

Investigación y cooperación al desarrollo para la conservación del suelo en cultivos de maíz de Guatemala y Nicaragua

Rafael Blanco Sepúlveda¹, Francisco J. Lima Cueto², Francisco Enríquez Narváez³ y Amilcar Aguilar Carrillo⁴

^{1,2}Departamento de Geografía, Universidad de Málaga (España), ³World Renew (Canadá, delegación de Guatemala), ⁴Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Costa Rica)

¹rblanco@uma.es, ²lima@uma.es, ³fenriquez@worldrenew.net, ⁴aaguilar@catie.ac.cr

Resumen

La conservación del suelo es una prioridad a escala global, particularmente, en las montañas cultivadas de latitudes tropicales, donde la erosión hídrica a consecuencia de la actividad agrícola es uno de los principales impactos. La agricultura de conservación, basada en la no/mínima perturbación del suelo y la cobertura vegetal, se utiliza para controlar la erosión. El objetivo de este trabajo fue analizar la influencia de las 2 medidas citadas en cultivos de maíz de Guatemala y Nicaragua, con la finalidad de establecer las medidas de control de la erosión adaptadas a las zonas de estudio. Los resultados obtenidos mostraron que la cobertura de residuos vegetales ($r = -0,86$, $P < 0,001$) y la perturbación del suelo ($r = 0,57$, $P < 0,001$) fueron, por ese orden, los factores con mayor influencia sobre la erosión, a partir de los cuales se han establecido las medidas de control de la erosión.

Palabras clave: Erosión hídrica, control de la erosión, agricultura de conservación, cobertura del suelo de residuos vegetales.

Abstract

Investigation and development cooperation to soil conservation in maize cultivation of Guatemala.

Soil conservation is a priority at a global scale, particularly in cultivated mountains at tropical latitudes, where water erosion, as a result of agricultural activity, is one of the main impact environmental. Conservation agriculture, based on no/minimal soil and vegetation cover disturbance, is the agricultural management system that is usually applied to control erosion. The objective of this work was to analyze the influence of the two measures mentioned above on erosion in maize cultivation at Guatemala and Nicaragua, in order to establish erosion control measures adapted to the study areas. The results obtained showed that litter cover ($r = -0.86$, $P < 0.001$) and soil disturbance ($r = 0.57$, $P < 0.001$) were, in that order, the factors with the greatest influence on water erosion, from which erosion control measures have been established.

Keywords: Water erosion, erosion control, conservation agriculture, litter cover.

1 Introducción

La conservación del suelo ha sido considerada una prioridad a escala global, debido a que es un factor medioambiental clave por sus importantes funciones ecosistémicas. Proporciona el soporte físico y los elementos nutricionales esenciales para la vida de las plantas, regula el ciclo del agua, constituye el hábitat de una importante riqueza faunística, responsable de importantes funciones y procesos que tienen lugar en el suelo y constituye uno de los sumideros de carbono orgánico más importantes para luchar contra el cambio climático (Adhikari y Hartemink, 2016). La FAO (2017), en el marco del Global Soil Partnership (GSP), reconoció que la erosión acelerada por causas antrópicas es uno de los principales problemas del suelo en el conjunto del planeta. Ha destacado, secularmente, la erosión inducida por la actividad agrícola (Montgomery, 2007), siendo actualmente las montañas cultivadas de latitudes tropicales donde la erosión es más elevada a nivel global (FAO-ITPS, 2015; Labrière et al., 2015).

La superficie y la intensificación de la actividad agraria en Guatemala ha crecido significativamente en las últimas décadas. El aumento de la superficie cultivada se ha producido a expensas de la superficie forestal. Según las estadísticas de la FAO (2024), se ha perdido en las últimas 3 décadas (1991-2019) en Guatemala y Nicaragua (comparativamente con Centroamérica: CA) el 25,09 y el 44,33% (10% en CA) de la superficie forestal, a una tasa anual del -1,03% y -2,07% (-0,37% en CA), lo que ha supuesto una pérdida de 1,18 y 2,79 millones de ha (9,79 en CA). El cultivo de maíz ha sido uno de los protagonistas. La superficie cultivada creció en las últimas 6 décadas (1961-2020) en Guatemala y Nicaragua un 39,25% y un 80,96% (18,25% en CA) a una tasa anual del 0,56% y 1,01% (0,28% en CA). Por su parte, la productividad creció un 164,76% y un 46,28% (256,41% en CA) a una tasa anual del 1,66% y 0,65% (2,18% en CA).

Estas circunstancias han provocado que el control de la erosión del suelo sea una prioridad en las políticas institucionales sobre manejo sostenible de suelos a nivel global (FAO, 2017). Las respuestas de la comunidad científica en materia de control de la erosión de los suelos por uso agrícola se dirigen habitualmente hacia la agricultura de conservación (AC). Este sistema de manejo agrícola se basa en dos medidas fundamentales: (1) no/mínima perturbación mecánica del suelo, y (2) cobertura vegetal superficial y permanente.

