

Cita bibliográfica: Blanco Sepúlveda, R., Lima, F.J., Gómez Moreno, M.L., Enríquez Narváez, F., & Aguilar Carrillo, 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 Iberoamericanas*, (3). <https://doi.org/10.18239/Ikara.3319>

Buenas prácticas agrícolas para el control de la erosión hídrica del suelo en los cultivos anuales de las montañas de Guatemala y Nicaragua

Rafael Blanco Sepúlveda *¹ 

Francisco Javier Lima¹ 

María Luisa Gómez Moreno¹ 

Francisco Enríquez Narváez ² 

Amilcar Aguilar Carrillo ³ 

Resumen: Los cultivos anuales (maíz, frijol, arveja, brócoli, papa y zanahoria) son muy importantes para la economía de los pequeños productores en las zonas montañosas de Guatemala y Nicaragua. La sostenibilidad de estos cultivos se encuentra en una situación muy precaria, debido a la degradación del suelo por erosión hídrica. Esta situación hace necesario reconducir los sistemas agrícolas actuales hacia modelos sostenibles. Los objetivos de este trabajo han sido: (1) analizar las pérdidas de suelos en los citados cultivos en Guatemala y Nicaragua, y (2) establecer las malas y buenas prácticas agrícolas para un adecuado control de la erosión. Los resultados obtenidos mostraron que las medidas de control de la erosión que se requieren para revertir la situación son: (1) uso preferente de técnicas de no laboreo y (2) mantener una cobertura vegetal mínima para proteger el suelo de la erosión, lo que varía según el sistema de cultivo.

Palabras clave: agricultura de conservación; laboreo; cobertura vegetal del suelo.

Boas práticas agrícolas para o controle da erosão hídrica do solo em cultivos anuais nas montanhas da Guatemala e Nicarágua

Resumo: As culturas anuais (milho, feijão, ervilha, brócolis, batata e cenoura) são muito importantes para a economia dos pequenos produtores das áreas montanhosas da Guatemala e Nicaragua. A sustentabilidade dessas culturas encontra-se em situação bastante precária, devido à degradação do solo pela erosão hídrica. Esta situação torna necessário redirecionar os atuais sistemas agrícolas para modelos sustentáveis. Os objetivos deste trabalho foram: (1) analisar as perdas de solo nas culturas mencionadas na Guatemala e na Nicarágua e (2) estabelecer as más e boas práticas agrícolas para o controle adequado da erosão. Os resultados obtidos mostraram que as medidas de controle da erosão necessárias para reverter a situação são: (1) uso preferencial de técnicas de plantio direto e (2) manutenção de uma cobertura vegetal mínima para proteger o solo da erosão, que varia de acordo com o sistema de cultivo.

Palavras chave: agricultura de conservação; preparo do solo; cobertura do solo.

* Autor/a para la correspondencia: rblanco@uma.es

¹ Departamento de Geografía, Universidad de Málaga (España).

² World Renew (Canadá, delegación de Guatemala).

³ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Costa Rica, delegación de Nicaragua).

Good agricultural practices for the control of soil water erosion in annual crops in the mountains of Guatemala and Nicaragua

Abstract: Annual crops are very important in the economy of smallholders in the mountainous areas of Guatemala and Nicaragua. The sustainability of these crops is in a very precarious situation, due to the intense water erosion that is affecting the soil. This situation makes it necessary to redesign current agricultural systems towards sustainable models. The aims of this work have been: (1) to analyze soil loss in the cited crops in Guatemala and Nicaragua, and (2) to establish adequate erosion control measures. The results obtained showed that the erosion control measures required to reverse the situation are: (1) preferential use of no-till techniques and (2) maintain a minimal vegetal cover to protect the soil against erosion, which varies according to the farming system.

Key words: conservation agriculture; tillage; ground vegetal cover.



1. INTRODUCCIÓN

1.1. La vulnerabilidad a la erosión hídrica del suelo en las montañas de Guatemala y Nicaragua

La degradación del suelo por erosión hídrica a consecuencia de la actividad agraria en los espacios montañosos constituye actualmente uno de los problemas más importantes a escala global. Concretamente, las montañas tropicales centroamericanas conforman una de las regiones del planeta que se encuentran más gravemente afectadas (FAO-ITPS, 2015). Estos espacios son particularmente vulnerables a la erosión hídrica a causa de sus características naturales, a lo que se suma la presión antrópica como uno de los principales factores causales de este proceso de degradación del suelo.

La vulnerabilidad natural de las montañas centroamericanas y, concretamente, de Guatemala y Nicaragua viene determinada por las características del relieve, el clima y los suelos. El relieve es montañoso, en muchos casos con elevadas pendientes. El clima es tropical con un régimen de precipitaciones muy variable, pero que en todos los casos se caracteriza por una elevada frecuencia de lluvias de fuerte intensidad (tormentas tropicales y huracanes) (Panagos et al., 2017). Los suelos son de características muy variadas, lo que depende de la naturaleza del sustrato litológico. En todos los casos, destaca su elevada vulnerabilidad a la degradación a consecuencia de la deforestación y la puesta en cultivo, dado que estas acciones determinan: a) pérdida de protección frente al impacto de la lluvia (Prosdocimi et al., 2016); b) pérdida de la fuente de materia orgánica más importante, lo que provoca una disminución de la fertilidad natural del suelo (Murty et al., 2002), junto a un aumento de la inestabilidad estructural y una mayor fragilidad al impacto de la lluvia y la erosión (Yu et al., 2017).

A la vulnerabilidad intrínseca de esta región por motivos naturales, se suma el actual escenario de calentamiento global. El IPCC (2018) sostiene que este proceso ha provocado en el conjunto de la región un aumento de la temperatura media y una mayor irregularidad e intensidad de las precipitaciones. Este nuevo panorama climático está provocando un agravamiento de los procesos de degradación de suelos (Borrelli et al., 2020), por lo que se prevén en el sector agrario importantes pérdidas de productividad (Kang et al., 2013).

Centroamérica se encuentra sometida desde hace décadas a una fuerte presión agrícola y demográfica. La agricultura tradicional, denominada de tala y quema o itinerante, se basó en la rotación de las parcelas de cultivo, en el barbecho forestal como método de recuperación de la fertilidad del suelo, y en el no laboreo, ya que la siembra se realizaba con espeque (bastón con punta) al no conocerse el arado hasta la etapa colonial. Este modelo agrícola logró mantener el frágil equilibrio medioambiental de estos espacios. Las claves para explicar la sostenibilidad de esta agricultura de montaña fueron, en términos generales: a) la escasa presión demográfica que soportaban estas áreas, y b) había una amplia disponibilidad de tierras,

lo que permitió una agricultura itinerante de prolongados barbechos forestales para recuperar la fertilidad del suelo (Blanco & Aguilar, 2016). Paralelamente, cuando se analiza la agricultura de las civilizaciones urbanas precolombinas de estas áreas, también existió una agricultura sedentaria, más intensiva, con sistemas de irrigación y aportes de materia orgánica (mantillo) para recuperar la fertilidad del suelo (Ebel, 2020).

Las condiciones actuales de estos espacios montañosos son bien distintas. El conjunto de la región y, concretamente, los países donde se ha desarrollado esta investigación presentan (Guatemala y Nicaragua), presentan desde hace décadas una fuerte presión demográfica, a lo que se puede sumar la presión procedente de la agricultura, a consecuencia de la Revolución Verde.

La población rural sigue teniendo un peso muy importante en Centroamérica y especialmente en los países de estudio. De acuerdo con el Banco Mundial (2023), los países de esta región presentaban en 2020 una tasa de población rural del 38,7% (48,2% en Guatemala y 41,0% en Nicaragua). La población rural en el conjunto de la región creció un 119,2% entre 1960 y 2020 (185,5% en Guatemala y 153,4% en Nicaragua), a una tasa anual del 1,6% (1,8% en Guatemala y 1,6% en Nicaragua). La presión demográfica creciente que sufren los espacios montañosos vulnerables ha provocado que se ocupen tierras marginales proclives a la erosión hídrica, lo que constituye a nivel general uno de los factores socioeconómicos más importantes que inducen este proceso (Morgan, 2005).

