

SPATIAL VARIABILITY OF THE COMPETITIVE EFFECT OF BARLEY (*Hordeum vulgare* L.) ON *Lolium rigidum* L.

VARIABILIDAD ESPACIAL DEL EFECTO COMPETITIVO DE LA CEBADA (*Hordeum vulgare* L.) EN *Lolium rigidum* L.

Jordi Izquierdo¹, César Fernández-Quintanilla²

¹Departamento de Ingeniería Agrolimentaria y Biotecnología. Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Baix Llobregat. Edifici D4. Av. Canal Olímpic s/n. 08860 Castelldefels, Catalunya, Spain. (jordi.izquierdo@upc.edu). ²Centro de Ciencias Medioambientales. CCMA-CSIC. C/ Serrano, 115. 28006 Madrid, Spain. (cesar@ccma.csic.es).

ABSTRACT

Lolium rigidum is a major grass weed of winter cereals in the Mediterranean area, in spite of the continuous use of herbicides in these crops. New management approaches focus on the reduction of the seed banks by enhancing crop competitiveness and, consequently, minimizing weed seed rain. However, the spatial heterogeneity that exists within fields results in differences in the growth and the competitiveness of crops and weeds. In order to determine if the competitive interactions between barley and *L. rigidum* are site-specific biomass and seed production of this weed, growing in monoculture (plots with *L. rigidum*) and in mixed culture (plots with *L. rigidum*+barley), were studied at three sites (in upland, mid-slope and lowland positions) within barley fields. In each site were determined weed populations, and in soil separates, nutrient content, organic matter, slope and orientation were determined for each site. Crop presence significantly reduced weed biomass between 5 and 79 % and seeds per spike between 10 and 48 %, depending on the site. The competitive effect of the crop was greater in the more fertile sites (with higher N, P and organic matter content). In these sites, differences in plant biomass accumulation between the weed in monoculture and the weed in mixed culture started to be significant after stem elongation. Regardless the reduction in the number of seeds per spike observed in the most fertile sites, seed rain (measured as seeds m⁻²) could still be very important if weed density of the site is high. The differences in the competitive interactions between barley and *L. rigidum* observed within the fields suggest that adequate crop husbandry practices addressed site-specifically to enhance crop competitiveness can play an important role

RESUMEN

Lolium rigidum es una de las principales malezas de los cereales de invierno en la región del Mediterráneo, pese al uso continuo de herbicidas en estos cultivos. Los nuevos enfoques para su manejo se centran en disminuir los bancos de semillas mediante el aumento de la competitividad de los cultivos y, en consecuencia, la reducción de la lluvia de semillas de malezas. Sin embargo, la heterogeneidad espacial que existe dentro de los campos ocasiona diferencias en el crecimiento y la competitividad de los cultivos y las malezas. Para determinar si las interacciones competitivas entre cebada y *L. rigidum* son sitio-específicas, la biomasa y la producción de semillas de esta maleza, cultivada en monocultivo (parcelas con *L. rigidum*) y en cultivo mixto (parcelas con *L. rigidum*+cebada), se estudiaron en tres sitios (altiplano, laderas medias y tierras bajas) dentro de campos de cebada. En cada sitio se determinaron las poblaciones de maleza y el contenido de nutrientes, materia orgánica, inclinación y orientación en las fracciones del suelo. La presencia del cultivo disminuyó significativamente la biomasa de la maleza entre 5 y 79 % y el número de semillas por espiga entre 10 y 48 %, dependiendo del sitio. El efecto competitivo del cultivo fue mayor en los sitios más fértiles (con mayor contenido de N, P y materia orgánica). En estos sitios, las diferencias en la acumulación de biomasa entre la maleza en monocultivo y en cultivo mixto empezaron a ser significativas después de la elongación del tallo. Aun cuando se observó una reducción en el número de semillas por espiga en los sitios más fértiles, la lluvia de semillas (medida como semillas m⁻²) todavía sería muy importante si la densidad de la maleza del sitio es elevada. Las diferencias en las interacciones competitivas entre cebada y *L. rigidum* observadas dentro de los campos sugieren que las buenas prácticas agrícolas de manejo sitio-específico para aumentar la competitividad del cultivo pueden desempeñar una función importante como mecanismo para reducir las poblaciones de *L. rigidum* a largo plazo.

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.
Received: September, 2008. Approved: October, 2009.
Published as ARTICLE in *Agrociencia* 44: 43-55. 2010.

as a mechanism to reduce *L. rigidum* populations over the long term.

Keywords: *Hordeum vulgare*, crop competition, seed rain, site-specific, topography, weed biomass.

INTRODUCTION

Lolium rigidum L. is a widespread and troublesome grass weed in cereal fields of the Mediterranean region (Gill, 1996, Recasens *et al.*, 1996). According to Gill (1996), ecological features such as high genetic variability, plasticity, fecundity and seed survival have contributed to its success as a major grass weed. In Catalonia, northeastern Spain, *L. rigidum* is present in more than 50 % of the cereal fields, occurring in a wide range of soils and environmental conditions and causing important yield losses to the crops (Izquierdo *et al.*, 2003). *L. rigidum* resistance to various herbicide groups (ACCase inhibitors, ureas, photosystem II inhibitors, glycinates) has been reported in several Spanish locations, threatening the sustainability of the existing herbicide-dependent cropping systems (Heap, 2008).

Most studies about crop-weed competition were carried out under homogeneous soil conditions (Izquierdo *et al.*, 2003; Lemerle *et al.*, 2004) and, consequently, did not take into account the underlying variability within a field. Topographic features (Shafii *et al.*, 2003; Burton *et al.*, 2005) and soil properties (Walter *et al.*, 2002; Nordmeyer and Häusler, 2004) are some of the factors that may act at the local scale and influence the response of weeds to competition. Characterizing spatial variability is essential for agricultural planning and site-specific management.

Weed populations have been found to be spatially heterogeneous within agricultural fields, in patches of various sizes and shapes (Blanco-Moreno *et al.*, 2004; Ruiz *et al.*, 2006 a). The spatial distribution of some weed species has been associated with various site properties such as elevation, exposure, slope angle and aspect, soil-water accumulation, soil texture and fertility (Burton *et al.*, 2005; Dieleman *et al.*, 2000; Ruiz *et al.*, 2006 b). In this regard, the spatial heterogeneity of *L. rigidum* populations frequently found in fields with a rolling landscape is probably associated with the differential crop-

Palabras clave: *Hordeum vulgare*, competencia de cultivo, lluvia de semillas, sitio-específico, topografía, biomasa de la maleza.

INTRODUCCIÓN

Lolium rigidum L. es una maleza de difícil control, ampliamente distribuida en los campos de cereal de la zona del Mediterráneo (Gill, 1996, Recasens *et al.*, 1996). Según Gill (1996), atributos ecológicos como una elevada variabilidad genética, plasticidad, fecundidad y supervivencia de la semilla han contribuido a que sea una de las principales malezas. En Cataluña, nordeste de España, *L. rigidum* está presente en más de 50 % de los campos de cereal, en una amplia variedad de suelos y condiciones ambientales, y causa grandes pérdidas del rendimiento de los cultivos (Izquierdo *et al.*, 2003). En varias localidades de España se ha reportado la resistencia de *L. rigidum* a varios grupos de herbicidas (inhibidores de la ACCasa, ureas, inhibidores del fotosistema II, glicinas), lo que amenaza la sostenibilidad de los sistemas de cultivo dependientes de herbicidas (Heap, 2008).

La mayoría de los estudios sobre competencia cultivo-maleza se efectuaron en condiciones homogéneas de suelo (Izquierdo *et al.*, 2003; Lemerle *et al.*, 2004) y, en consecuencia, no consideraron la variabilidad subyacente dentro de un campo. Las características topográficas (Shafii *et al.*, 2003; Burton *et al.*, 2005) y las propiedades del suelo (Walter *et al.*, 2002; Nordmeyer y Häusler, 2004) son algunos de los factores que pueden actuar localmente e influenciar la respuesta de las malezas a la competencia. La caracterización de la variabilidad espacial es fundamental para la planeación agrícola y el manejo sitio-específico.