La extensa literatura científica que ha analizado la influencia del manejo agrícola del suelo y la cubierta vegetal sobre la erosión, ha llegado a la conclusión de que estos factores son claves para el control de este proceso de degradación. Sin embargo, éstas no son las únicas variables a tener en cuenta. El estudio de revisión de Mhazo et al. (2016) indicó que las diferencias de erosión observadas entre la agricultura con laboreo convencional (LC) y no laboreo (NL) eran más reducidas en las latitudes tropicales que en las templadas, a consecuencia del efecto favorable sobre la estabilidad estructural que tuvo el mayor contenido en arcillas de los suelos estudiados en latitudes bajas. La revisión de Sun et al. (2015) también llegó a la misma conclusión comparando las diferencias de escorrentía superficial entre NL y laboreo reducido (LR) en suelos con diferente textura y cubierta vegetal. El aumento del contenido de arcillas en los suelos redujo las diferencias de escorrentía entre ambos sistemas. A su vez, disminuyó la escorrentía significativamente en los suelos con NL, cuando se mantuvieron los residuos de los cultivos sobre la superficie del suelo, y se redujeron las diferencias entre NL y LR cuando se eliminaron los residuos vegetales superficiales. El trabajo de revisión concluyó con dos ideas claves: (1) la diferente efectividad que muestra NL es debida a la influencia de ciertas covariables, como las indicadas, y (2) la aplicación de NL debe ser más flexible y específica para cada zona de estudio, para lo que es necesario tener en cuenta las diferentes condiciones ambientales y en las prácticas de gestión.

El conocimiento actual sobre la influencia de las medidas de la AC sobre el control de la erosión lo refleja muy bien Poesen (2018), cuando indicó que la eficacia de las técnicas y estrategias de control de la erosión que se han aplicado en todo el mundo no siempre está debidamente documentada. El análisis de la efectividad de las medidas de control de la erosión es vital para el uso sostenible de los suelos. Este interés no se ciñe tan sólo a la comunidad científica, sino que también lo es y muy especialmente, para los productores agrícolas. En el campo de la transferencia de resultados en cooperación al desarrollo, debemos partir del hecho de que las medidas de control de la erosión no tienen carácter universal. No se pueden extrapolar de un lugar a otro, argumentando simplemente que han sido efectivas en determinados espacios y condiciones. Es necesario, en todos los casos, adaptar las medidas al escenario donde se pretende aplicar. Conocer cuáles son los factores o la combinatoria de factores más importantes para controlar la erosión, así como las preferencias de los productores, son aspectos claves en la toma de decisiones de los proyectos aplicados, que persiguen reducir este proceso de degradación del suelo y que las acciones tomadas sean perdurables en el tiempo.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, las investigaciones que hemos desarrollado en Guatemala y Nicaragua en materia de control de la erosión en cultivos de maíz, ha seguido un plan de actuaciones con dos fases de trabajo, una de investigación y otra de transferencia. Centrándonos en la fase de investigación, objeto de este trabajo, se desarrollaron 4 líneas de investigación en las que se abordaron la evaluación de la erosión y sus causas, para establecer las medidas de control de la erosión adaptadas a las zonas de estudio. Finalmente, las medidas establecidas se evaluaron en parcelas experimentales, para analizar su respuesta en el contexto particular de las áreas donde se pretenden aplicar, lo que constituye la base sobre la que se ha sustentado la fase de trabajo de transferencia de resultados. Los objetivos concretos de este trabajo han sido: (1) analizar la influencia de los sistemas de manejo del suelo (LC, LR y NL) y la cobertura vegetal (plantas arvenses y residuos vegetales) sobre la superficie afectada por erosión hídrica en cultivos de maíz de las montañas de Guatemala (resultados de la fase de investigación en las parcelas experimentales), y (2) establecer las medidas de control de la erosión adaptadas a las particulares características de la zona de estudio (resultados del conjunto de la fase de investigación en Guatemala y Nicaragua).