Las mejoras agrarias que se han introducido desde la Revolución Verde de los años 50 del siglo XX, han provocado un aumento de la superficie cultivada y un proceso creciente de intensificación agrícola y de diversificación de los cultivos (Piñeiro et al., 1979; Patel, 2013). El aumento de la superficie cultivada se ha producido a expensas de la superficie forestal. Según las estadísticas de la FAO (2023), se ha perdido casi el 10% en el conjunto de la región en las últimas 3 décadas (1991-2019), a una tasa anual de -0,37%, lo que ha supuesto una pérdida de 9,79 millones de ha (Tabla 1). Esta cifra ha sido superada en los países de las zonas de estudio: Nicaragua ha perdido el 44,33% de la superficie forestal (2,79 millones de ha), a una tasa anual de -2,07%; y Guatemala ha perdido el 25,09% (1,18 millones de ha), a una tasa anual de -1,03%. Inversamente, la superficie agrícola de la región se ha incrementado un 2,05% (2,29 millones de ha) en las últimas 6 décadas (1961-2019), a una tasa anual del 0,04%. Como se podía esperar, la tasa de crecimiento ha sido superior en los países de estudio. En Nicaragua creció un 47,67% (1,63 millones de ha), a una tasa anual del 0,67%; y en Guatemala creció un 45,73% (1,21 millones de ha), 0,65% anual.

Tabla 1. *Evolución de las tierras forestales y de uso agrícola en los países de las áreas de estudio y en la región*

	Tierras forestales (1991-2019)			Tierras de uso agrícola (1961-2019)		
	Evo (MHa)	Crto (%)	Tcrto (%)	Evo (MHa)	Crto (%)	Tcrto (%)
Guatemala	-1,18	-25,09	-1,03	1,21	45,73	0,65
Nicaragua	-2,79	-44,33	-2,07	1,63	47,67	0,67
América Central	-9,79	-9,97	-0,37	2,29	2,05	0,04

Leyenda: Evo (MHa): Evolución de la superficie (millones de hectáreas); Crto (%): crecimiento total; Tcrto (%): tasa media de crecimiento anual.

Fuente: elaboración propia a partir de FAO (2023).

Los cultivos anuales (maíz, frijol, arveja, brócoli, papa y zanahoria) son muy importantes para la economía de los pequeños productores de Centroamérica. Los dos primeros son los alimentos básicos de su dieta y, los restantes, constituyen una fuente de rentas, dado que se cultivan principalmente por su interés comercial. El análisis de la dinámica de estos cultivos en el conjunto de la región y, particularmente,

en Guatemala y Nicaragua pone de manifiesto un importante crecimiento de la superficie agrícola, acompañado de un aumento igualmente importante de la productividad (Tabla 2). Para algunos cultivos el ritmo de crecimiento de la productividad fue considerablemente mayor que el de la superficie cultivada, lo que evidencia una creciente intensificación agrícola. La superficie agrícola creció en los cultivos de maíz (18,25% total, 0,28% anual), frijol (26,18% total, 0,39% anual), papa (76,80% total, 0,97% anual) y, especialmente en brócoli (8984% total, 7,94% anual) y zanahoria (1398% total, 4,69% anual). Solo la superficie de arveja decreció un 16,09% (-0,45% anual). Paralelamente, la productividad de estos cultivos experimentó también un incremento muy importante: en maíz creció un 256% (2,18% anual), en frijol un 61,57% (0,82% anual), en brócoli un 77,17% (0,97% anual) y en papa un 338,6% (2,54% anual). Sólo en los cultivos de arveja y zanahoria decreció la productividad: 21,49% (-0,62% anual) y 21,84% (-0,42% anual), respectivamente.

Tabla 2. *Evolución de los cultivos analizados en los países de las áreas de estudio entre 1961 y 2020^a, entre 1981 y 2020^b y entre 1991 y 2020^c*

Cultivos		Guatemala		Nicaragua		América Central	
		Crto	Crto (%)	Crto	Crto (%)	Crto	Crto (%)
Maíz ^a	<i>Sup</i>	245,42	39,25 (0,56)	133,83	80,96 (1,01)	1,40*	18,25 (0,28)
	<i>Prod</i>	1365,10	164,76 (1,66)	392,60	46,28 (0,65)	2496,9	256,41 (2,18)
Frijol ^a	<i>Sup</i>	205,07	322,44 (2,47)	191,19	370,52 (2,66)	492,24	26,18 (0,39)
	<i>Prod</i>	358,90	55,81 (0,75)	103,20	13,48 (0,21)	287,10	61,57 (0,82)
Arveja ^b	<i>Sup</i>	-	-	-	-	-1,74	-16,09 (-0,45)
	<i>Prod</i>	-	-	-	-	-3290,6	-21,49 (-0,62)
Brócoli ^{a,c}	<i>Sup</i>	4,10 ^c	146,57 (2,34)	-	-	44,92 ^a	8084,6 (7,94)
	<i>Prod</i>	4722,7 ^c	38,85 (0,84)	-	-	7716,6 ^a	77,17 (0,97)
Papa ^a	<i>Sup</i>	19,73	594,51 (3,34)	3,04	760,75 (3,72)	40,55	76,80 (0,97)
	<i>Prod</i>	20622,0	414,86 (2,82)	16487,5	471,07 (3,00)	22422	338,63 (2,54)
Zanahoria ^{a,c}	<i>Sup</i>	2,71 ^c	297,80 (7,54)	0,64 ^c	321,5 (5,09)	17,06 ^a	1398,5 (4,69)
	<i>Prod</i>	-6539,9 ^c	-18,32 (-1,06)	-4688,3 ^c	-14,71 (-0,55)	-8020,0 ^a	-21,84 (-0,42)

Leyenda: Sup: superficie (miles de hectáreas) (*millones de hectáreas); Prod: productividad (kg/ha); Crto: crecimiento total en cifras en el período de estudio; Crto (%): crecimiento total en porcentaje en el mismo período y tasa media de crecimiento anual (entre paréntesis).

Fuente: elaboración propia a partir de FAO (2023).

El análisis por países mostró una tendencia similar al de la región en el cultivo de maíz. Por el contrario, en los restantes cultivos las diferencias fueron importantes (Tabla 2). El cultivo de frijol experimentó un incremento muy superior de la superficie cultivada: 370,52% total (2,66% anual) y 322,44% total (2,47% anual) en Nicaragua y Guatemala respectivamente; mientras que, la productividad fue similar. En brócoli y zanahoria, por el contrario, el crecimiento de la superficie fue más moderado: Guatemala (brócoli: 146,57% total, 2,34% anual; zanahoria: 297,80% total, 7,54% anual), Nicaragua (brócoli: no hay datos; zanahoria: 321,50% total, 5,09% anual). La productividad fue similar en ambos cultivos. En papa el crecimiento de la superficie y la productividad fue muy superior: Nicaragua (760,75%

total, 3,72% anual en superficie; y 471,07% total, 3,00% anual en productividad) y Guatemala (594,51% total, 3,34% anual en superficie; y 414,86% total, 2,82% anual en productividad). En síntesis, se puede deducir de estas cifras que la superficie agrícola en los países de estudio creció a un ritmo más elevado que la productividad, lo que evidencia una apuesta por la extensificación agrícola, con la consiguiente ocupación de tierras de dudosa potencialidad. Esta tendencia ha podido tener, como consecuencia más importante, una marcada influencia sobre la degradación del suelo.

1.2. Plan de actuación para establecer las medidas de control de la erosión hídrica del suelo

Teniendo en cuenta lo expuesto hasta ahora, la sostenibilidad de la actividad agrícola en las montañas de Centroamérica se encuentra en un precario equilibrio. La población rural es muy dependiente de los cultivos anuales para su subsistencia y para la generación de rentas, lo que hace necesario reconducir los sistemas agrarios actuales hacia modelos sostenibles. La insostenibilidad de las explotaciones agrícolas puede terminar provocando graves tensiones sociales: aumento de la pobreza y migración. La pérdida de capacidad productiva de la agricultura de los pequeños y medianos productores/as puede provocar un aumento de la pobreza y, con ello, de los flujos migratorios. La migración intranacional hacia las ciudades más importantes del país sufriría un incremento insostenible, y pronto tornaría a internacional ante la incapacidad de las economías locales para absorber mano de obra, lo que puede terminar generando importantes tensiones entre los países de la región y especialmente con Estados Unidos. Los modelos migratorios predicen un movimiento de personas de hasta 2,1 millones en el horizonte del año 2050 por causas climáticas en la región (Kumari et al., 2018) y no debemos olvidar que la emigración centroamericana es un fenómeno eminentemente rural (Soto & Saramago, 2019).

Por todos estos motivos, la FAO (2017) considera la conservación del suelo como una prioridad a escala global y, concretamente, controlar la erosión hídrica se ha convertido en el caballo de batalla de la política internacional sobre manejo sostenible de este recurso. Las soluciones a corto-medio plazo que podemos apuntar son dos: (a) abandono de la actividad agraria y reforestación y (b) fomento del desarrollo agrario sostenible. La primera es la más difícil de ejecutar a corto-medio plazo porque implica dar una alternativa económica a la población rural que, de no existir, alimentaría el problema de la emigración internacional. La solución, sin duda, pasa por el desarrollo de una agricultura sostenible que permita controlar la erosión hídrica y asegurar la suficiencia alimentaria.