Se ha observado heterogeneidad espacial de las poblaciones de malezas en los campos agrícolas, en sitios de diversos tamaños y formas (Blanco-Moreno *et al.*, 2004; Ruiz *et al.*, 2006 a). La distribución espacial de algunas especies de malezas se ha asociado a diversas condiciones del medio, como elevación, exposición, ángulo de inclinación y aspecto, acumulación suelo-agua, textura del suelo y fertilidad (Burton *et al.*, 2005; Dieleman *et al.*, 2000; Ruiz *et al.*, 2006 b). En este sentido, la heterogeneidad espacial de las poblaciones de *L. rigidum* presentes frecuentemente en terrenos ondulados está asociada probablemente a las interacciones diferenciales cultivo-maleza en

weed interactions in different landscape positions. In order to gain a population dynamics perspective to develop sustainable and integrated site-specific *L. rigidum* management programs, knowledge of the variability of the effect of the crop on the biomass and reproductive fitness of the weed is required.

The aim of this study was to determine the effect of barley on *L. rigidum* survival, biomass and seed production in different sites of the same field, as well as the consequences of field heterogeneity on crop-weed competition.

MATERIALS AND METHODS

Locations and experimental design

Experiments were conducted in commercial barley fields with dense *L. rigidum* populations located at Calaf and Moià in Catalonia, in the northeastern cereal growing region of Spain. Both fields had southern exposure and were irregularly shaped, with differences in elevation up to 10 m and an average slope of 10.5 %. Fields were managed with agronomic practices typical of the region. Seedbeds were prepared with one pass of harrow before planting at Calaf, while the Moià location was directly drilled. Fields were sown with winter barley cv. Dobra, at 180 kg seed ha⁻¹ with the farmer's own seeding equipment. At Calaf, a granular application of NPK at 33-49-49 kg ha⁻¹ was added annually before sowing. In addition, the upper part of this field was fertilized by the farmer with 25 t ha⁻¹ of organic manure prior to seedbed preparation. At Zadocks stages Z13-15, a liquid application of SN32 (urea-ammonium nitrate) at 90 kg N ha⁻¹ was added. At Moià, liquid manure was applied twice at Z13-15 and Z21-22 at the rate of 35 000 L ha⁻¹. Fields were sprayed with diclofop (Iloxan, 360 g ai L⁻¹, EC, Bayer Cropscience SL) and tribenuron (Granstar, 750 g ai L⁻¹, WG, DuPont Iberica SL) at the label-recommended rate of 2.5 L ha⁻¹ and 30 g ha⁻¹ for grass and broadleaf control. During herbicide application, experimental plots were covered with plastic to avoid any damage to the *L. rigidum* plants.

The irregular shape of the fields allowed identify three sites, upland, mid-slope and lowland, within each field and a trial was set up in each of them. According to the farmers, crop yields in these sites were different during the last years and differences were attributed to different soil composition and fertility. To characterize the sites, soils were analyzed at the beginning of the growing seasons for the 0 to 20 cm depth, and soil separates, nutrient content and organic matter were determined. Slope and orientation (degrees from north) were calculated for each site.

The experimental layout in each field was a split-plot design with site as the main plots (3.25 m × 2.25 m). Site had three

diferentes posiciones del paisaje. Con el fin de obtener una perspectiva en la dinámica de poblaciones para desarrollar prácticas sostenibles e integradas de manejo sitio-específico de *L. rigidum*, es necesario conocer la variabilidad del efecto del cultivo en la biomasa y en la capacidad reproductiva de la maleza.

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la cebada sobre la supervivencia, biomasa y producción de semillas de *L. rigidum* en distintos sitios de un mismo campo, así como las consecuencias de la heterogeneidad del campo en la competencia cultivo-maleza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicaciones y diseño experimental

Los experimentos se efectuaron en campos de cebada comercial con poblaciones densas de *L. rigidum* en Calaf y Molià en Cataluña, en la zona productora de cereales del noreste de España. Ambos campos estaban orientados hacia el sur y eran irregulares, con diferencias en la elevación de hasta 10 m y una inclinación media de 10.5 %. Los campos se manejaron con prácticas agronómicas típicas de la región. En Calaf los semilleros se prepararon con un pase de rastra antes de la siembra, mientras que en Moià la siembra se hizo directamente. Los campos se sembraron con cebada de invierno cv. Dobra, a 180 kg semilla ha⁻¹ con equipo de siembra propiedad del agricultor. En Calaf, se aplicó NPK granulado a 33-49-49 kg ha⁻¹ anualmente antes de la siembra. Asimismo, el agricultor fertilizó la parte superior del campo con 25 t ha⁻¹ de estiércol orgánico antes de preparar el semillero. Se aplicó una solución de SN32 (urea-nitrato de amonio) a 90 N ha⁻¹ en los estadios de Zadocks 13-15. En Moià se aplicó estiércol dos veces en Z13-15 y Z21-22 a dosis de 35 000 L ha⁻¹. Los campos se rociaron con diclofop (Iloxan, 360 g ai L⁻¹, EC, Bayer Cropscience SL) y tribenuron (Granstar, 750 g ai L⁻¹, WG, DuPont Iberica SL) a la dosis recomendada en la etiqueta, de 2.5 L ha⁻¹ y 30 g ha⁻¹, para el control de malezas y planifolias. Durante la aplicación de herbicidas, las parcelas experimentales se cubrieron con plástico para evitar daños en las plantas de *L. rigidum*.

La forma irregular de los campos permitió identificar los tres sitios, altiplano, laderas medias y tierras bajas, dentro de cada campo y se estableció un ensayo en cada uno. De acuerdo con los agricultores, los rendimientos de los cultivos en estos sitios fueron diferentes en los últimos años y las diferencias fueron atribuidas a la distinta composición y fertilidad del suelo. Para caracterizar los sitios, los suelos se analizaron al comienzo de las temporadas de cultivo a una profundidad de 0 a 20 cm, y se determinaron

levels (upland, mid-slope and lowland) and four replicates. Each plot was split in two ($3.25 \text{ m} \times 1.12 \text{ m}$), establishing a *L. rigidum* monoculture in one half (removing all the barley seedlings by hand as they emerged) and maintaining in the other half a mixed population of barley and *L. rigidum*. Positions of subplots were at random. Plots were placed perpendicularly to barley rows (15 cm between rows) and separated by 0.5 m wide borders, accounting for the variability of the site. Broad-leaved weeds that emerged in the plots were removed by hand.

Measurements

In order to monitor plant biomass accumulation, one sample ($0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$) was taken in each treatment plot at four crop stages: initial tillering (Z21), stem elongation (Z30), early boot stage (Z45) and crop maturity (Z92). In each sample, barley and *L. rigidum* densities were assessed and plants were clipped at the soil surface, dried at 60°C for 48 h and weighed. At the sampling times, four soil cores (20 cm deep by 4 cm wide) were collected from each site to determine soil moisture content gravimetrically. Seed production per plant was estimated at crop maturity, collecting 10 *L. rigidum* plants at random within each sample and counting the number of spikes and the number of seeds from 15 randomly chosen tillers of these plants. Seed rain (measured as seeds m^{-2}) was calculated multiplying seed production by the estimated density of weeds. Seed size was estimated by weighting 1000 grains selected at random from these plants. *L. rigidum* losses were assessed by relating the *L. rigidum* data estimated in monoculture plots with the data estimated in the mixed culture plots. *L. rigidum* survival in each site was assessed by marking 80 plants at random at the beginning of the season (20 in each plot) and recording their survival at crop maturity. Marked plants were located at one end of the plots to avoid being collected during the sampling times.

