

EN

Gullies and their control in an agricultural landscape in the Sierra Madre de Chiapas

ES

Cárcavas y su control en un paisaje agropecuario de la Sierra Madre de Chiapas

Juan Alberto Rodríguez Morales; Romeo de Jesús Barrios Calderón*; Fernando Rudiel Roblero de León; Pablo Marroquín Morales; Dorian de Jesús Pimienta de la Torre; Jorge Reyes Reyes; Magdiel Gabriel Hernández

Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agrícolas, Cuerpo Académico Recursos Forestales y Grupo de Investigación en Sistemas Agrícola y Forestal. Entronque carretera Costera y Pueblo de Huehuetán. Huehuetán, Chiapas, México. C.P. 30660.

Abstract

*Corresponding author:
romeo.barrios@unach.mx

ORCID: 0000-0002-8025-6369

Received: February 27, 2024
Accepted: September 16, 2024

DOI:
10.5154/r.rchsatsat.2024.04.07

Soil erosion in some agricultural landscapes has resulted in the formation of gullies. These incisions or ditches produced in soils by the action of runoff are considered a type of water erosion. In Cerro de las Cruces within the Sierra Madre de Chiapas Region, anthropogenic landscapes with high levels of erosion and gully formation predominate. In order to evaluate the erosion rate at slope and gully level during a rainy period and to determine the efficiency of silt retention in stone dams, experimental plots containing erosion stakes were established in strategic areas of the slopes. To do this, two plots were drawn measuring 3 m long and 1.2 m wide. The stakes were spaced 30 cm apart along the length of the plot and 40 cm apart along the width, considering maximum variance and a sampling error of 5 %; each plot was established randomly with a distance of 30 m between plots. The results show that livestock use is a factor in accelerated degradation. The mean erosion calculated was 106.79 t·ha⁻¹·year⁻¹; the mobilized soil was 233.4 t·ha⁻¹·year⁻¹. The constructed dams retained about 73 % of the total eroded material at slope level and showed efficiencies of 68 to 94 % in silt retention. The information obtained allows the design of gully control and rehabilitation strategies.

Keywords: Silting, erosion stakes, water erosion, erosion rate, ditches.

Resumen

La erosión de suelos en algunos paisajes agropecuarios ha dado lugar a la formación de cárcavas. Estas incisiones o zanjas producidas en los suelos por la acción de la escorrentía son consideradas un tipo de erosión hídrica. En el Cerro de las Cruces dentro de la Región Sierra Madre de Chiapas, predominan paisajes antropogénicos con altos niveles de erosión y formación de cárcavas. Con el objetivo de evaluar la tasa de erosión a nivel de ladera y cárcavas durante un periodo de lluvias y determinar la eficiencia en la retención de azolves en presas de piedra acomodada, se establecieron parcelas experimentales de clavos de erosión en áreas estratégicas de las laderas. Para ello, se trazaron dos parcelas con longitud de 3 m y ancho de 1.2 m, los clavos se distanciaron a 30 cm en el largo de la parcela y a 40 cm en el ancho, considerando varianza máxima y un error de muestreo de 5 %; cada parcela se instaló en forma aleatoria con una distancia de 30 m entre parcelas. Los resultados muestran que el uso pecuario es factor de la degradación acelerada. La erosión media calculada fue de 106.79 t·ha⁻¹·año⁻¹; el suelo movilizado fue de 233.4 t·ha⁻¹·año⁻¹. Las presas construidas retuvieron cerca del 73 % del total de material erosionado a nivel de ladera y mostraron eficiencias de 68 a 94 % en la retención de azolves. La información obtenida permite diseñar estrategias de control y rehabilitación de las cárcavas.

Palabras clave: Azolvamiento, clavos de erosión, erosión hídrica, tasa de erosión, zanjas.



Please cite this article as follows (APA 7): Rodríguez Morales, J.A., Barrios Calderón, R. J., Roblero de León, F. R., Marroquín Morales, P., Pimienta de la Torre, D. J., Reyes Reyes, J., & Hernández, M. G. (2024). Gullies and their control in an agricultural landscape in the Sierra Madre de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 4(2). doi: <https://doi.org/10.5154/10.5154/r.rchsatsat.2024.04.07>

Introduction

Inappropriate soil use and management has led to soil erosion and the loss of the environmental services it provides (Alvarado et al., 2007). Erosion consists of the negative alteration of ecosystem functions leading to the degradation of soils, sediments, regolith, rock fragments and the landscape, through different external means such as wind, ice and water (Pidwirny, 2006; SIAC, 2014). FAO (2009) points out that soil erosion is a process involving loss of layers or movement of soil particles, caused by natural external agents (wind, water, ice) or anthropogenic agents. Some consequences of soil erosion are: deficit in the regulation of the hydrological cycle, low-yield agricultural and livestock production, deterioration of vegetation cover, loss of biodiversity, depreciation of the useful life of hydraulics, sedimentation of rivers and destabilization of slopes, which leads to human losses, deterioration of infrastructure and reduction of agricultural land (Montes-León et al., 2011).

Natural erosion processes occur progressively and violently, affecting geological material through a process of slow and increasing soil weathering (Camargo et al., 2017). According to FAO (2015), it takes thousands of years to form one centimeter of soil, yet it can be lost in a very short period of time, even during a single rainy episode. The duration of formation is highly variable and depends on pedogenetic processes that act accordingly and give rise to a great complexity of soils on the Earth's surface (Fitz Patrick, 2011). On a global scale, erosion by water action or water erosion is the most common form of land degradation (Li & Fang, 2016; Aramayo et al., 2024). The process of water erosion begins when rainfall impacts directly on soil devoid of vegetation, causing the disintegration of soil aggregates and the detachment of particles (sheet erosion) that are dragged down the slopes by the surface runoff generated by the storm. If the process is repetitive, shallow and wide furrows are formed which, over time, can evolve to depths and widths of several meters, called gullies. These represent an advanced form of water erosion, which involves the sliding or movement of large volumes of soil and, therefore, deserve immediate attention (Martínez et al., 2009).