La conservación del medioambiente ha sido y sigue siendo uno de los ejes estratégicos de los planes de actuación de los organismos internacionales que operan en Centroamérica. Este objetivo ha sido contemplado tanto directamente en proyectos específicos sobre conservación de los recursos naturales, como indirectamente, en los proyectos donde la conservación o la mejora del medio ambiente suele ser uno de los ejes transversales. Sin embargo, en materia de desarrollo agrícola existe un déficit muy importante debido principalmente a la ausencia de medidas concretas de conservación del suelo adaptadas a las características particulares de las zonas de estudio. La solución pasa, sin duda, por la incorporación de las medidas de la agricultura de conservación (AC), un sistema de cultivo que se ha mostrado eficaz en diferentes contextos climáticos para el control de la erosión (Sun et al., 2015). La AC se basa en dos medidas fundamentales: (1) minimizar la perturbación mecánica del suelo: mínimo laboreo o no laboreo; y (2) mantener una cubierta vegetal permanente en la superficie del suelo.

El plan de actuaciones en esta materia que ha realizado el equipo que integra esta investigación ha seguido un esquema de trabajo con dos fases. La primera, de investigación, se realizó durante 7 años (2013–2019) en el marco de 9 proyectos de cooperación internacional para el desarrollo de la Universidad de Málaga, financiados por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID). Las acciones de estos proyectos se integraron en el MAP 1 y 2 (Programa Agroambiental Mesoamericano), concretamente en el proyecto MESOTERRA (Manejo Sostenible de Territorios Agropecuarios en Mesoamérica) que coordinó el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) entre 2009 y 2016. Este organismo, con sede en Costa Rica, trabaja en el conjunto del ámbito tropical del continente americano. La línea de trabajo desarrollada no fue contemplada

inicialmente en los programas MAP, por lo que estos proyectos abrieron una nueva perspectiva de investigación dentro del programa. A partir de 2013 las investigaciones se han desarrollado también en Guatemala. La Asociación Bienestar, Progreso y Desarrollo (ABPD) de este país, que se dedica a desarrollo comunitario y desnutrición infantil, ha integrado estas investigaciones entre las líneas de actuación de sus proyectos.

En esta fase se analizaron los sistemas agrarios representativos de las montañas de Honduras, Guatemala y Nicaragua. Concretamente, en materia de cultivos anuales las investigaciones se desarrollaron en los dos últimos. Los resultados en este grupo de cultivos se han publicado en 4 trabajos (Blanco & Aguilar, 2016; Blanco & Enríquez, 2018; Blanco et al., 2021a, 2021b), que recogen los conocimientos necesarios para entender los procesos erosivos que afectan a los cultivos anuales en las áreas de estudio, así como para establecer las medidas y técnicas apropiadas de control de la erosión adaptadas a cada caso. La segunda fase, de transferencia de resultados, se inició en 2021 y sigue desarrollándose en la actualidad en el marco de un proyecto financiado por la AACID (convocatoria 2020 dirigida a las universidades de Andalucía).

El objetivo de este trabajo ha sido realizar un análisis de síntesis de los resultados obtenidos en la fase de investigación, que ha consistido en: 1) analizar comparativamente la erosión del suelo y la cobertura vegetal en los sistemas de cultivos anuales estudiados; y 2) establecer las buenas y malas prácticas agrícolas, en base al manejo del suelo y las tasas de cubierta vegetal, que permitirían reconducir los sistemas agrícolas actuales hacia modelos que controlen la erosión.

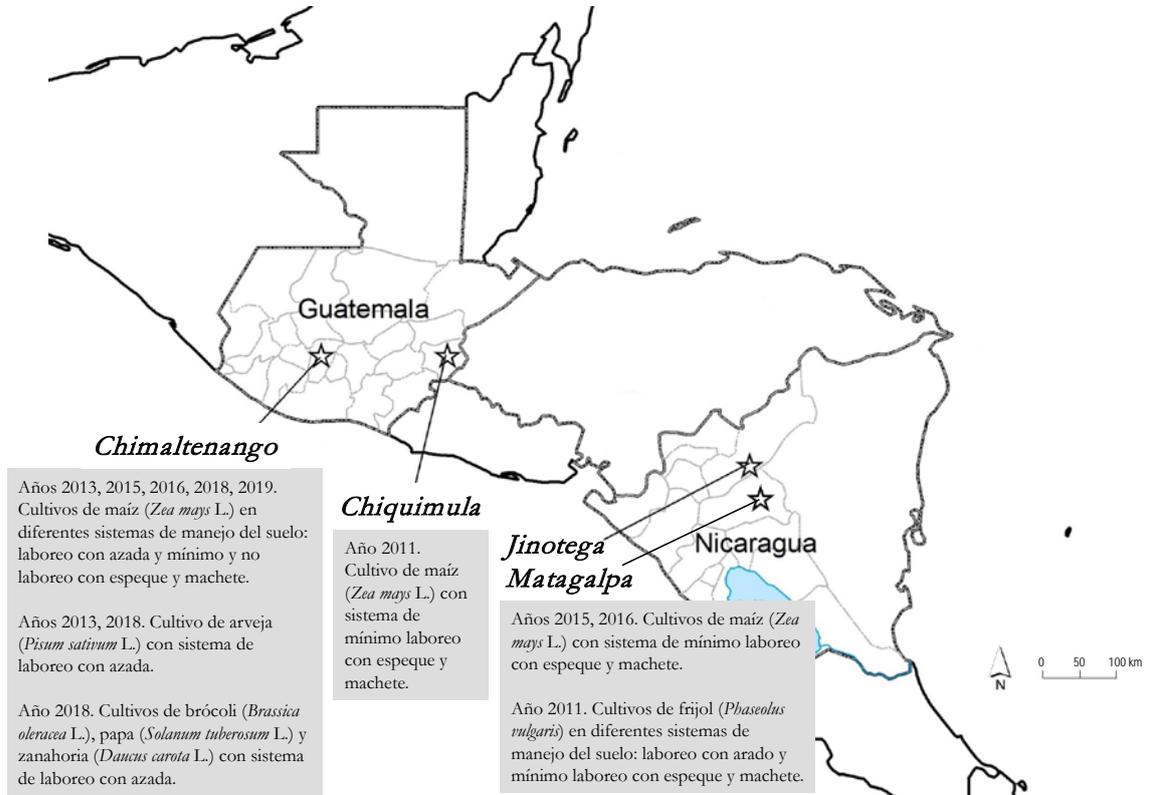
2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área 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 analizado seis cultivos anuales, representativos de las áreas de estudio: maíz, frijol, arveja, brócoli, papa y zanahoria. Se han realizado un total de 13 estudios, concretamente 8 en cultivos destinados principalmente al autoconsumo (6 en maíz y 2 en frijol) y 5 en cultivos comerciales (2 en arveja y 1 en brócoli, papa y zanahoria). Diferenciados por los sistemas de manejo del suelo, se han analizado 1 caso de estudio con no laboreo (cultivo de maíz), 3 casos con mínimo laboreo (2 en cultivo de maíz y 1 en frijol) y 9 casos con laboreo (3 en maíz, 2 en arveja y 1 en los restantes 4 cultivos). Es necesario aclarar que las investigaciones se han realizado en condiciones reales (no experimentales), por lo tanto, los casos de estudio analizados corresponden a las situaciones que se han encontrado en cada campaña de estudio. Esta circunstancia permite explicar que no se hayan podido analizar el conjunto de los cultivos anuales en los sistemas de manejo con no laboreo y mínimo laboreo, dado que no se encuentran presentes en las zonas de estudio.