Statistics

L. rigidum data sets from the two fields were analyzed separately using analysis of variance. For each field, a model with two factors (crop and site) was used to compare the effect of barley on *L. rigidum*. Crop (monoculture and mixed culture) and site (upland, mid-slope and lowland) were considered fixed factors. Calculations were made using the GLM procedure (SAS version 8.2, SAS Institute, Cary, NC, USA) followed by Tukey's test ($p \leq 0.05$). Because data from several variables were not normally distributed, they were transformed prior to statistical analysis (Table 1). To test the differences in biomass accumulation of *L. rigidum* among sites during the growing season, separate analysis of variance were done for each sampling time with the GLM procedure, and Tukey's test ($p \leq 0.05$).

las fracciones del suelo, el contenido de nutrientes y la materia orgánica. Se calculó la inclinación y orientación (grados a partir del norte) de cada sitio.

Se usó un diseño de parcelas divididas donde el sitio fue la parcela principal ($3.25 \text{ m} \times 2.25 \text{ m}$). El sitio tenía tres niveles (altiplano, laderas medias y tierras bajas) y cuatro réplicas. Cada parcela se dividió en dos ($3.25 \text{ m} \times 1.12 \text{ m}$), estableciendo un monocultivo de *L. rigidum* en una mitad (removiendo todas las plántulas de cebada a mano cuando éstas emergían) y conservando una población mixta de cebada y *L. rigidum* en la otra. Las sub-parcelas se distribuyeron al azar. Las parcelas se colocaron en dirección perpendicular a las hileras de cebada (15 cm entre hileras) y se separaron con diques de 0.5 m, dependiendo de la variabilidad del sitio. Las malezas de hoja ancha que emergieron en las parcelas se sacaron a mano.

Mediciones

Para monitorizar la acumulación de biomasa de las plantas, se tomó una muestra ($0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$) en cada parcela tratamiento en cuatro estadios de cultivo: macollaje inicial (Z21), elongación del tallo (Z30), emergencia de la hoja bandera (Z45) y madurez (Z92). En cada muestra se evaluaron las densidades de cebada y *L. rigidum* cortando las plantas a ras del suelo, se secaron 48 h a 60°C 48 h y se pesaron. Durante el muestreo se recolectaron cuatro muestras de suelo (20 cm de hondo por 4 cm de ancho) de cada sitio para determinar el contenido de humedad del suelo gravimétricamente. La producción de semillas por planta se calculó en la madurez del cultivo, recolectando 10 plantas de *L. rigidum* al azar dentro de cada muestra y contando el número de espigas y el número de semillas de 15 retoños escogidos al azar de estas plantas. La lluvia de semillas (medida como semillas m^{-2}) se calculó multiplicando la producción de semillas por la densidad de malezas calculada. El tamaño de las semillas se evaluó pesando 1000 granos seleccionados al azar de estas plantas. Las pérdidas de *L. rigidum* se determinaron relacionando la información de datos de *L. rigidum* evaluada en las parcelas de monocultivo con datos determinados en las parcelas de cultivo mixto. La supervivencia de *L. rigidum* en cada sitio se evaluó marcando 80 plantas al azar al comienzo de la temporada (20 en cada parcela) y registrando su supervivencia en la madurez del cultivo. Las plantas marcadas se colocaron en los extremos de las parcelas para evitar que fueran recolectadas durante la etapa de muestreo.

Estadísticas

Los conjuntos de datos de *L. rigidum* de los dos campos se analizaron por separado mediante análisis de varianza. Para cada campo se usó un modelo con dos factores (cultivo y sitio) para comparar el efecto de la cebada en *L. rigidum*. El cultivo

Table 1. Data transformations in order to assume normal distribution of the population, heteroscedasticity and additivity. Variables not shown were not transformed.

Cuadro 1. Transformaciones de datos para obtener una distribución normal de la población, heterocedasticidad y aditividad. No se muestran las variables que no fueron transformadas.

Variables	Field	
	Calaf	Moià
<i>Lolium rigidum</i>		
Spikes (spikes plant ⁻¹)	$X' = \sqrt{X}$	$X' = \sqrt{X}$
Seeds (seeds m ⁻²)	-	$X' = \log(X)$
Biomass per plant (g pl ⁻¹)	$X' = \sqrt{X}$	$X' = \sqrt{X}$
Barley		
Biomass per unit area (g m ⁻²)	$X' = 1/X$	-

RESULTS AND DISCUSSION

Soil characteristics of the sites

Calaf

The upland site had significant higher N, P, organic matter and organic carbon contents than the mid-slope and lowland sites (Table 2). Clay content was also higher at the upland site than at the two other sites, leading to higher soil moisture content throughout the growing season (Figure 1). Rainfall during the growing season was 390 mm.

Moià

Concentration of P and K were significantly higher at the upland site than at the two other sites (Table 2). The values of the remaining soil variables were similar among sites, with a slightly (not significant) higher sand and organic C content at the upland site. In this location, no significant differences were found in soil moisture at the three sites throughout the growing season (Figure 1). Rainfall during the growing season was 620 mm.

(monocultivo y cultivo mixto) y el sitio (altiplano, laderas medias y tierras bajas) se consideraron como factores fijos. Los cálculos se realizaron mediante el procedimiento GLM (SAS versión 8.2, SAS Institute, Cary, NC, USA) seguido por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Dado que los datos de varias variables no presentaban una distribución normal, se transformaron antes de realizar el análisis estadístico (Cuadro 1). Para probar las diferencias en la acumulación de biomasa de *L. rigidum* entre sitios durante la temporada de cultivo, se hicieron análisis de varianza por separado para cada muestreo mediante el procedimiento GLM y la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de suelo de los sitios

Calaf

El altiplano tuvo contenidos de N, P, materia orgánica y carbón orgánico significativamente mayores que las laderas medias y las tierras bajas (Cuadro 2). El contenido de arcilla en el altiplano fue también mayor que en los otros dos sitios, lo que incrementó el contenido de humedad del suelo durante la temporada de cultivo (Figura 1). Las precipitaciones durante la temporada de cultivo fueron de 390 mm.

Moià

Las concentraciones de P y K fueron significativamente mayores en el altiplano que en los otros dos sitios (Cuadro 2). Los valores de las variables restantes fueron similares entre los sitios, con un contenido de arena y C orgánico ligeramente mayor (no significativo) en el altiplano. En este lugar no hubo diferencias significativas en la humedad del suelo en los tres sitios durante la temporada de cultivo (Figura 1). La precipitación durante la temporada de cultivo fue de 620 mm.

Densidad y supervivencia de la maleza

Las densidades de *L. rigidum* fueron muy elevadas (promedio de 2,480 plantas m⁻²). Según los agricultores, el control de *L. rigidum* se logró históricamente con herbicidas que tenían el mismo modo de acción (diclofop, tralkoxidim). Los tratamientos repetidos pueden haber ocasionado la aparición de genotipos resistentes a herbicidas en este lugar. Los sitios de laderas

Table 2. Soil and landscape variables analyzed and their means for each site of the field. Standard errors are shown in brackets. Cuadro 2. Variables de suelo y paisaje analizadas y sus medias para cada sitio del campo. Los errores estándar aparecen entre corchetes.