2 Materiales y métodos

2.1 Características de la zona de estudio

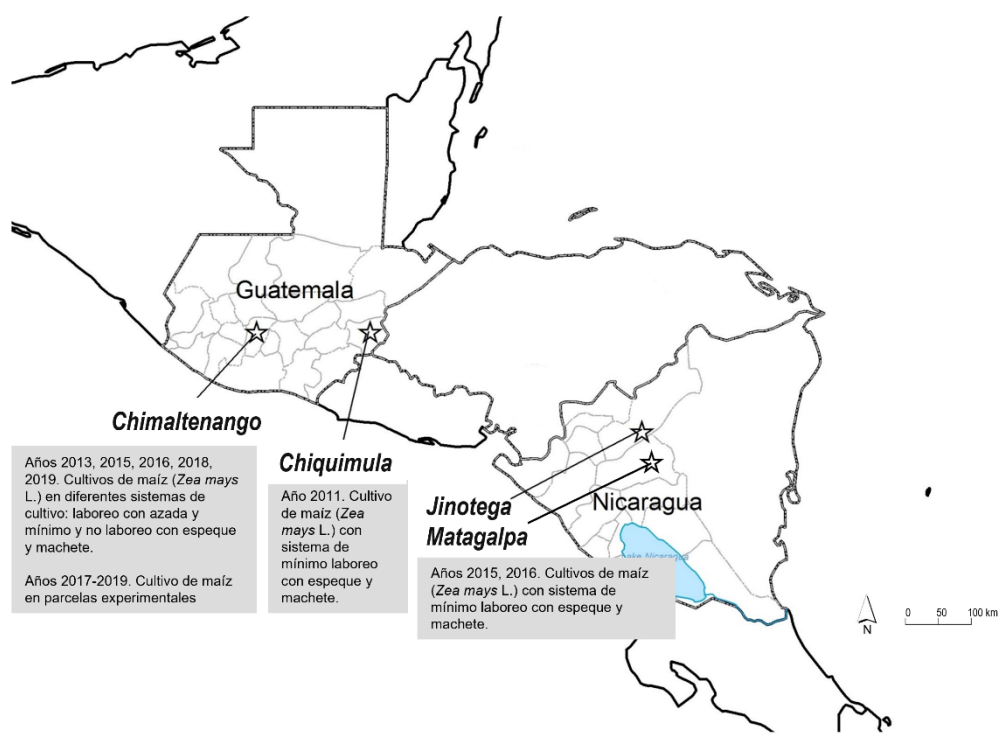
Las zonas de estudio se encuentran en las montañas de Guatemala (Departamentos de Chimaltenango y Chiquimula) y Nicaragua (Departamentos de Jinotega y Matagalpa) (Figura 1). Se han realizado un total de 161 estudios de erosión en cultivos de maíz (*Zea mays* L.) en diferentes situaciones de cobertura y manejo del suelo entre 2013 y 2019. En esta muestra se incluye también un estudio en parcelas experimentales que se realizó durante un período de 3 años (2017-2019) en las montañas de Santa Apolonia, en el Departamento de Chimaltenango (Guatemala). Se establecieron 3 parcelas de cultivo de maíz (*Zea mays* L.) de 20 x 23 m, utilizando 3 manejos de suelo diferentes: laboreo convencional (LC), laboreo reducido (LR) y no laboreo (NL).

Las parcelas experimentales se establecieron en una antigua parcela de maíz, con una pendiente homogénea del 32%, que había sido cultivada durante décadas bajo LC. La parcela, en el momento en el que se inició el estudio, llevaba 3 años en barbecho. Este periodo de no laboreo ha sido considerado por Krutz et al. (2009) como suficiente para evitar que los efectos de labranza, a consecuencia del uso histórico anterior, afecte a la comparativa de resultados.

Figura 1: Localización de las zonas de estudio.

Elaboración propia

Los suelos en las zonas de estudio presentan unas características relativamente homogéneas. La textura es franca o franco-arcillosa con un contenido medio de arcillas del 26,6% en Nicaragua y del 23,9% en Guatemala. El contenido de carbono orgánico se mantiene en unos niveles



relativamente altos, con unas medias que varían entre 2,4% en Nicaragua y 3,9% en Guatemala. El pH es muy parecido en todas las zonas de estudio: 6,3 en Guatemala y 6,6 en Nicaragua. La tasa de saturación en bases, 78,6% en Guatemala y 35,4% en Nicaragua denota un proceso de lixiviación creciente desde las regiones más secas a las más húmedas de las zonas de estudio. Los suelos en las parcelas experimentales no difieren significativamente de los valores anteriores. Los suelos fueron clasificados como Andosoles Móllicos (FAO-ISRIC-ISSS, 1998) y sus características fueron similares en las tres parcelas. La textura fue franca (21,8-23,7% de arcilla), con un 3,7-4,5% de carbono orgánico. La capacidad de intercambio catiónico osciló entre 21,5-27,6 meq/100 gr de suelo y la tasa de saturación en bases entre 42,6 y 49,2%.

El clima es tropical húmedo, aunque con una marcada diferencia de precipitaciones según las zonas de estudio. Los registros más elevados superaron los 2000 mm: 2770 mm en Jinotega (Nicaragua), 2414 mm en Matagalpa (Nicaragua), 1224 mm en Chiquimula (Guatemala) y 1080 m en Chimaltenango (Guatemala). Con respecto a las parcelas experimentales, las lluvias se registraron durante los 3 años de seguimiento con un pluviómetro instalado en las proximidades de las parcelas de estudio. La precipitación media anual fue de 952 mm y se caracterizó por una marcada estacionalidad. El período de lluvias se extendió desde abril hasta octubre y la estación seca en los meses restantes. El período de muestreo, entre julio y septiembre, coincidió con los meses de máximas precipitaciones (media mensual de 122 mm).

2.2 Ciclo del cultivo y sistemas de manejo agrícola

El ciclo del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en las parcelas experimentales se inició con la preparación del terreno para la siembra a mediados de abril. Esta labor consistió en 2 acciones: 1) eliminación de las plantas arvenses y los residuos vegetales de la cosecha anterior, y 2) preparación del lecho de siembra (en el caso de LC y LR). La siembra se realizó tras las primeras lluvias. Los dos primeros años fueron a principios de mayo (entre el 7 y el 11 de mayo) y el último fue a finales de abril (25 y 26 de abril) porque las lluvias se adelantaron. Los controles de plantas arvenses fueron dos, uno en la primera quincena de julio y el otro a finales de agosto-principios de septiembre. La fumigación se realizó con Paraquat 20 SL. La fertilización de NPK se realizó en tres aplicaciones. La primera (18:46:0) a principios de junio, la segunda (19:04:19) a mediados de julio y la tercera (15:15:15) a finales de agosto. La recolección se realizó en la última quincena de enero.