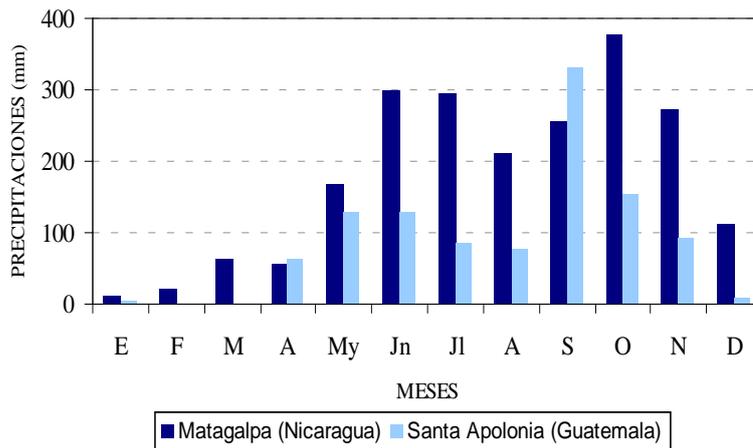
El clima es tropical húmedo, aunque con una marcada diferencia de precipitaciones según las zonas de estudio. Los registros se realizaron mediante pluviómetros portátiles, que fueron instalados *ad hoc* durante los períodos de realización de los proyectos. Las precipitaciones más elevadas superaron los 2000 mm: 2770 mm de media en Jinotega (Nicaragua) y 2414 mm en Matagalpa (Nicaragua). Mientras que, los registros más reducidos giraron en torno a los 1000 mm. La cuenca del río Torjá (Chiquimula, Guatemala) presentó unas precipitaciones de 1224 mm en los tramos más elevados, que se redujeron hasta los 750 mm en la parte baja de la cuenca. En Chimaltenango (Guatemala) se registró una precipitación media de 1080 mm (Figura 2).

Figura 1. Localización de las áreas de estudio y relación de las investigaciones realizadas



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Precipitaciones medias mensuales en Matagalpa (Nicaragua) entre 2015 y 2016 y en Santa Apolonia (Guatemala) entre 2013 y 2019



Fuente: elaboración propia.

El relieve de las zonas de estudio es montañoso, con una pendiente media variable. Las pendientes en los cultivos de maíz oscilaron entre el 31% (no laboreo) y el 38% (mínimo laboreo y laboreo). Las variaciones en los cultivos de frijol fueron más pronunciadas: 27,4% en el sistema de cultivo con laboreo y

53,4% en mínimo laboreo. Los restantes cultivos presentaron unas pendientes igualmente contrastadas: 24 y 27% en los cultivos de papa y zanahoria; y 37 y 38% en los cultivos de brócoli y arveja, respectivamente (Tabla 3).

Tabla 3. *Pendiente del relieve de los cultivos anuales bajo diferentes sistemas de manejo del suelo*

Variables	Maíz NL (n = 12)	Maíz ML (n = 25)	Frijol ML (n = 16)	Brócoli L (n = 6)	Papa L (n = 6)
Pend (%)	31,0±0,9	37,7±13,2	53,4±15,1	37,3±23,6	24,4±18,1
Variables	Papa L (n = 6)	Arveja L (n = 22)	Maíz L (n = 98)	Frijol L (n = 22)	Zanahoria L (n = 7)
Pend (%)	24,4±18,1	38,2±17,6	38,4±16,2	27,4±16,9	25,0±13,9

Leyenda: Pend: pendiente del relieve. Sistemas de manejo del suelo: NL: no laboreo, ML: mínimo laboreo; L: laboreo.

Valores: media ± desviación estándar.

Fuente: elaboración propia.

Los suelos presentaron unas características variadas. La textura fue franca o franco-arcillosa con un contenido de arcillas del 26,6% en los suelos de Nicaragua y 23,9% en los de 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 fue 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.

2.2. Método de trabajo

La erosión hídrica del suelo se ha analizado utilizando el método de Blanco (2018), que consiste en determinar: (1) el estado erosivo mediante la cuantificación de los tipos de erosión (salpicadura, laminar, surcos y cárcavas) y de los procesos superficiales que afectan al suelo y están asociados con la erosión (los resultados se expresan en porcentaje de superficie afectada por todos estos procesos); y (2) la pérdida de suelo por erosión en surcos y cárcavas, expresando los resultados en volumen (m³/ha).

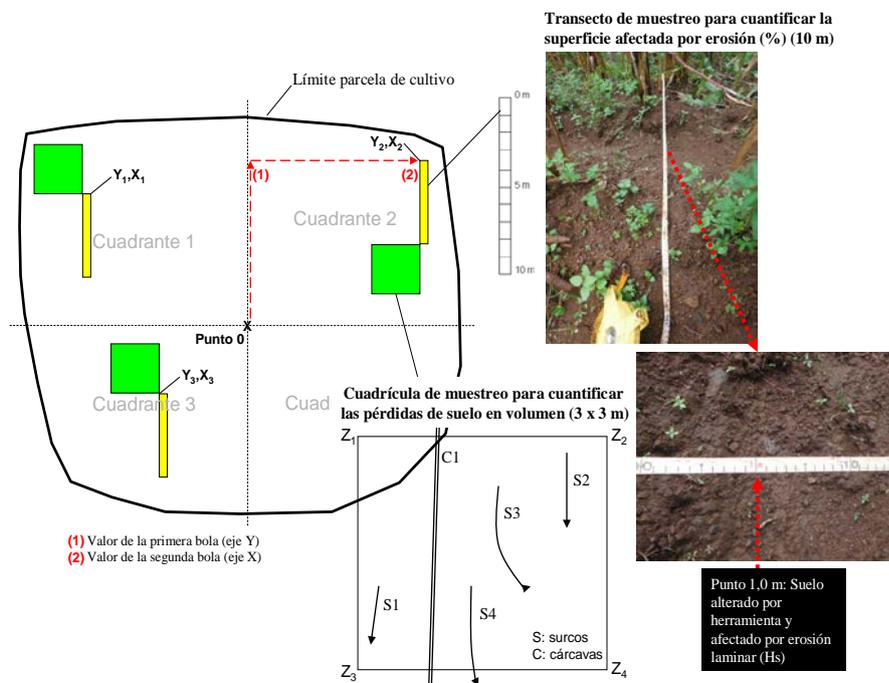
Los antecedentes del método de análisis del estado erosivo del suelo se limitan a realizar clasificaciones cualitativas a partir de la observación de la presencia/ausencia de indicadores visuales y número y tamaño de los mismos (Stocking & Murnaghan, 2003; Illgner, 2008; Mutekanga et al., 2010). El método de Blanco (2018) ofrece una mejora sobre los métodos tradicionales, al valorar cuantitativamente el estado erosivo del suelo mediante métodos de muestreos aleatorios. Los métodos tradicionales se han basado en la determinación de la erosión mediante indicadores visuales. Aquí se ha incluido también la identificación de los procesos superficiales que afectan al suelo (impactos erosivos, impactos mecánicos por pisoteo o uso de herramientas de labranza, procesos de depósito, suelo protegido de la erosión, compactación e impacto mecánico por tránsito de animales, etc.).

Las pérdidas de suelo se estimaron mediante el método de análisis de la erosión por mediciones volumétricas de los surcos y cárcavas, descrito en Hudson (1993). Las mediciones se realizaron utilizando el método ACED (Assessment of Current Erosion Damage) de Herweg (1996), que consiste en la elaboración de mapas esquemáticos de localización de los surcos y cárcavas y la medición de la longitud, anchura y profundidad de los mismos para estimar las pérdidas de suelo.

El método de muestreo fue mediante transectos para el análisis del estado erosivo y mediante cuadrículas para el análisis de las pérdidas de suelo. El procedimiento de muestreo fue el siguiente (Figura 3):

- a) Se dividió la parcela de cultivo en 4 cuadrantes.
- b) Se seleccionaron al azar 3 cuadrantes para realizar el muestreo.
- c) Desde el punto 0 (confluencia de los cuatro cuadrantes imaginarios) de la parcela, se seleccionó al azar el punto de partida (punto Y_n, X_n) de los 3 transectos, uno en cada cuadrante.
- d) Los transectos, de 10 m de longitud, se dividieron en tramos regulares de 0,25 m para la toma de datos. Es decir, se identificó cada 0,25 m, en un punto de aproximadamente 1 cm², el proceso superficial que afectaba al suelo en ese momento. También se cuantificó la cobertura vegetal, tanto la compuesta por las plantas adventicias, como por los residuos vegetales, procedentes principalmente de los rastrojos de la cosecha anterior y los desherbados.
- e) Las cuadrículas de muestreo de 3 x 3 m para el análisis de las pérdidas de suelo, se establecieron a partir de los puntos Y_n, X_n , obtenidos en el procedimiento anterior.

Figura 3. Esquema del proceso de muestreo de la erosión del suelo mediante transectos y cuadrículas



Fuente: adaptado de Blanco (2018).