Properties	Field					
	Calaf			Moià		
	Upland	Mid-slope	Lowland	Upland	Mid-slope	Lowland
Sand (%)	18 (1.41) a	24 (2.72) a	24 (2.25) a	40 (0.50) a	29 (0.87) b	33 (3.35) ab
Silt (%)	37 (1.29) b	44 (0.96) a	40 (1.15) b	41 (0.50) b	45 (0.25) a	42 (1.08) b
Clay (%)	45 (0.58) a	33 (2.92) b	36 (1.44) b	20 (0.6) b	25 (1.0) ab	26 (3.0) a
Total N (%)	0.30 (0.03) a	0.18 (0.01) b	0.18 (0.01) b	0.38 (0.02) a	0.25 (0.02) ab	0.31 (0.06) b
P (mg 100g ⁻¹ P ₂ O ₅)	48 (3.25) a	16 (1.25) b	15 (0.66) c	112 (6.77) a	74 (2.02) ab	52 (20.9) b
K (mg 100g ⁻¹)	40 (9.99) a	25 (1.04) a	48 (11.40) a	67 (0.48) a	52 (1.74) b	55 (2.29) b
Organic C (%)	2.65 (0.21) a	1.68 (0.06) b	1.82 (0.04) b	3.41 (0.20) a	2.42 (0.17) a	2.96 (0.61) a
Organic matter (%)	4.56 (0.37) a	2.90 (0.11) b	3.14 (0.07) b	5.87 (0.34) a	4.16 (0.30) a	5.09 (1.04) a
Slope (%)	0.5	14.5	5.3	1.5	14.5	1.0
Orientation (degrees)	280	184	358	36	124	170

For each site, different letters in a row indicate differences between sites ($p \leq 0.05$). ♦ Para cada sitio, las letras en una fila indican diferencias entre los sitios ($p \leq 0.05$).

Orientation: degrees from North clockwise ♦ Orientación: en el sentido de las manecillas del reloj a partir del norte.

Weed density and survival

Calaf

Densities of *L. rigidum* were very high (average of 2,480 plants m⁻²). According to the farmers, *L. rigidum* control was accomplished historically with herbicides that had the same mode of action (diclofop, tralkoxidim). Repeated treatments may have resulted in the appearance of herbicide resistant-genotypes in this location. The mid-slope and lowland sites had

medias y tierras bajas tuvieron densidades de maleza tres veces mayores (promedio 3744 y 2632 plantas m⁻²) que el altiplano (promedio 1066 plantas m⁻²). Este hecho estuvo relacionado posiblemente con el escurrimiento de agua de las semillas de la parte más alta del campo (Figura 2). La supervivencia de *L. rigidum* registrada al final de la temporada fue más de 85 % en todas las parcelas, salvo en el altiplano en cultivo mixto, donde la supervivencia fue significativamente menor (28 %; Figura 3). La biomasa de la cebada fue significativamente mayor en este sitio

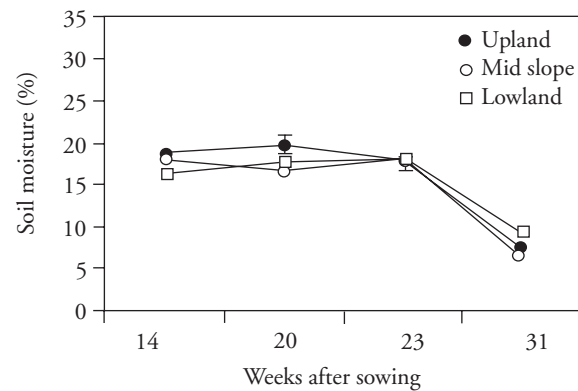
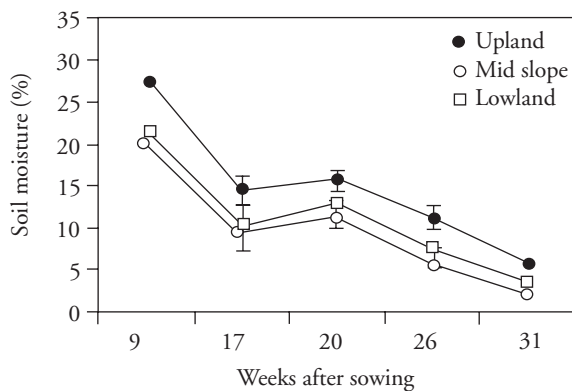


Figure 1. Soil moisture content during the growing season in the upland, mid-slope and lowland sites of Calaf (left) and Moià (right). Mean values in each site (n=4). Error bars represent standard error of the mean.

Figura 1. Contenido de humedad del suelo durante la temporada de cultivo en el altiplano, laderas medias y tierras bajas de Calaf (A) y Moià (B). Valores medios en cada sitio (n=4). Las barras de error representan el error estándar de la media.

three times higher weed densities (average 3744 and 2632 plants m^{-2}) than the upland site (average 1066 plants m^{-2}). This fact was possibly related to the water runoff of the seeds from the uppermost area of the field (Figure 2). *L. rigidum* survival recorded at the end of the season was above 85 % in all plots except at the upland site in mixed culture, where survival was significantly lower (28 %; Figure 3). A significantly higher barley biomass was observed in this site (Figure 4), which also showed the highest nitrogen content (Table 2).

(Figura 4), donde se registró también el mayor contenido de nitrógeno (Cuadro 2).

Moià

Las densidades promedio de *L. rigidum* fueron 407 plantas m^{-2} , con valores que variaron desde 206 plantas m^{-2} en las laderas medias hasta 593 plantas m^{-2} en el altiplano (Figura 2), sin diferencias estadísticamente significativas. Según los agricultores, las prácticas agronómicas como la rotación de cultivos

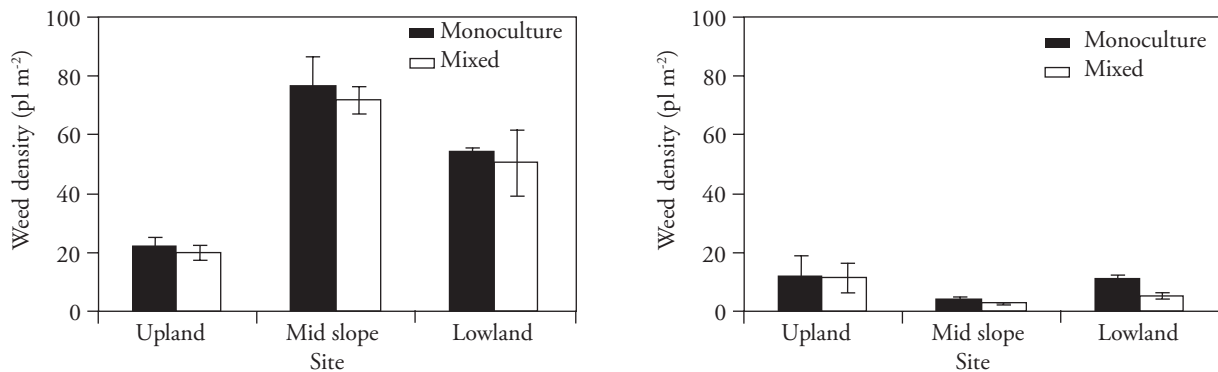


Figure 2. *Lolium rigidum* density in upland, mid-slope and lowland sites in monoculture and mixed culture (*L. rigidum*+barley) at Calaf (left) and Moià (right). Bars show mean value in each site (n=4). Error bars represent standard error of the mean.

Figura 2. Densidad de *Lolium rigidum* en altiplano, laderas medias y tierras bajas en monocultivo y cultivo mixto (*L. rigidum*+cebada) en Calaf (A) y Moià (B). Las barras muestran el valor medio en cada sitio (n=4). Las barras de error representan el error estándar de la media.