El manejo del suelo y de las plantas arvenses en el sistema de LC se realizó siguiendo el sistema de cultivo característico de la zona de estudio. Las labores se realizaron con azada. No se utilizó herbicida. En el sistema de LR, la preparación del suelo para la siembra se realizó mediante raspado de la superficie con azada, alterando los primeros 1-2 centímetros de suelo. La siembra se realizó con un espeque o chuzo, un método considerado de no-laboreo (FAO, 2000). Los controles de las plantas arvenses se realizaron también con raspado de la superficie del suelo y no se aplicó herbicida. Por último, en el sistema de NL, la preparación del suelo para la siembra se realizó cortando las plantas arvenses con machete, sin contacto con la superficie del suelo para no alterar la estructura. La siembra se realizó con un chuzo como en LR. Los controles de plantas arvenses se realizaron también con machete, sin contacto con el suelo, y 10 días más tarde se aplicó herbicida para eliminar las pequeñas plantas que el machete no pudo cortar.

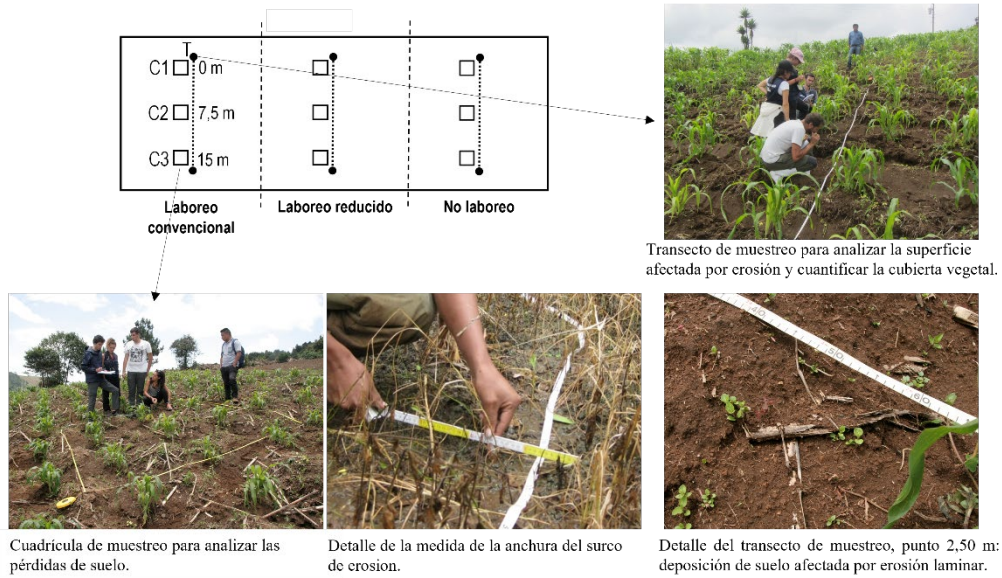
Los demás casos de estudio se realizaron en parcelas de cultivo de maíz en producción, con un ciclo de cultivo y un manejo agrícola que no difieren sustancialmente de lo expuesto para las parcelas experimentales.

2.3 Métodos de estudio de la erosión y medidas de campo

El muestreo de la erosión del suelo se realizó mediante los métodos descritos por Blanco (2018), que miden: 1) la superficie erosionada (en porcentaje de superficie afectada por los diferentes tipos de erosión y procesos superficiales asociados) mediante transectos, y 2) las pérdidas de suelo (en m³/ha) mediante cuadrículas de muestreo (Figura 2). Se realizaron cuatro repeticiones por parcela y año, coincidiendo con el periodo en el que se realizó la limpieza de plantas arvenses del ciclo del cultivo, 2 antes y los otros dos después. Los muestreos de erosión se realizaron antes y después de este período porque en esta última fase del ciclo del cultivo, junto con el período de siembra, es cuando el suelo se encuentra más vulnerable frente a la erosión.

Los transectos, de 15 m de longitud, se dividieron en secciones regulares de 0,25 m para la toma de datos. En cada punto de muestreo se determinaron el proceso superficial que afectaba al suelo y la cobertura vegetal (distinguiendo entre suelo desnudo, plantas arvenses, residuos vegetales, piedras y otros). La pérdida de suelo se analizó mediante cuadrículas, de 3x3 m, donde se localizaron y enumeraron los surcos y cárcavas observados, para medir su longitud, anchura y profundidad para calcular el volumen de suelo perdido (Figura 2).

Figura 2: Procedimientos de muestreo para cuantificar la erosión hídrica y la cobertura vegetal. Diagrama del proceso de muestreo por transectos (T) y cuadrículas (C) de los 3 tipos de manejo del suelo.



Fuente: Blanco et al. (2021)

2.4 Método de modelización y análisis estadístico

Se ha utilizado el procedimiento de modelización general-to-specific o general-to-simple (GETS) de Clarke (2014), basado en la teoría de la reducción, para establecer el modelo de regresión más eficiente que explica la superficie afectada por erosión. El método consiste en simplificar un modelo general inicial, que contiene todas las variables independientes potencialmente importantes, en modelos más simples (reducción), hasta obtener el que presenta el mejor equilibrio entre simplicidad y precisión. Por lo tanto, se trata de buscar el modelo que mejor predice la variable dependiente con el menor número de variables explicativas.