El análisis de los resultados se ha realizado mediante análisis de varianza (ANOVA y test HSD de Tukey) y regresión lineal (método por pasos). Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SPSS, versión 25.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. La cobertura vegetal y la erosión hídrica del suelo en los tres sistemas de manejo del suelo

Los cultivos de maíz presentaron una cobertura vegetal variable: $97,5 \pm 19,0\%$, $73,6 \pm 17,0\%$ y $38,5 \pm 29,2\%$ en los sistemas de manejo con no laboreo, mínimo laboreo y laboreo, respectivamente (Tabla 4). Bajo no laboreo, la cobertura estaba compuesta principalmente por residuos vegetales: $62,7 \pm 14,8\%$. Bajo mínimo laboreo, la capa de residuos fue la más importante ($40,0 \pm 16,7\%$), pero se

encontraba cerca de la capa de plantas adventicias (33,6±18,0%). Bajo laboreo, la cubierta de plantas adventicias fue claramente superior: 25,4±26,1%.

Los cultivos de frijol presentaron también una cobertura variable: 52,2±16,6% y 21,9±9,6% en los sistemas de manejo con mínimo laboreo y laboreo, respectivamente (Tabla 4). La cobertura vegetal más importante también fue diferente en función del sistema de manejo, concretamente la cobertura de residuos vegetales en mínimo laboreo (35,4±17,2%) y de plantas adventicias en laboreo (12,2±8,6%).

Los restantes cultivos, todos bajo sistema de manejo del suelo con laboreo, presentaron una cobertura aún más contrastada: 39,3±26,1%, 76,7±31,2%, 87,9±33,2% y 120,1±29,3% en los cultivos de arveja, zanahoria, papa y brócoli, respectivamente. En todos los casos, las coberturas vegetales más importantes fueron la que proporcionaron las plantas adventicias (Tabla 4).

Tabla 4. Coberturas vegetales de los cultivos anuales bajo diferentes sistemas de manejo del suelo

Variables	Maíz NL (n = 12)	Maíz ML (n = 25)	Frijol ML (n = 16)	Brócoli L (n = 6)	Papa L (n = 6)	Arveja L (n = 22)	Maíz L (n = 98)	Frijol L (n = 22)	Zanahoria L (n = 7)
Cobva (%)	34,8±26,9	33,6±18,0	16,7±9,1	110,0±25,8	81,8±33,5	34,5±23,8	25,4±26,1	12,2±8,6	74,6±29,4
Cobrv (%)	62,7±14,8	40,0±16,7	35,4±17,2	10,1±5,9	6,2±3,3	4,8±4,6	13,1±11,5	9,6±6,0	2,1±3,1
Cobtot (%)	97,5±19,0	73,6±17,0	52,2±16,6	120,1±29,3	87,9±33,2	39,3±26,1	38,5±29,2	21,9±9,6	76,7±31,2

Leyenda: Sistemas de manejo del suelo: NL: no laboreo, ML: mínimo laboreo; L: laboreo.

Valores: media ± desviación estándar.

Cobva: cobertura de vegetación adventicia, Cobrv: cobertura de residuos vegetales, Cobtot: cobertura total (sumatorio vegetación adventicia y residuos vegetales).

Fuente: elaboración propia.

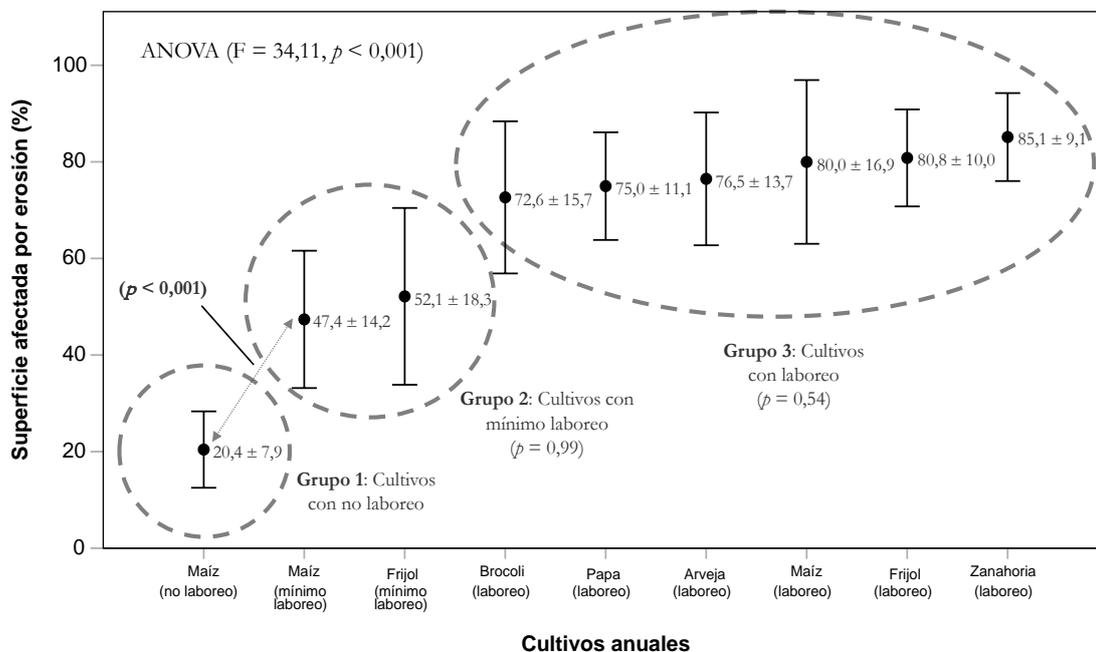
El análisis de varianza (ANOVA) reveló diferencias de erosión estadísticamente significativas, a un intervalo de confianza del 99%, entre los 9 cultivos analizados ($F = 34,11$, $p < 0,001$). El test HSD de Tukey estableció 3 grupos de cultivos homogéneos, cuyas medias no difieren significativamente (Figura 4). Los grupos que se han establecido se diferencian claramente por los sistemas de manejo del suelo. El grupo 1 corresponde al cultivo de maíz con no laboreo, donde se registró la superficie afectada por erosión más baja ($20,4 \pm 7,9\%$). El grupo 2 está constituido por los cultivos con mínimo laboreo de maíz y frijol, con unas tasas de erosión muy parecidas, entre $47,4 \pm 14,2\%$ y $52,1 \pm 18,3\%$ respectivamente. El grupo 3 está compuesto por todos los cultivos sometidos a laboreo convencional, con las cifras de erosión más altas, entre $72,6 \pm 15,7\%$ en el cultivo de brócoli y $85,1 \pm 9,1\%$ en el de zanahoria.

Los cultivos de maíz se encontraban principalmente afectados por erosión laminar: $17,8 \pm 8,1\%$, $9,9 \pm 16,6\%$ y $65,5 \pm 18,8\%$ en los sistemas de manejo con no laboreo, mínimo laboreo y laboreo, respectivamente (Tabla 5). Le siguió a gran distancia la erosión por salpicadura. La erosión en surcos sólo estuvo presente en el sistema de cultivo de laboreo ($0,5 \pm 1,3\%$). Por esta misma razón, sólo fue posible calcular las tasas de pérdidas de suelo en este sistema de cultivo: $2,3 \pm 7,5$ m³/ha. La superficie no afectada por erosión se elevó al $79,3 \pm 7,6\%$, $50,1 \pm 16,5\%$ y $18,8 \pm 16,5\%$ en el sistema de manejo con no laboreo, mínimo laboreo y laboreo, respectivamente. La cubierta de residuos vegetales tuvo especial relevancia en los sistemas de no laboreo ($70,4 \pm 15,3$) y mínimo laboreo ($33,9 \pm 21,3$), a diferencia del sistema de laboreo donde ambas cubiertas vegetales presentaron un peso muy similar: $7,3 \pm 10,0$ bajo plantas adventicias y $9,0 \pm 10,5$ bajo residuos vegetales.

Los cultivos de frijol estaban principalmente afectados por erosión por salpicadura: $43,8 \pm 18,2\%$ y $68,5 \pm 11,4\%$ en los sistemas de manejo con mínimo laboreo y laboreo, respectivamente. La erosión

laminar fue secundaria y la erosión en surcos no estuvo presente (Tabla 5). La superficie no afectada por erosión fue del $40,6 \pm 20,5\%$ y del $16,8 \pm 10,1\%$ en el sistema de manejo con mínimo laboreo y laboreo, respectivamente. En ambos casos, fue principalmente a consecuencia de la protección de la cubierta de residuos vegetales: $36,2 \pm 20,5\%$ en el sistema con mínimo laboreo y $11,0 \pm 7,4$ en el sistema con laboreo.

Figura 4. Superficie afectada por erosión hídrica en los cultivos anuales de las zonas de estudio



Leyenda: Valores: media \pm desviación estándar. Se incluye ANOVA y test HSD de Tukey de los subgrupos y entre cada uno de los sistemas de cultivo. Las diferencias no significativas entre cultivos no se han marcado.

Fuente: elaboración propia.