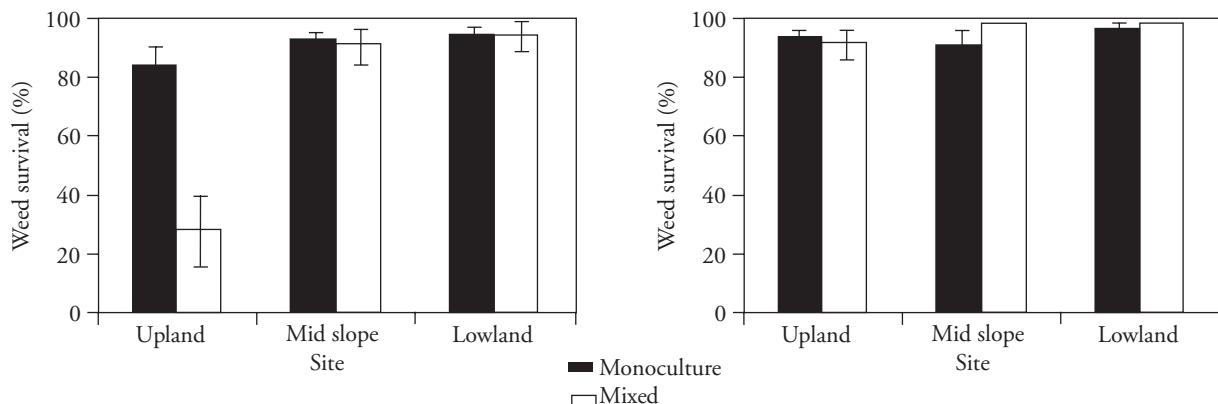


Figure 3. *Lolium rigidum* survival in the upland, mid-slope and lowland sites in monoculture and mixed culture (*L. rigidum*+barley) at Calaf (left) and Moià (right). Bars show mean value in each site (n=4). Error bars represent standard error of the mean.

Figura 3. Supervivencia de *Lolium rigidum* en altiplano, laderas medias y tierras bajas en monocultivo y cultivo mixto (*L. rigidum*+cebada) en Calaf (A) y Moià (B). Las barras muestran el valor medio en cada sitio (n=4). Las barras de error representan el error estándar de la media.

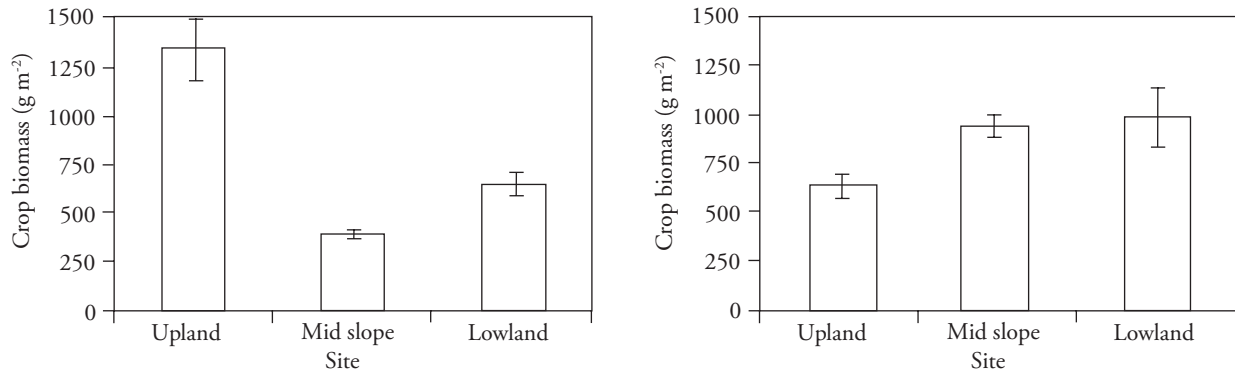


Figure 4. Barley biomass at the end of the season in the upland, mid-slope and lowland sites at Calaf (left) and Moia (right). Bars show mean value in each site (n=4). Error bars represent standard error of the mean.

Figura 4. Biomasa de la cebada al final de la temporada en altiplano, laderas medias y tierras bajas en Calaf (A) y Moia. Las barras muestran el valor medio en cada sitio (n=4). Las barras de error representan el error estándar de la media.

Moia

Average densities of *L. rigidum* were 407 plants m⁻², with values ranging from 206 plants m⁻² at the mid-slope site to 593 plants m⁻² at the upland site (Figure 2), with not statistically significant differences. According to the farmers, agronomic practices such as crop and herbicide rotations and no tillage were regularly carried out and may have contributed to maintain lower levels of *L. rigidum* populations. *L. rigidum* survival at the end of the season was greater than 90 % in all plots, with no significant differences among sites (Figure 3).

Weed biomass and reproduction

Calaf

In monoculture, the biomass accumulation of *L. rigidum* was similar in the three sites up to stem elongation (20 weeks after sowing). From this on, weed biomass in the upland site increased faster and, at the end of the season, it was almost four times higher than in the other sites (Figure 5A). *L. rigidum* spike production was close to 1.5 spikes per plant in all sites, with or without crop (Figure 6A). The number of seeds per spike was higher in the upland site (Figure 6B), but seed rain was 40 to 50 % lower than at the two other sites (Figure 6C). Apparently, the lower plant densities in the upland site compensated for the greater seed production of each individual plant.

y herbicidas y la no-labranza, se realizaban regularmente y pueden haber contribuido a mantener niveles más bajos en las poblaciones de *L. rigidum*. La supervivencia de *L. rigidum* al final de la temporada fue más de 90 % en todas las parcelas, sin diferencias significativas entre los sitios (Figura 3).

Biomasa y reproducción de las malezas

Calaf

En el monocultivo, la acumulación de biomasa de *L. rigidum* fue similar en los tres sitios hasta la fase de elongación del tallo (20 semanas después de la siembra). De ahí en adelante, la biomasa de las malezas aumentó con mayor rapidez en el altiplano y, al final de la temporada, fue cuatro veces mayor que en los otros dos sitios (Figura 5A). La producción de espigas de *L. rigidum* fue cerca de 1.5 espigas por planta en todos los sitios, con o sin cultivo (Figura 6A). El número de semillas por espiga fue mayor en el altiplano (Figura 6B), pero la lluvia de semillas fue 40 a 50 % menor que en los otros dos sitios (Figura 6C). Aparentemente, las menores densidades de plantas en el altiplano se compensaron con la mayor producción de semillas de cada planta.

En el cultivo mixto, la acumulación de biomasa de *L. rigidum* y la biomasa final de la planta fueron similares en los tres sitios (Figura 5B). El significativo

