approach. *Ecology Letters* 21: 167-180.
- BARDGETT RD (2005): *The biology of soil. A community and ecosystem approach*. Oxford University Press. Oxford, 242 pp.
- BROOKER, R. W., MAESTRE, F. T., CALLAWAY, R. M., (y 24 autores más) (2008): Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future. *Journal of Ecology* 96(1), 18-34.
- CAMPO, J., ANDREU, V., GIMENO-GARCÍA, E., GONZÁLEZ, O., y RUBIO, J. L. (2006): Occurrence of soil erosion after repeated experimental fires in a Mediterranean environment. *Geomorphology*, 82, 376–387.
- CORNELISSEN JHC, PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. DÍAZ, S., GRIME, J. P., MARZANO, B., CABIDO, M., VENDRAMINI, F., y CERABOLINI, B. (1999): Leaf structure and defence control litter decomposition rate across species, life forms and continents. *New Phytologist* 143, 191-200.
- DE CASTRO M., MARTIN-VIDE, J. y ALONSO, S. (2005): El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el S.XXI. In: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático* (ed Moreno JM), pp 1-64. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- FORTEZA J.; RUBIO J. L., y GIMENO E. (1995): *Catálogo de suelos de la Comunidad Valenciana*. Generalitat Valenciana. Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación. Valencia.

Efecto de la interacción entre cambio climático y erosión sobre la vegetación y el suelo. Un caso de estudio en Teruel

- GARCÍA-FAYOS, P. y BOCHET, E. (2009): Indication of antagonistic interaction between climate change and erosion on plant species richness and soil properties in semiarid Mediterranean ecosystems. *Global Change Biology* 15(2), 306-318.
- MAESTRE, F. T., ELDRIDGE, D. J., SOLIVERES, S., KÉFI, S., DELGADO-BAQUERIZO, M., BOWKER, M. A., GARCÍA-PALACIOS, P. GAITÁN, J., GALLARDO, A., LÁZARO, R. y BERDUGO, M. (2016): Structure and functioning of dryland ecosystems in a changing world. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 47, 215-237.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005): *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- SALA O, CHAPIN III FS, ARMESTO JJ (y 16 autores más) (2000): Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science* 287, 1770-1774.
- WARDLE DA, YEATES GW, BARKER GM y BONNER KI (2006): The influence of plant litter diversity on decomposer abundance and diversity. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 1052-1062.
- WISCHMEIER WH y SMITH DD (1978): *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. USDA-ARS Handbook. 537 pp.