Los restantes cultivos anuales, todos bajo sistema de manejo de laboreo, se encontraban principalmente afectados por erosión laminar: $63,4 \pm 13,5\%$ en brócoli, $67,5 \pm 15,2\%$ en arveja, $69,2 \pm 9,9\%$ en papa y $82,2 \pm 7,9\%$ en zanahoria. La erosión por salpicadura fue secundaria y la erosión en surcos sólo estuvo presente en dos cultivos: $2,5 \pm 3,9\%$ en brócoli y $0,4 \pm 1,4\%$ en arveja (Tabla 5). Las tasas de pérdidas de suelo se registraron en tres de los cultivos analizados: $3,9 \pm 6,7$ m³/ha en brócoli, $4,8 \pm 9,0$ m³/ha en zanahoria y $7,5 \pm 13,1$ m³/ha en arveja. La superficie no afectada por erosión fue reducida, entre $13,4 \pm 8,8\%$ (zanahoria) y $26,2 \pm 16,4$ (brócoli), teniendo un especial protagonismo la cubierta de plantas adventicias (Tabla 5).

Tabla 5. Procesos superficiales que afectaron a los suelos en cultivos anuales bajo diferentes sistemas de manejo del suelo

Variables	Maíz NL (n = 12)	Maíz ML (n = 25)	Frijol ML (n = 16)	Brócoli L (n = 6)	Papa L (n = 6)	Arveja L (n = 22)	Maíz L (n = 98)	Frijol L (n = 22)	Zanahoria L (n = 7)
Ei (%)	2,6±1,5	9,9±16,6	43,8±18,2	6,7±3,4	5,8±7,2	8,6±8,1	14,0±16,0	68,5±11,4	3,0±2,9
El (%)	17,8±8,1	37,4±14,2	8,1±4,2	63,4±13,5	69,2±9,9	67,5±15,2	65,5±18,8	12,3±10,0	82,2±7,9
Es (%)	0	0	0	2,5±3,9	0	0,4±1,4	0,5±1,3	0	0
Nva (%)	7,9±8,9	15,8±15,3	4,3±3,2	12,9±8,6	12,5±12,4	12,0±11,3	7,3±10,0	2,9±5,7	10,7±6,8
Nrv (%)	70,4±15,3	33,9±21,3	36,2±20,5	10,8±7,9	4,9±2,5	4,3±4,8	9,0±10,5	11,0±7,4	2,1±3,3
Etot (%)	20,4±7,9	47,4±14,2	52,2±18,3	72,6±15,8	75,0±11,1	76,5±13,7	80,0±17,0	80,8±10,0	85,1±9,1
Ntot (%)	79,3±7,6	50,1±16,5	40,6±20,5	26,2±16,4	21,9±11,5	19,6±13,6	18,8±16,5	16,8±10,1	13,4±8,8
Etot (m ³ /ha)	0	0	0	3,9±6,7	0	7,5±13,1	2,3±7,5	0	4,8±9,0

Leyenda:

Ei: erosión por salpicadura (impacto de la lluvia), El: erosión laminar, Es: erosión en surcos, Nva: no erosión bajo cubierta de vegetación adventicia, Nrv: no erosión bajo cubierta de residuos vegetales, Etot: erosión total (en % y en m³/ha), Ntot: no erosión total.

Sistemas de manejo del suelo: NL: no laboreo, ML: mínimo laboreo; L: laboreo.

Valores: media ± desviación estándar. Unidades de medida: superficie de suelo afectada (%) y tasa de pérdida de suelo (m³/ha)

Fuente: elaboración propia.

3.2. Las buenas y malas prácticas agrícolas (B-MPA) para controlar la erosión hídrica del suelo

Los análisis de regresión (Figura 5) que se han realizado han permitido establecer las buenas (BPA) y malas prácticas agrícolas (MPA) que permitirían controlar la erosión y mejorar la sostenibilidad medioambiental de los usos del suelo analizados (tabla 6). Se ha establecido una tasa de erosión mínima del 25% como valor de referencia, por debajo del cual se puede considerar que se controla de manera efectiva la erosión. Este valor se acerca a la tasa de erosión que se registró en el uso agrícola del grupo 1, donde se alcanzó las pérdidas de suelos más bajas del conjunto de los usos analizados (Figura 4). Se trata de un valor empírico que facilita la toma de decisiones con la finalidad de mejorar la planificación de la actividad agraria, desde el punto de vista de la conservación del recurso suelo.

Los cultivos anuales de maíz, frijol, brócoli, papa, arveja y zanahoria requieren el uso de técnicas de no laboreo. El espeque o chuzo (bastón con punta) se recomienda para la siembra y el machete para el control de las plantas adventicias (BPA 1) (Tabla 6, Figura 6c). Por este motivo, no es apropiado el uso de técnicas de laboreo (arado, azada y machete muy superficial con contacto en el suelo) (MPA 1) (Figuras 6a y 6b) y la quema de los restos de la cosecha anterior en la fase de preparación del terreno para la siembra (MPA 2).

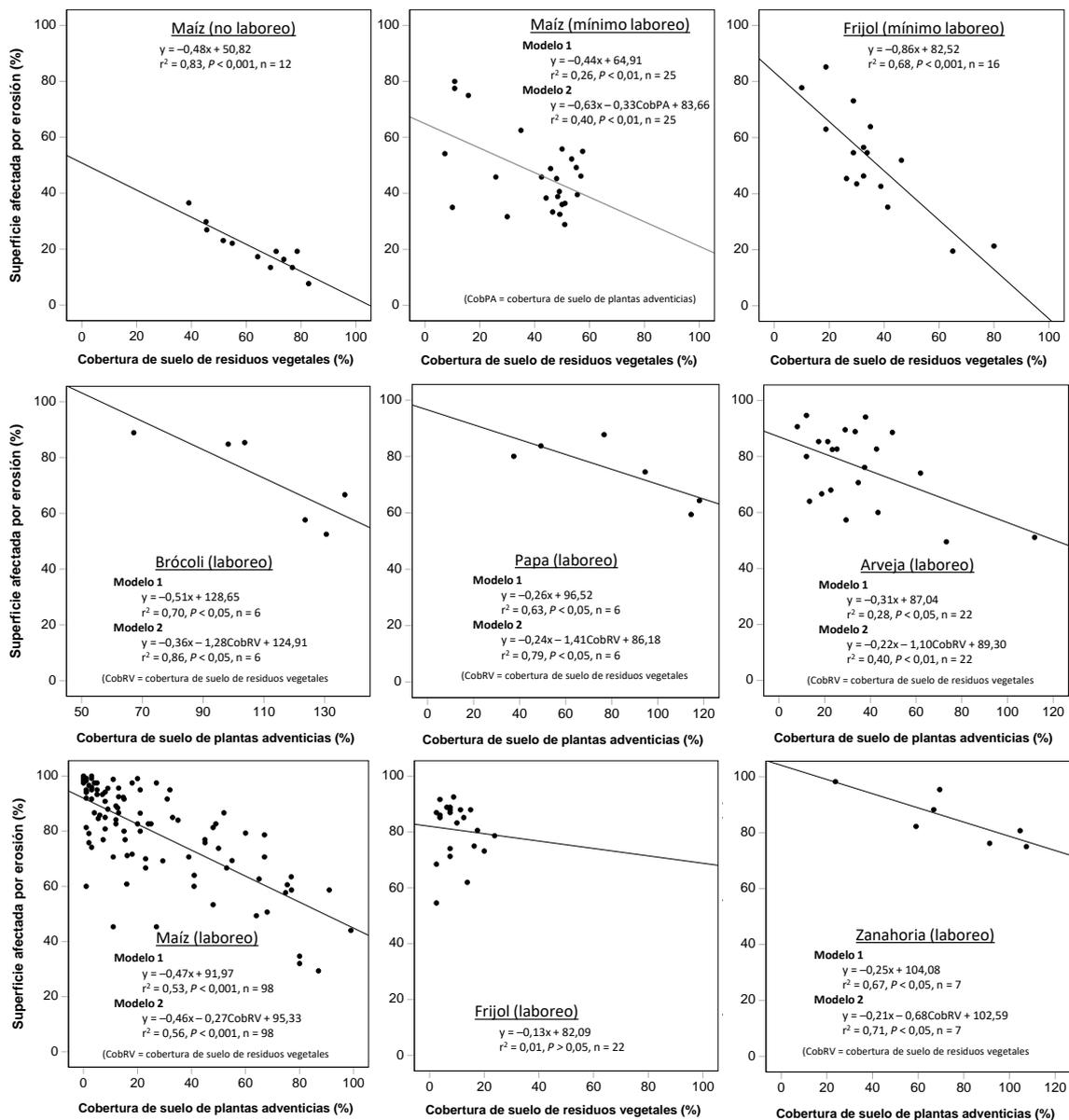
El manejo de las coberturas vegetales es clave en el control de la erosión en este tipo de cultivos. El cultivo de maíz con sistema de no laboreo requiere una cobertura de residuos vegetales superior al 54% (BPA 2, Figura 6d). El mismo cultivo con mínimo laboreo, requiere una cobertura de residuos vegetales superior al 90%; o bien de plantas adventicias superior al 50% y de residuos vegetales superior al 67% (BPA 3). Cuando este cultivo se practica con sistemas de laboreo, no es suficiente para controlar la

erosión mantener una cobertura de plantas adventicias del 100%, siendo necesario completarla con una cobertura de residuos vegetales superior al 90% (BPA 4) (Tabla 6).