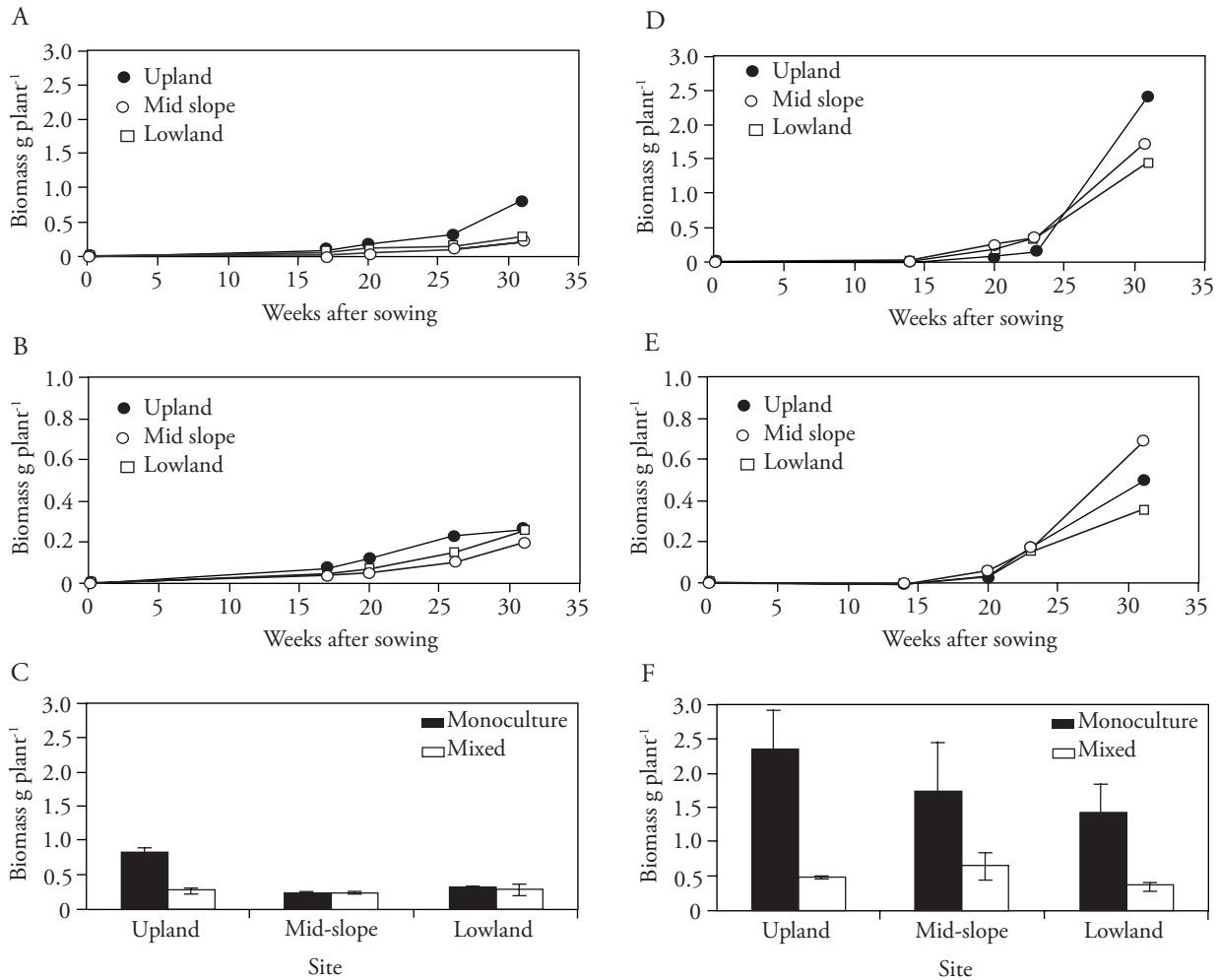


Figure 5. *Lolium rigidum* biomass accumulation per plant at Calaf (A: monoculture; B: mixed culture) and Moia (D: monoculture, E: mixed culture) and final biomass per plant at Calaf (C) and Moia (F) in the upland, mid-slope and lowland sites. Mean values in each site (n=4). Error bars represent standard error of the mean. Monoculture: *L. rigidum*. Mixed culture: *L. rigidum*+barley.

Figura 5. Acumulación de biomasa por planta de *L. rigidum* en Calaf (A: monocultivo, B: cultivo mixto) y Moia (D: monocultivo; E: cultivo mixto) y biomasa final por planta en Calaf (C), y Moia (F) en altiplano, laderas medias y tierras bajas. Valores medios en cada sitio (n=4). Las barras de error representan el error estándar de la media. Monocultivo: *L. rigidum*. Cultivo mixto: *L. rigidum*+cebada.

In mixed culture, *L. rigidum* biomass accumulation and final plant biomass were similar at the three sites (Figure 5B). Significant competitive effect of barley could be observed from stem elongation in the upland site leading a *L. rigidum* biomass reduction per plant at the end of the season of 68 %. No differences were found in plant biomass between monoculture and mixed culture in the other sites (Figure 5C). Additionally, in the upland site the presence of barley significantly reduced (42 %) the number of seeds per spike (Figure 6B). *L. rigidum* seed size was neither affected by position nor presence of the crop (data not shown).

efecto competitivo de la cebada puede observarse desde la elongación del tallo en el altiplano, ocasionando una reducción de 68 % de la biomasa por planta de *L. rigidum*, al final de la temporada. No hubo diferencias en la biomasa de la planta entre monocultivo y cultivo mixto en los otros sitios (Figura 5C). Adicionalmente, en el altiplano la presencia de cebada redujo significativamente (42 %) el número de semillas por espiga (Figura 6B). El tamaño de la semilla de *L. rigidum* no fue afectado ni por la posición ni por la presencia del cultivo (no se muestran los datos).

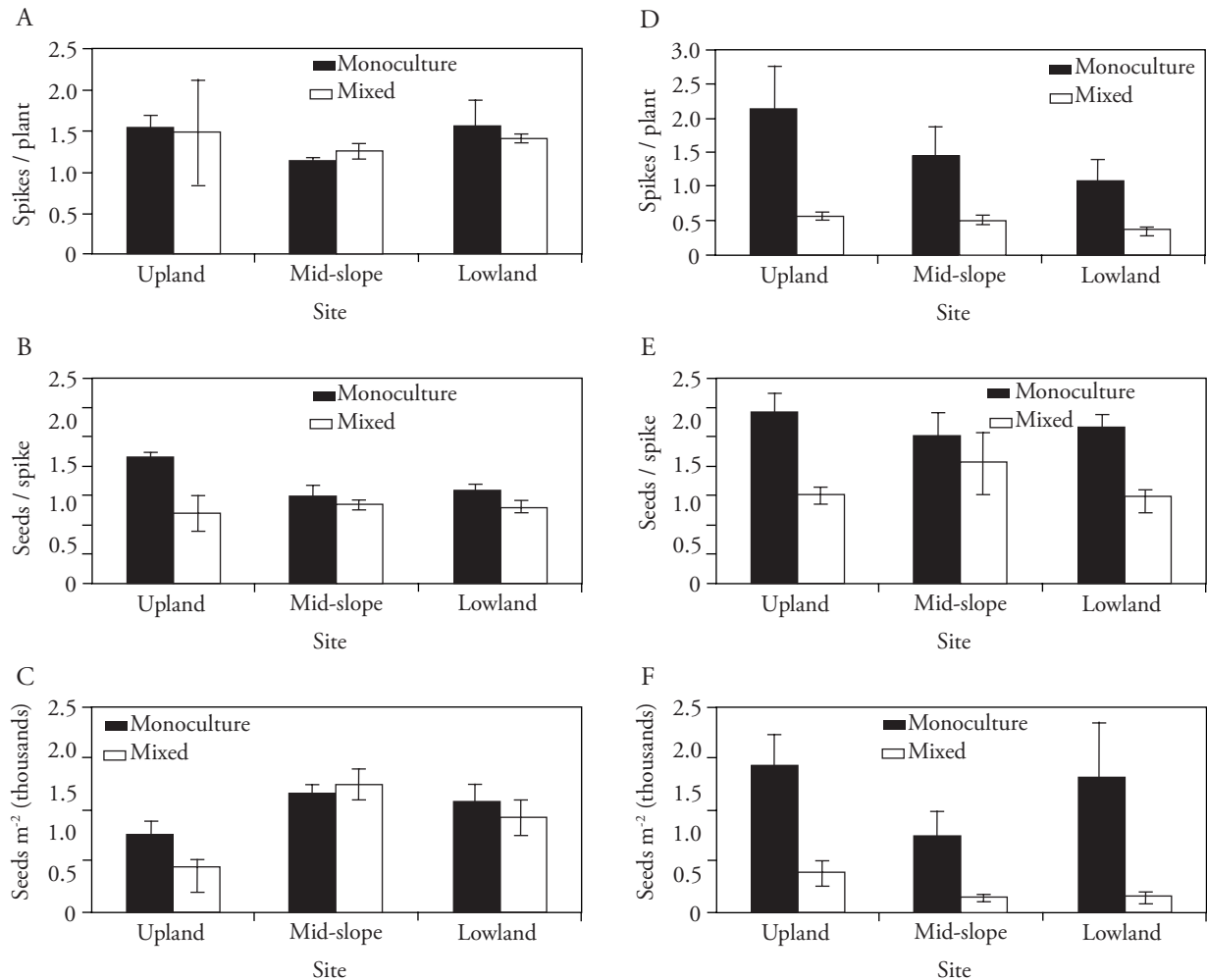


Figure 6. *Lolium rigidum* spikes per plant, seeds per spike, and seed rain in the upland, mid-slope and lowland sites in monoculture and mixed culture (*L. rigidum*+barley) at Calaf (A, B, C) and Moia (D, E, F). Bars show mean value in each site (n=4). Error bars represent standard error of the mean.