Los sistemas de manejo se han introducido en el análisis como variables cuantitativas, mediante dos variables dummy: perturbación del suelo (PS) y laboreo convencional-agricultura de conservación (LC-AC), como se describe en la tabla 1.

Tabla 1: Variables dummy de los métodos de manejo del suelo.

Métodos de manejo	D _{PS}	D _{LC-AC}
Laboreo convencional	1	1
Laboreo reducido	1	0
No laboreo	0	0

D_{PS}: Dummy perturbación del suelo, D_{LC-AC}: Dummy laboreo convencional-agricultura de conservación.

Fuente: Blanco et al. (2021)

El análisis de los datos se realizó utilizando el software IBM SPSS Statistics 25.0. Se utilizaron el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba HSD de Tukey para analizar las diferencias de la superficie afectada por la erosión en los tres sistemas de manejo agrícola. Se realizó un análisis de correlación bivariada (Pearson) y un análisis de correlación parcial para determinar la relación de los sistemas de manejo y la cobertura vegetal con la superficie erosionada. Por último, se realizó un análisis de regresión (método introducir) para estimar la superficie afectada por

erosión (variable dependiente) utilizando todas las variables independientes (modelo 1). El segundo y los sucesivos análisis de regresión consistieron en análisis de reducción del modelo general (nº 1) en modelos específicos (nº 2, 3 y 4), por eliminación de las variables independientes menos significativas.

3 Resultados

3.1 Cobertura vegetal y erosión del suelo en los tres sistemas de manejo agrícola de las parcelas experimentales

Los tres sistemas de manejo del suelo mostraron unas tasas de cobertura de suelo total (suma de plantas arvenses y residuos vegetales) con importantes diferencias (Tabla 2). La mayor tasa de cobertura se observó en NL ($97,5 \pm 18,9\%$), debido a que presentó una mayor cobertura de residuos ($62,7 \pm 14,8\%$), un 16,1 y un 47,7% más que en los sistemas de RL y LC, respectivamente. La cobertura de plantas arvenses fue similar en los tres sistemas de manejo, entre el 30% en RL y el 35% en LC y NL.

Tabla 2: Cobertura vegetal en cultivos de maíz con sistema de laboreo convencional (LC), laboreo reducido (LR) y no laboreo (NL). Valores: media \pm desviación estándar (n = 12).

Coberturas vegetales (%)	LC	LR	NL
Plantas arvenses	$34,5 \pm 27,7$	$30,5 \pm 11,6$	$34,8 \pm 26,8$
Residuos vegetales	$15,3 \pm 12,4$	$50,9 \pm 4,6$	$62,7 \pm 14,8$
TOTAL	$49,8 \pm 38,4$	$81,4 \pm 15,7$	$97,5 \pm 18,9$

Fuente: Blanco et al. (2021)

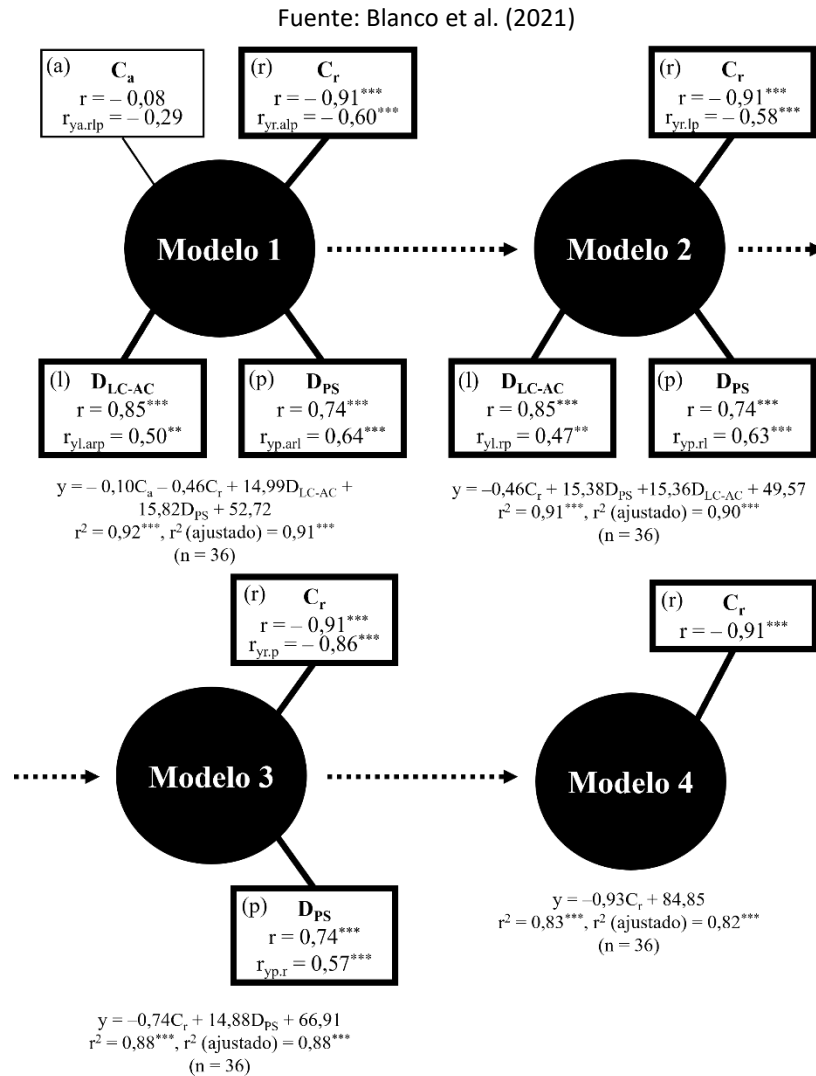
3.2 Modelización GETS aplicada al análisis de los factores que influyen en la superficie afectada por erosión en las parcelas experimentales