El cultivo de frijol con sistema de mínimo laboreo, requiere mantener una cobertura de residuos vegetales superior al 67% (BPA 5, Figura 6e); mientras que, con laboreo, mantener una cobertura de plantas adventicias del 100% no asegura el control de la erosión (BPA 6). Es necesario seguir investigando en este sistema de cultivo, dado que las condiciones del estudio realizado fueron insuficientes para poder conocer con fiabilidad la influencia de la cobertura sobre la erosión (Blanco & Aguilar, 2016).

Los cultivos de brócoli, papa, arveja y zanahoria con sistema de laboreo requieren una combinación de coberturas de suelo para lograr un control efectivo de la erosión. Mantener una cobertura de plantas adventicias del 100% no asegura este control, por lo que es necesario acompañarla con una cubierta de residuos vegetales superior al 50% en cultivos de brócoli, al 27% en papa, al 39% en arveja y al 84% en zanahoria (BPA 7-10) (Tabla 6).

Figura 5. Diagramas de dispersión y ecuaciones de regresión de la relación entre la superficie afectada por erosión y la cobertura vegetal de suelo en los cultivos anuales de las zonas de estudio



Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. *Malas (MPA) y buenas prácticas agrícolas (BPA) para los cultivos anuales analizados*

M-BPA	Descripción
MPA 1	Utilizar técnicas de laboreo para la siembra y el control de las malas hierbas (arado, azada y cualquier tipo de machete con contacto en el suelo).
MPA 2	Quema de los residuos vegetales para la siembra.
BPA 1	Utilizar técnicas de no laboreo para la siembra y el control de las plantas adventicias. Se recomienda el espeque para la siembra y el machete para la limpieza de maleza.
BPA 2	Maíz con no laboreo: mantener una cobertura de residuos vegetales >54%.
BPA 3	Maíz con mínimo laboreo: mantener una cobertura de residuos vegetales >90%; o bien de plantas adventicias >50% y de residuos vegetales >67%.
BPA 4	Maíz con laboreo: mantener una cobertura de plantas adventicias del 100% no asegura el control de la erosión. Es necesario una cobertura de plantas adventicias del 100% y de residuos vegetales >90%.
BPA 5	Frijol con mínimo laboreo: mantener una cobertura de residuos vegetales >67%.
BPA 6	Frijol con laboreo: mantener una cobertura de plantas adventicias del 100% no asegura el control de la erosión. Es necesario seguir investigando en este sistema de cultivo.
BPA 7	Brócoli con laboreo: mantener una cobertura de plantas adventicias del 100% no asegura el control de la erosión. Es necesario una cobertura de plantas adventicias del 100% y >50% de residuos vegetales.
BPA 8	Papa con laboreo: mantener una cobertura de plantas adventicias del 100% no asegura el control de la erosión. Es necesario una cobertura de plantas adventicias del 100% y >27% de residuos vegetales.
BPA 9	Arveja con laboreo: mantener una cobertura de plantas adventicias del 100% no asegura el control de la erosión. Es necesario una cobertura de plantas adventicias del 100% y >39% de residuos vegetales.
BPA 10	Zanahoria con laboreo: mantener una cobertura de plantas adventicias del 100% no asegura el control de la erosión. Es necesario una cobertura de plantas adventicias del 100% y >84% de residuos vegetales.

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. *Algunas malas (MPA) y buenas prácticas agrícolas (BPA) aplicadas a cultivos anuales en las montañas de Centroamérica*



Leyenda:

- (a) MPA. Preparación del terreno con arado para la siembra de frijol (El Cuá, Jinotega, Nicaragua).
- (b) MPA. Preparación del terreno con azadón para la siembra de papa (Santa Apolonia, Chimaltenango, Guatemala).
- (c) BPA. Siembra de maíz con espeque (Olopa, Chiquimula, Guatemala).
- (d) BPA. Cultivo de maíz con no laboreo y elevada cobertura de residuos vegetales (>54%) (El Cuá, Jinotega, Nicaragua).
- (e) BPA. Cultivo de frijol con mínimo laboreo y elevada cobertura de residuos vegetales (>67%) (El Cuá, Jinotega, Nicaragua).

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Las investigaciones realizadas mostraron que los factores de erodabilidad de los sistemas agrarios analizados en las montañas de Guatemala y Nicaragua fueron el sistema de manejo del suelo y la cobertura vegetal. Los sistemas de manejo con laboreo (arado y azadón), mínimo laboreo y no laboreo (espeque o chuzo) han tenido una marcada influencia en las tasas de erosión registradas. Por otra parte, la cobertura de residuos vegetales y de plantas adventicias también mostraron una influencia contrastada en el control de la erosión.

Las tasas de erosión más reducidas se registraron en el cultivo de maíz con sistema de manejo de no laboreo. Estos resultados están relacionados con la mejora de la estructura (bien desarrollada y estable) y con la mayor macroporosidad de la superficie del suelo que se dan bajo estas condiciones (Kreiselmeier et al., 2020; Zhang et al., 2020). Este manejo agrícola suele estar asociado con la conservación de los residuos vegetales en la superficie del suelo, lo que incrementa el contenido de materia orgánica. A su vez, al no alterar la estructura del suelo se reduce la oxidación de la materia orgánica, lo que aumenta la estabilidad estructural (Turmel et al., 2015; Six et al., 2004). La combinación de todos estos factores facilita la infiltración y reducen la escorrentía y, por lo tanto, las pérdidas de suelo.

Los resultados obtenidos mostraron que la cobertura vegetal presentó también una influencia muy destacada para controlar la erosión. El papel de la cobertura vegetal como factor de control de la erosión está determinado por su función como pantalla protectora frente al impacto de la lluvia y como obstáculo a la escorrentía superficial (Prosdocimi et al., 2016). Es decir, la vegetación intercepta las gotas de lluvia, altera el tamaño de las gotas y reduce o neutraliza su energía. Esta acción es de gran importancia para reducir la erosión, dado que evita la formación de costras superficiales y favorece la infiltración (Gholami et al., 2013). El impacto de la lluvia sobre el suelo descubierto destruye la estructura superficial y genera partículas sueltas y microagregados que son dispersados en la superficie. Éstas, cuando se secan, forman costras de escasa permeabilidad que deterioran las propiedades hidrológicas del suelo y favorece la escorrentía superficial. Al mismo tiempo, la cobertura vegetal reduce la velocidad de escorrentía y, por lo tanto, la competencia de arrastre de las partículas de suelo (Leys et al., 2010).

La cobertura de residuos vegetales ha tenido una influencia importante en los cultivos con no laboreo y mínimo laboreo debido a su mayor presencia en estos tipos de manejo del suelo. Por el contrario, en los cultivos con laboreo las plantas adventicias tuvieron la influencia más destacada, debido a la escasa presencia de residuos vegetales en estas situaciones de manejo del suelo. Las BPA que se han establecido partiendo de estos resultados, mostraron que la cobertura vegetal compuesta por residuos vegetales tuvo un papel más destacado para reducir la erosión que la cubierta de plantas adventicias. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Blanco y Enríquez (2018), quienes mostraron que la eficacia de la cubierta de plantas adventicias para proteger el suelo de la erosión en cultivos de maíz era inferior que la proporcionada por la cubierta de residuos. Estos resultados se pueden explicar atendiendo a las funciones específicas de cada tipo de cobertura. Es bien sabido que la cobertura de plantas adventicias protege el suelo contra el impacto de la lluvia (Van Dijk et al., 1996), pero no es tan apropiada como la cobertura de residuos frente a la escorrentía, dado que esta capa es más efectiva para reducir el flujo de agua superficial y favorecer la infiltración.