Figura 6. Espigas por planta de *Lolium rigidum*, semillas por espiga, y lluvia de semillas en altiplano, laderas medias y tierras bajas en monocultivo y cultivo mixto (*L. rigidum*+cebada) en Calaf (A, B, C) y Moia (D, E, F). Las barras muestran el valor medio en cada sitio (n=4). Las barras de error representan el error estándar de la media.

Moia

No significant differences among sites were detected on biomass accumulation of individual plants growing in monoculture or in mixed culture (Figure 5D and E). Significant and similar competitive effect of barley was observed in mixed culture in all sites from stem elongation. At the end of the season, *L. rigidum* biomass per plant was reduced 79 % at the upland, 74 % at the lowland and 61 % at the mid-slope sites (Figure 5F). Significant and similar reductions in the numbers of spikes per plant (64-73 %), seeds per spike (44-48 %) and seed rain (74-89 %) of *L. rigidum* in the three sites were observed in presence

Moia

No se detectaron diferencias significativas entre sitios en la acumulación de biomasa de las plantas individuales cultivadas en monocultivo y en cultivo mixto (Figura 5D y E). El efecto competitivo de la cebada fue significativo y similar en el cultivo mixto en todos los sitios desde la fase de elongación del tallo. Al final de la temporada, la biomasa por planta de *L. rigidum* disminuyó 79 % en el altiplano, 74 % en las tierras bajas y 61% en las laderas medias (Figura 5F). Con la presencia de cebada, en los tres sitios se observaron disminuciones significativas y similares en el número de espigas por planta (64-73 %), semillas

of barley (Figure 6D, E and F). Seed size was neither affected by position nor presence of the crop (data not shown).

The competitive effect of barley on *L. rigidum* was observed in both fields. Crop presence significantly reduced weed biomass and seeds per spike in Calaf and, additionally, number of spikes in Moià. This effect was not significantly different among sites in Moià, but varied among sites in Calaf. In this location, crop competitiveness was significantly lower in the mid-land and lowland site, where nitrogen and phosphorus content were significantly lower (0.18 % in both sites versus 0.30 % in the upland site). Apparently, the competitive effect of barley on *L. rigidum* growth and reproduction was more important in the more fertile areas. Similar results were reported by Ruiz *et al.* (2008) studying the competitiveness of barley on *Avena sterilis*. The increased growth and seed production of that weed in the more fertile areas was counterbalanced by the increased suppressive effect of the crop. Izquierdo *et al.* (2003) also reported that barley showed greater competitiveness against *L. rigidum* in environments with not limiting water supply. Barley is considered a crop with a high potential to suppress *L. rigidum* populations due to its great efficiency in nitrogen uptake (González-Ponce, 1998), great initial growth rate (Cousens, 1996) and more extended canopy. However, the effect of barley on *L. rigidum* survival was limited, indicating that once weed seedlings are established they are likely to complete their development.

No evidence of relationship between the topographic position (orientation and slope) and the competitive relationship between barley and *L. rigidum* can be suggested from our results. In the Mediterranean areas, light is not considered a limiting factor. Consequently, topographic factors such as orientation, slope and position within a field are not as important for the growth of crops as other factors (soil moisture or nutrient content of the soil). However, the little importance of the topographic location of the site *per se* can not be generalized. As pointed out by Wright *et al.* (1990), steep slope sites tend to have lower soil fertility due to nutrient runoff and erosion processes that alter the distribution of soil chemical and physical properties. Under such conditions, competitiveness of the crop will be diminished.

por espiga (44-48 %) y lluvia de semillas (74-89 %) (Figura 6D, E y F). El tamaño de la semilla no fue afectado por la posición ni por la presencia del cultivo (no se muestran los datos).

El efecto competitivo de la cebada en *L. rigidum* fue observado en ambos campos. La presencia del cultivo redujo significativamente la biomasa de las malezas y el número de semillas por espiga en Calaf y, adicionalmente, el número de espigas en Moià. Este efecto no fue significativamente diferente entre los sitios en Moià, pero varió entre los sitios en Calaf. En este último, la competitividad del cultivo fue significativamente menor en las laderas medias y en las tierras bajas, donde los contenidos de nitrógeno y fósforo fueron significativamente menores (0.18 % en ambos sitios versus 0.30 % en el altiplano). Apparently, el efecto competitivo de la cebada en el crecimiento y la reproducción de *L. rigidum* fue mayor en las regiones más fértiles. Ruiz *et al.* (2008) reportaron resultados similares al evaluar la competitividad de la cebada en *Avena sterilis*. El aumento en el crecimiento y en la producción de semillas de esa maleza en las regiones más fértiles se compensó con un mayor efecto supresivo del cultivo. Izquierdo *et al.* (2003) también reportaron que la cebada mostró mayor competitividad frente a *L. rigidum* en ambientes sin problemas de suministro de agua. La cebada es considerada como un cultivo con alto potencial para contener las poblaciones de *L. rigidum* por su gran eficiencia en la absorción de nitrógeno (González-Ponce, 1998), alta tasa de crecimiento inicial (Cousens, 1996) y follaje más extenso. Sin embargo, el efecto de la cebada en la supervivencia de *L. rigidum* fue limitado lo que indica que, una vez establecidas, las plántulas de las malezas muy probablemente terminan por desarrollarse.

Los resultados del presente estudio no dan evidencia que pueda sugerir una relación entre la posición topográfica (orientación e inclinación) y la relación competitiva entre cebada y *L. rigidum*. En las regiones del Mediterráneo la luz no se considera un factor limitante. Por tanto, los factores topográficos como la orientación, inclinación y posición dentro de un campo no son tan importantes para el desarrollo de los cultivos como otros factores (la humedad del suelo o el contenido de nutrientes del suelo). Sin embargo, la poca importancia de la ubicación topográfica del sitio *per se* no puede generalizarse. Como lo señala Wright *et al.* (1990), los sitios con pendientes

Increasing crop competitiveness can be a useful technique for weed management in organic or low input farming systems (prevalent in the Mediterranean area) or when herbicide resistance develops in weeds. Increased crop competitiveness can be achieved by either using adequate seeding rates (Medd *et al.*, 1985; Lemerle *et al.*, 2004) or adequate fertiliser application. Current weed management approaches focus more on the long-term reduction of the weed seed bank obtained by interfering with the reproduction of the weed than on the alleviation of the competition with the crop obtained by eliminating individuals (Jones and Medd, 2005). Reducing seed return will help to prevent weed spread and reduce weed populations. Crop husbandry practices addressed site-specifically in order to account for the spatial variability of the soil and leading to enhance crop competition, will improve *L. rigidum* control and possibly substitute, at least in part, for herbicides.

The main drivers of *L. rigidum* success in the two fields studied were weed density and crop competition. Emerged seedling populations are consequence of the seed bank present in the soil and the weather conditions during the germination period. Historical crop and weed management of the field are likely to regulate the seed bank size because agronomic practices determine weed seedling survival, plant fecundity and seed dispersal. Any mismanagement that results in increased *L. rigidum* seed production will result in a rapid increase in population size.

Further studies should be carried out in order to confirm and quantify the relationship between soil fertility and barley competitiveness and the influence of environmental conditions (such as water availability) on barley - *L. rigidum* interactions. Our study is restricted to the description of the consequences of field heterogeneity on crop-weed competition. The recognition of this variability is a pre-requisite for site-specific weed management practices leading to a better control of this weed.