El análisis de varianza (ANOVA) reveló diferencias estadísticamente significativas (99% de confianza) en la superficie afectada por erosión hídrica entre los tres sistemas de manejo del suelo ($F = 103,35$, $P < 0,001$). El test HSD de Tukey mostró también diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,001$) entre cada tipo de manejo del suelo. El sistema de LC presentó la mayor tasa de erosión, con una superficie afectada del $73,2 \pm 11,5\%$, que se redujo hasta el $41,3 \pm 7,1\%$ en LR y hasta el $20,4 \pm 7,9\%$ en NL.

El primer análisis de regresión entre la superficie afectada por erosión y todas las variables independientes generó el modelo 1, que explicó el 92% de la variabilidad de la erosión del suelo ($r^2 = 0,92$, $P < 0,001$) (Figura 3). La relación entre la perturbación del suelo y la superficie afectada por erosión ($r = 0,74$, $P < 0,001$) fue la que presentó el mejor coeficiente de correlación parcial cuando se eliminó el efecto atribuible a las demás variables ($r_{yp.arl} = 0,64$, $P < 0,001$). Le siguió la cubierta de residuos vegetales, que pasó de $r = -0,91$ ($P < 0,001$) a $r_{yr.alp} = -0,60$ ($P < 0,001$) cuando se eliminaron los efectos de las demás variables independientes. Finalmente, la relación entre la erosión y la diferenciación de los sistemas de manejo laboreo convencional-agricultura de conservación (D_{LC-AC}) ($r = 0,85$, $P < 0,001$) presentó el coeficiente más bajo cuando se eliminó

el efecto atribuible a las otras variables ($r_{yl,arp} = 0,50, P < 0,01$). La cubierta de suelo de plantas arvenses no mostró una relación significativa con la erosión.

Figura 3: Procedimiento de modelización GETS para determinar la influencia de los sistemas de manejo del suelo [Dummy perturbación del suelo (D_{PS}) y Dummy laboreo convencional-agricultura de conservación (D_{LC-AC})] y de la cobertura del suelo [cobertura de plantas arvenses (C_a) y cobertura de residuos vegetales (C_r)] sobre la superficie afectada por erosión en cultivos de maíz. * Correlaciones significativas a: (*) $P < 0,05$; (**) $P < 0,01$; (***) $P < 0,001$.



Los siguientes análisis de regresión, de reducción del primer modelo, generaron tres ecuaciones (Figura 3). La de mayor complejidad (modelo 2) introdujo las tres variables con relación significativa con la superficie erosionada del modelo anterior. Por este motivo, el modelo 2 presentó una capacidad explicativa semejante a la anterior ($r^2 = 0,91, P < 0,001$). Por consiguiente, el análisis de correlación parcial de las variables independientes de esta ecuación siguió mostrando un comportamiento muy parecido al que se había observado en la ecuación 1. El modelo 3 introdujo la cubierta de residuos vegetales y la variable perturbación del suelo (D_{SP}) y logró explicar el 88% de la variabilidad de la erosión del suelo ($R^2 = 0,88, P < 0,001$), sólo un 3% menos que en el modelo anterior. El análisis de correlación parcial entre la erosión y las variables independientes de esta ecuación cambió el equilibrio de los pesos. Ahora el coeficiente

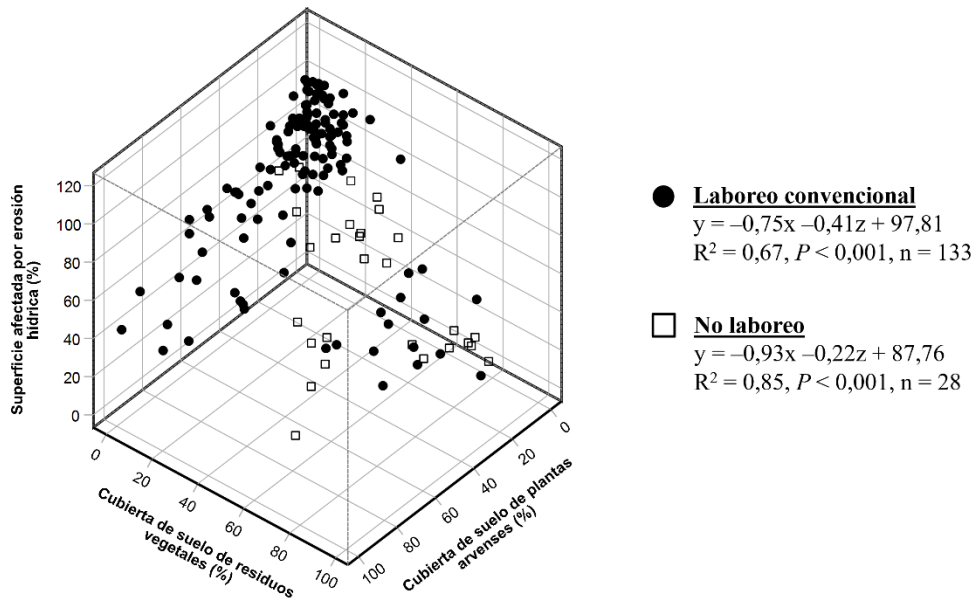
de correlación más alto se observó entre la cubierta de residuos vegetales y la erosión, que pasó de $r = -0,91$ ($P < 0,001$) a $r_{yr.p} = -0.86$ ($P < 0.001$) al eliminarse el efecto atribuible a la otra variable. La relación entre la perturbación del suelo y la superficie afectada por erosión ($r = 0,74$, $P < 0,001$) se redujo considerablemente cuando se eliminó el efecto de la cubierta ($r_{yp.r} = 0,57$, $P < 0,001$). Finalmente, el modelo 4 introdujo la cubierta de residuos vegetales y mostró una capacidad explicativa del 83% de la superficie erosionada ($r^2 = 0,83$, $P < 0,001$), tan sólo un 5% menos que el anterior.