5. CONCLUSIONES

Los factores de erodabilidad en los cultivos anuales analizados han sido el sistema de manejo del suelo y la cobertura vegetal. Los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas han mostrado la existencia de un diferente comportamiento erosivo entre estos cultivos en las montañas de Guatemala y Nicaragua. Se han podido establecer tres grupos de usos del suelo claramente diferenciados por las tasas de erosión. Los sistemas de manejo del suelo que han presentado un control más efectivo de las pérdidas de suelo han sido los cultivos de maíz con sistema de no laboreo, con una superficie afectada por erosión del 20%. Le siguieron los cultivos de maíz y frijol con sistema de mínimo laboreo, con unas tasas entre el

47 y el 52%. Finalmente, los cultivos anuales de brócoli, papa, arveja, maíz, frijol y zanahoria, con sistema de laboreo mostraron las mayores tasas de erosión, entre el 72 y el 85%.

Las investigaciones realizadas en este último grupo, a excepción del cultivo de maíz, no han sido concluyentes debido al reducido tamaño de las muestras. Sería necesario realizar nuevas investigaciones en diferentes sistemas de manejo del suelo y en diferentes intervalos de cobertura vegetal para responder de manera satisfactoria al control de la erosión en este tipo de cultivos.

Los estudios realizados han permitido establecer las buenas (BPA) y malas (MPA) prácticas agrarias que permitirán controlar la erosión y mejorar la sostenibilidad medioambiental. Se espera que la implementación de estas medidas de control de la degradación del suelo pueda generar importantes sinergias en el desarrollo integral económico, social y ambiental de las comunidades locales de estos espacios montañosos fuertemente poblados. Todos estos aspectos constituyen los componentes fundamentales del desarrollo sostenible.



Agradecimientos: Este estudio se ha realizado en el marco del Proyecto “Transferencia-seguimiento-evaluación de medidas de control de la erosión del suelo para el desarrollo agrícola sostenible en comunidades rurales con alta vulnerabilidad al cambio climático en Chimaltenango (Guatemala)” (Ref. 2020UI005), convocatoria 2021-2023, financiado por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional (AACID), España, y por la Asociación para el Bienestar, el Progreso y el Desarrollo, Guatemala.

Declaración responsable: Las/os autoras/es declaran que no existe ningún conflicto de interés en relación a la publicación de este artículo.

6. REFERENCIAS

- Banco Mundial (2023, 17 de marzo). Base de datos sobre salud, nutrición y población del Banco Mundial. <http://databank.bancomundial.org/data/reports.aspx?source=estad%C3%ADstics-sobresalud,nutrici%C3%B3n-y-poblaci%C3%B3n>
- Blanco, R., & Aguilar, A. (2016). The erosion threshold for a sustainable agriculture in cultures of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under conventional tillage and no-tillage in Northern Nicaragua. *Soil Use and Management*, 32(3), 368-380. <https://doi.org/10.1111/sum.12271>
- Blanco, R. (2018). An erosion control and soil conservation method for agrarian uses based on determining the erosion threshold. *MethodsX*, 5, 761-772. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.07.007>
- Blanco, R., & Enríquez, F. (2018). Erosion Control in the Sustainable Cultivation of Maize (*Zea mays* L.) and Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) at Two Stages of the Agricultural Cycle in Southern Guatemala. *Sustainability*, 10(12), 4654. <https://doi.org/10.3390/su10124654>
- Blanco, R., Aguilar, A., & Lima, F. (2021a). Impact of Weed Control by Hand Tools on Soil Erosion under a No-Tillage System Cultivation. *Agronomy*, 11(5), 974. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050974>
- Blanco, R., Enríquez, F., & Lima, F. (2021b). 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115336>
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J.E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., & Ballabio C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-

- 2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 117(36), 21994-22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- Ebel, R. (2020). Chinampas: An Urban Farming Model of the Aztecs and a Potential Solution for Modern Megalopolis. *HortTechnology*, 30(1), 13-19. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04310-19>
- FAO (2017). *Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. FAO. <https://www.fao.org/3/i6874es/I6874ES.pdf>
- FAO (2023, 10 de marzo). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- 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. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>
- Gholami, L., Sadeghi, S.H., & Homae, M. (2013). Straw mulching effect on splash erosion, runoff and sediment yield from eroded plots. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1), 268-278. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0271a>
- Herweg, K. (1996). *Field manual for assessment of current erosion damage*. Soil Conservation Research Programme, University of Berne. https://www.researchgate.net/profile/Karl-Herweg/publication/339788822_Assessment_of_Current_Erosion_Damage/links/5e662232299bf1744f6ba8ad/Assessment-of-Current-Erosion-Damage.pdf
- Hudson, N.W. (1993). *Field Measurement of Soil Erosion and Runoff*. FAO Soils Bulletin. <https://www.fao.org/3/T0848E/T0848E00.htm>
- Illgner, P.M. (2008). *Land Degradation Assessment – Kalukundi (Democratic Republic of the Congo)* (Specialist report for Envirolution Consulting (Pty) Ltd).
- IPCC (2018). Chapter 3: Impacts of 1.5 °C Global Warming on Natural and Human Systems. Intergovernmental Panel on Climate Change in *Global Warming of 1.5 °C*. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/>
- Kang, M.S., & Banga, S.S. (2013). Global agriculture and climate change. *Journal of Crop Improvement*, 27, 667–692. <https://doi.org/10.1080/15427528.2013.845051>
- Kreiselmeier, J., Chandrasekhar, P., Weninger, T., Schwen, A., Julich, S., Feger, K.H., & Schwarzel, K. (2020). Temporal variations of the hydraulic conductivity characteristic under conventional and conservation tillage. *Geoderma*, 362, 114127. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114127>
- Kumari R.K., de Sherbinin, A., Jones, B., Bergmann, J., Clement, V., Ober, K., Schewe, J., Adamo, S., McCusker, B., Heuser, S., & Midgley, A. (2018). *Groundswell: Preparing for Internal Climate Migration*. The World Bank. <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2018/03/19/groundswell---preparing-for-internal-climate-migration>
- Ley, A., Govers, G., Gillijns, K., Berckmoes, E., & Takken, I. (2010). Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: The role of residue cover. *Journal of Hydrology*, 390, 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.034>
- Morgan, R.P.C. (2005). *Soil erosion and conservation*, Third. Blackwell Publishing Ltd.
- Murty, D., Kirschbaum, M.U.F., McMurtrie, R.E., & McGilvray, H. (2002). Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 8, 105-123. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2001.00459.x>

- Mutekanga, F.P., Visser, S.M., & Stroosnijder, L. (2010). A tool for rapid assessment of erosion risk to support decision-making and policy development at the Ngenge watershed in Uganda. *Geoderma*, 160, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.011>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Jae Lim, K., Lim, J., Yang, J.E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Hamidreza S., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G., Krasnov, S., Gorobets, A., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., Hoyos, N., Naipal, V., Tarso, P., Oliveira, S., Bonilla, C., Meddi, M., Nel, W., Al Dashti, H., Boni, M., Diodato, N., Van Oost, K., Nearing, M., & Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific reports*, 7, 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
- Patel, R. (2013). The Long Green Revolution. *The Journal of Peasant Studies*, 40(1), 1-63. <https://doi.org/10.1080/03066150.2012.719224>
- Piñeiro, M., Trigo, E., & Fiorentino, R. (1979). Technical change in Latin American agriculture. *Food Policy*, 4, 169-177. [https://doi.org/10.1016/0306-9192\(79\)90097-6](https://doi.org/10.1016/0306-9192(79)90097-6)
- Prosdocimi, M., Tarolli, P., & Cerdà, A. (2016). Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 161, 191-203. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.006>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.006>
- Soto, F., & Saramago, A.P. (2019). *Migración y desarrollo rural en América Latina y el Caribe*. FAO. <https://www.fao.org/3/ca5107es/ca5107es.pdf>
- Stocking, M., & Murnaghan, N. (2001). *Handbook for the Field Assessment of Land Degradation*. Earthscan Pub. Ltd. <https://doi.org/10.4324/9781849776219>
- Sun, Y., Zeng, Y., Shi, Q., Pan, X., & Huang, S. (2015). No-tillage controls on runoff: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 153, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.007>
- Turmel, M.S., Speratti, A., Baudron, F., Verhulst, N., & Govaerts, B. (2015). Crop residue management and soil health: a systems analysis. *Agricultural Systems*, 134, 6-16. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.009>
- Yu, Z., Zhang, J., Zhang, C., Xin, X., & Li, H. (2017). The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability. *Soil and Tillage Research*, 174, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.004>
- Zhang, Y., Zhao, W., Li, X., Jia, A., & Kang, W. (2020). Contribution of soil macropores to water infiltration across different land use types in a desert–oasis ecoregion. *Land Degradation and Development*, 32(4), 1751-1760. <https://doi.org/10.1002/ldr.3823>