CONCLUSIONS

The competitive effect of barley on *L. rigidum* survival, biomass and seed production was not uniform within a field. Greater competitive effect of the crop was observed in sites with higher nitrogen, phosphorus and organic matter content. In these sites,

pronunciadas tienden a ser menos fértiles debido a la escorrentía de nutrientes y a procesos de erosión que alteran la distribución de las propiedades químicas y físicas del suelo. En tales condiciones, la competitividad del cultivo se reducirá.

El incremento de la competitividad del cultivo puede ser una técnica útil para el manejo de malezas en sistemas de cultivo orgánicos o de baja inversión (prevalentes en la región del Mediterráneo) o cuando las malezas desarrollan resistencia a los herbicidas. El incremento en la competitividad del cultivo puede lograrse ya sea si se utilizan densidades de siembra adecuadas (Medd *et al.*, 1985; Lemerle *et al.*, 2004) o aplicaciones apropiadas de fertilizante. Los actuales enfoques para el manejo de las malezas se centran más en la disminución a largo plazo del banco de semillas de las malezas que se obtiene al interferir con la reproducción de las malezas, que en atenuar la competencia con el cultivo obtenido al eliminar individuos (Jones y Medd, 2005). Reducir el rendimiento de semillas ayudará a prevenir la propagación de las malezas y a disminuir sus poblaciones. Las prácticas agrícolas de manejo sitio-específico orientadas a explicar la variabilidad espacial del suelo y que incrementan la competencia del cultivo, mejorarán el control de *L. rigidum* y sustituirán, posiblemente, al menos en parte, a los herbicidas.

Los principales factores del éxito de *L. rigidum* en los dos campos estudiados fueron la densidad de las malezas y la competencia del cultivo. Las poblaciones de plántulas emergidas son consecuencia del banco de semillas presente en el suelo y de las condiciones climáticas durante el periodo de germinación. El cultivo histórico y el manejo de las malezas en el campo regulan probablemente el tamaño del banco de semillas porque las prácticas agronómicas determinan la supervivencia de las plántulas de las malezas, la fecundidad de las plantas y la dispersión de las semillas. Todo mal manejo que lleve a un incremento de la producción de semillas de *L. rigidum* resultará en un rápido aumento del tamaño de la población.

Deberán realizarse más estudios para confirmar y cuantificar la relación entre fertilidad del suelo y competitividad de la cebada y la influencia de las condiciones ambientales (como disponibilidad del agua) en las interacciones cebada-*L. rigidum*. El presente estudio se limita a la descripción de las consecuencias de la heterogeneidad del campo en la competencia cultivo-malezas. El reconocimiento de

L. rigidum plant survival, final biomass and number of seeds per spike were reduced up to 67 %, 79 % and 48 %. However, weed density determined the final seed rain in each site. Crop husbandry practices should be addressed site-specifically in order to enhance crop competitiveness throughout the field, as a mechanism to reduce *L. rigidum* populations over the long term.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are very grateful to Dr. Mortensen and the Weed Science Lab at the Pennsylvania State University for their valuable help and comments on the manuscript. The present research was funded by the Spanish Commission for Science and Technology (project AGL2002-04468-C03-03).

LITERATURE CITED

- Blanco-Moreno, J. M., L. Chamorro, R. M. Masalles, J. Recasens, and F. X. Sans. 2004. Spatial distribution of *Lolium rigidum* seedlings following seed dispersal by combine harvesters. *Weed Res.* 44: 375-387.
- Burton, M. G., D. A. Mortensen, and D. B. Marx. 2005. Environmental characteristics affecting *Helianthus annuus* distribution in a maize production system. *Agric. Ecosystems and Environ.* 111: 30-40.
- Cousens, R. 1996. Comparative growth of wheat, barley and annual ryegrass (*Lolium rigidum*) in monoculture and mixture. *Austr. J. Agric. Res.* 47: 449-464.
- Dieleman, J. A., D. A. Mortensen, D. D. Buhler, C. A. Cambardella, and T. B. Moorman. 2000. Identifying associations among site properties and weed species abundance. I. Multivariate analysis. *Weed Sci.* 48: 567-575.
- Gill, G.S. 1996. Ecology of annual ryegrass. *Plant Protection Quart.* 11: 195-198.
- González-Ponce, R. 1998. Competition between barley and *Lolium rigidum* for nitrate. *Weed Res.* 38: 453-460.
- Heap, I. 2008. The International Survey of Herbicide Resistant Weeds [on line]. Available in <http://weedsociety.com> [12 May, 2008].
- Izquierdo, J., J. Recasens, C. Fernández-Quintanilla, and G. Gill. 2003. Effects of crop and weed densities on the interactions between barley and *Lolium rigidum* in several Mediterranean locations. *Agronomie* 23: 529-536.
- Jones, R. E., and R. W. Medd. 2005. Methodology for evaluating risk and efficacy of weed management technologies. *Weed Sci.* 53: 505-514.
- Lemerle, D., R. D. Cousens, G. S. Gill, and S. J. Peltzer. 2004. Reliability of higher seeding rates of wheat for increased competitiveness with weeds in low rainfall environments. *J. Agric. Sci.* 142: 395-409.
- Medd, R. W., B. A. Auld, D. R. Kemp, and R. D. Murison. 1985. The influence of wheat density and spatial arrangement on annual ryegrass, *Lolium rigidum* Gaudin, competition. *Austr. J. Agric. Res.* 36: 361-371.
- esta variabilidad es un pre-requisito para prácticas de manejo sitio-específico de *L. rigidum* encaminadas a un mejor control de esta maleza.

CONCLUSIONES

El efecto competitivo de la cebada en la supervivencia, biomasa y producción de semillas de *L. rigidum* no fue uniforme dentro de un campo. Se observó un mayor efecto competitivo del cultivo en las áreas con mayor contenido de nitrógeno, fósforo y materia orgánica. En estas áreas, la supervivencia de plantas, biomasa final y número de semillas por espiga de *L. rigidum* se redujo hasta 67 %, 79 % y 48 %. Sin embargo, la densidad de las malezas determinó la lluvia final de semillas en cada área. El manejo agronómico del cultivo debe efectuarse de forma sitio-específico para mejorar la competitividad del cultivo en todo el campo, como mecanismo para reducir las poblaciones de *L. rigidum* a largo plazo.

—Fin de la versión en Español—



- Nordmeyer, H., and A. Häusler. 2004. Impact of soil properties on weed distribution within agricultural fields. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 328-336.
- Recasens, J., F. Riba, J. Izquierdo, R. Forn, and A. Taberner. 1996. Grass weeds growing in winter cereals of Catalonia. *ITEA: Producción Vegetal* 2: 116-130.
- Ruiz, D., C. Escibano, and C. Fernández-Quintanilla. 2006a. Assessing the opportunity for site-specific management of *Avena sterilis* in winter barley fields in Spain. *Weed Res.* 46: 379-387.
- Ruiz, D., C. Escibano, and C. Fernández-Quintanilla. 2006b. Identifying associations among sterile oat (*Avena sterilis*) infestation level, landscape characteristics, and crop yields. *Weed Sci.* 54: 1113-1121.
- Ruiz, D., J. Barroso, P. Hernaiz, and C. Fernández-Quintanilla. 2008. The competitive interactions between winter barley and *Avena sterilis* L. are site-specific. *Weed Res.* 48: 38-47.
- Shafii, B., W. J. Price, T. S. Prather, L. W. Lass, and D. C. Thill. 2003. Predicting the likelihood of yellow starthistle (*Centaurea solstitialis*) occurrence using landscape characteristics. *Weed Sci.* 51: 748-751.
- Walter, A. M., S. Christensen, and S. E. Simmelsgard. 2002. Spatial correlation between weed species densities and soil properties. *Weed Res.* 42: 26-38.
- Wright, R. J., D. G. Boyer, W. N. Winant, and H. D. Perry. 1990. The influence of soil factors on yield differences among landscape positions in an Appalachian cornfield. *Soil Sci.* 149: 375-382.