3.3 Medidas de control de la erosión hídrica adaptadas a la zona de estudio (fase de investigación completa)

El análisis conjunto de la base de datos generada en la fase de investigación mostró que existe una relación lineal entre la erosión del suelo y las coberturas vegetales (residuos vegetales y plantas arvenses) (Figura 4). Partiendo de esta relación, se ha estimado la superficie afectada por erosión en dos sistemas de manejo del suelo: laboreo convencional y no laboreo. El sistema de mínimo laboreo no ha entrado en este análisis porque no ha tenido una influencia destacada en el estudio que se realizó en las parcelas experimentales. Los resultados se han mostrado gráficamente a intervalos del 25% de cubierta de plantas arvenses (desde el 0 hasta el 100% de cubierta) (Figura 5). Cada gráfico muestra la relación de la superficie afectada por erosión con la cubierta de residuos vegetales para cada situación de laboreo estudiada, calculada a partir de las ecuaciones de regresión obtenidas.

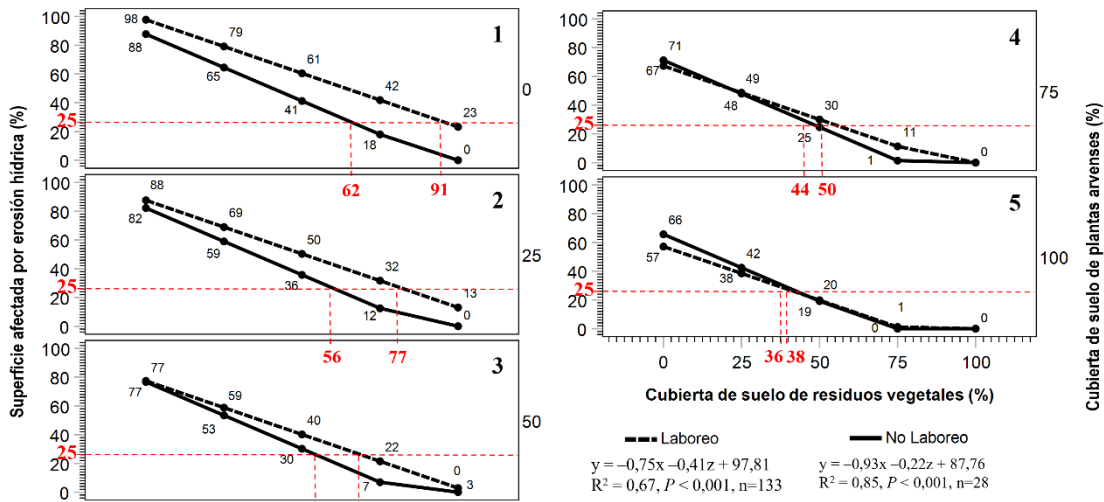
Esta sucesión gráfica muestra, al mismo tiempo, las situaciones en las que se encuentra el suelo a lo largo del ciclo del manejo del cultivo. El primer gráfico, con 0% de cobertura de plantas arvenses, corresponde a la situación que se encuentra el suelo en el momento de la siembra y tras los deshierbes sucesivos. Los gráficos 2, 3 y 4 corresponden a las situaciones que nos vamos a encontrar en los suelos a medida que va creciendo la cubierta vegetal, en la situación previa a las acciones de deshierbe (vuelta a la situación inicial, representada en el gráfico 1). La última representación gráfica representa la situación en el período final del ciclo agrícola, cuando han terminado los deshierbes debido a que las plantas arvenses ya han dejado de ser importantes competidoras por los recursos con los cultivos. Se ha establecido un 30% de superficie afectada por erosión como valor de referencia, por debajo del cual se ha considerado que se controla de manera efectiva la erosión. Esta cifra es un valor empírico, derivado de los resultados obtenidos en otros estudios (Blanco et al., 2023).

Figura 4: Relación entre la superficie afectada por erosión, la cobertura vegetal del suelo y los sistemas de manejo del suelo en cultivos de maíz



Elaboración propia

Figura 5: Estimación del suelo afectado por erosión hídrica con el incremento de la cubierta de residuos vegetales para valores de cubierta de malas hierbas del 0, 25, 50, 75 y 100% en cultivos de maíz bajo laboreo convencional y no laboreo



Elaboración propia

Los resultados obtenidos permitieron establecer una serie de recomendaciones de manejo agrícola para controlar la erosión. El cultivo bajo no laboreo es más efectivo para alcanzar un control adecuado de la erosión que el cultivo bajo laboreo convencional para un mismo valor de cubierta. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, es importante destacar que el control de la erosión se puede alcanzar en ambos sistemas de manejo del suelo, ajustando adecuadamente las cubiertas vegetales. Por tipo de manejo del suelo, se pueden establecer los

siguientes valores de referencia de cubierta de suelo para alcanzar un control efectivo de la erosión:

- (1) El cultivo bajo laboreo convencional alcanza un control efectivo de la erosión en las siguientes combinaciones de tasa mínima de cubierta de residuos vegetales (y de plantas arvenses): 91% (0%), 77% (25%), 64% (50%), 50% (75%) y 38% (100%).
- (2) El cultivo bajo no laboreo alcanza un control adecuado de la erosión a tasas de cubierta de residuos vegetales (y de plantas arvenses) del 62% (0%), 56% (25%), 50% (50%), 44% (75%) y 36% (100%).

4 Conclusiones

El procedimiento de modelización GETS se debe valorar positivamente para los objetivos de este trabajo, dado que ha permitido estudiar la respuesta de la combinatoria de factores (laboreo y cobertura vegetal) sobre la superficie erosionada, para poder establecer los que tienen mayor capacidad explicativa de la erosión. Los resultados mostraron que la superficie afectada por erosión se correlacionó principalmente con la cubierta de residuos vegetales del suelo, relegando a un segundo plano la perturbación del suelo por herramienta. Esta fracción de la cobertura del suelo logró explicar el 83% de la variabilidad de la superficie erosionada.

El resultado más importante de trabajo, a efectos prácticos, ha sido establecer una amplia combinatoria de medidas de control de la erosión hídrica en cultivos de maíz con clima tropical húmedo a subhúmedo, en base a las coberturas vegetales (residuos vegetales y plantas arvenses) en dos sistemas de manejo del suelo (convencional y no laboreo). De cara a la transferencia de resultados, esta combinatoria de medidas permite disponer de amplios recursos para satisfacer las demandas de los productores, aspecto clave para la continuidad de las medidas que se aplican y el éxito de los proyectos de cooperación al desarrollo en esta materia.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto “Transferencia-monitoreo-evaluación de medidas de control de erosión de suelos para el desarrollo agrícola sostenible en comunidades rurales con alta vulnerabilidad al cambio climático en Chimaltenango (Guatemala)”, (Ref. 2020UI005), financiado por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional (AACID), España, y por la Asociación para el Bienestar, Progreso y Desarrollo, Guatemala.

Referencias

- Adhikari, K, and Hartemink, A.E. (2016). Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma*, 262, 101–111.
- Blanco, R. (2018). An erosion control and soil conservation method for agrarian uses based on determining the erosion threshold. *MethodsX*, 5, 761–772.
- Blanco, R., Enríquez, F. and Lima, F. (2021). Effectiveness of conservation agriculture (tillage vs. vegetal soil cover) to reduce water erosion in maize cultivation (*Zea mays* L.): An experimental study in the sub-humid uplands of Guatemala. *Geoderma*, 404, 115336, 1-11. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115336
- Blanco, R., Lima, F. J., Gómez, M. L., Enríquez, F., Aguilar, A. (2023). Buenas prácticas agrícolas para el control de la erosión hídrica del suelo en los cultivos anuales de las montañas de Guatemala y Nicaragua. *Ikara. Revista de Geografías Iberoamer.*, 3.

- Clarke, D. (2014). General-to-Specific Modeling in Stata. *The Stata Journal*, 14(4), 895-908.
- FAO. (2000). *Manual on integrated soil management and conservation practices*. Land and Water Bulletin 8, Rome.
- FAO. (2017). *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy, 16 p. Available at: <http://www.fao.org/3/a-bl813e.pdf>
- FAO. (2024). Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- FAO-ISRIC-ISSS. (1998). *World reference base for soil resources*. World soil resources report. 84. Rome.
- FAO-ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 607 p. Available at: <http://www.fao.org/3/a-bc590e.pdf>
- Krutz, L.J., Locke, M.A. and Steinriede Jr, R.W. (2009). Interactions of tillage and cover crop on water, sediment, and pre-emergence herbicide loss in glyphosate-resistant cotton: implications for the control of glyphosate-resistant weed biotypes. *J. Environ. Qual.*, 38, 1240–1247.
- Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V. and Bernoux, M. (2015). Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 203, 127–139.
- Mhazo, N., Chivenge, P. and Chaplot, V. (2016). Tillage impact on soil erosion by water: Discrepancies due to climate and soil characteristics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 230, 231–241.
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *PNAS*, 104 (33), 13268-13277.
- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surf. Process. Landforms*, 43, 64–84.
- Sun, Y., Zeng, Y., Shi, Q., Pan, X. and Huang, S. (2015). No-tillage controls on runoff: A meta-analysis. *Soil & Tillage Research*, 153, 1–6.