Gullies are channels or accumulated water flows in which runoff flows when a rainfall event occurs or immediately after it (Bravo-Espinosa et al, 2010; Rivas, 2023). Gullying is one of the main soil loss processes (Fernández et al., 2020) and the main mechanisms for gully growth in this type of environment are landslides or detachment of blocks on the slopes (growth in

Introducción

El uso y manejo inadecuado del suelo ha provocado su erosión y la pérdida de los servicios ambientales que presta (Alvarado et al., 2007). La erosión consiste en la alteración negativa de las funciones ecosistémicas que conllevan a la degradación de los suelos, los sedimentos, el regolito, los fragmentos de roca y el paisaje, a través de distintos medios externos como el viento, el hielo y el agua (Pidwirny, 2006; SIAC, 2014). La FAO (2009) señala que la erosión de un determinado suelo es un proceso de pérdida de capas o movimiento de partículas de éste, ocasionado por agentes externos naturales (viento, agua, hielo) o agentes antrópicos. Algunas consecuencias de la erosión de suelos son: el déficit en la regulación del ciclo hidrológico, producción agrícola y pecuaria de bajo rendimiento, deterioro de la cubierta vegetal, pérdidas de biodiversidad, depreciación de la vida útil en hidráulica, sedimentación de ríos y desestabilización de laderas, lo cual conduce a pérdidas humanas, deterioro de infraestructura y disminución de tierras agrícolas (Montes-León et al., 2011).

Los procesos de erosión natural se presentan de manera progresiva y violenta afectando el material geológico mediante un proceso de desgaste lento y creciente de los suelos (Camargo et al., 2017). Según la FAO (2015) se necesitan miles de años para formar un centímetro de suelo, pudiéndose perder en tan poco tiempo, incluso en un episodio de lluvia. La duración de la formación es muy variable y depende de los procesos pedogenéticos que actúan en consecuencia y dan lugar a una gran complejidad de suelos en la superficie terrestre (Fitz Patrick, 2011). A escala global, la erosión por acción del agua o erosión hídrica es la forma más común de degradación de tierras (Li & Fang, 2016; Aramayo et al., 2024). El proceso de erosión hídrica se inicia al impactar la lluvia directamente sobre el suelo desprovisto de vegetación provocando disgregación de los agregados del suelo y el desprendimiento de partículas (erosión laminar) que son arrastradas laderas abajo por el escurrimiento superficial generado por la tormenta. Si el proceso es repetitivo, se llegan a formar surcos de poca profundidad y anchura que, con el tiempo, pueden evolucionar hasta profundidades y anchuras de varios metros, denominadas cárcavas, estas representan una forma avanzada de la erosión hídrica, que implica el deslizamiento o movimiento de grandes volúmenes de suelo, por lo que merecen atención inmediata (Martínez et al., 2009).

Las cárcavas son canales o flujos de agua acumulados en las que fluye la escorrentía cuando se presenta un evento pluvial o inmediatamente después de este (Bravo-Espinosa et al, 2010; Rivas, 2023). El carcavamiento es uno de los principales procesos de pérdida de suelo

width), as well as concentrated water flow processes (growth in depth or silting up) (Castillo & Gómez, 2016). Considering the origin and characteristics of gullies is the basis for properly managing prevention in their initial stages, management and control (Rivas, 2023). Gullies are formed as a result of anthropogenic activity (poor land use, overgrazing, road openings) and other physical, hydrological, geological and ecological factors (vegetation deterioration, rainfall intensity and amount, topographic alterations, watershed size and shape, slope gradient and length, and soil characteristics) (Bravo-Espinosa et al., 2010; Yu et al., 2020; Guan et al., 2021). Gully erosion impacts the surrounding area, minimizing the agricultural, grazing and forestry areas; it also affects downstream infrastructure, pollutes surface water bodies and lowers the water table of streams (Martineli & Prado, 2007). Gully growth can occur through three main mechanisms: growth downstream of its headwaters, channel widening and its deepening. When the flow overcomes the headscarp, a continuous eddy occurs at the base of the gully, which leads to its scouring (Díaz-Martínez, 2017).

Gully erosion is a highly complex process (Shellberg et al., 2013; Kou et al., 2020), and although regional patterns of erosion and sedimentation in gullies remain of great interest, most of this research has focused on studying individual basins or large-scale measurements that ignore small-scale or microtopographic processes (De Vente & Poesen, 2005).

The gullies in the Cerro de las Cruces area, in the municipality of Motozintla, are a manifestation of the advanced state of degradation of lands that are highly suitable for forestry; these have been forming for two decades, without any government institution or agency addressing the problem. The severity of the problem is evident; however, quantitatively, the magnitude and intensity of the erosive process is unknown. This implies the need to know the rate at which soil losses occur, and based on this, propose techniques for the control and restoration of gullies by integrating strategies to mitigate the environmental problem. For this reason, the present study aims to: i) analyze the rainfall during the study months (April-October, 2022) and compare it with the historical rainfall record in the study area; ii) evaluate the erosion rate at slope and gully level during a rainy period and the efficiency of silt retention in stone-built dams, as a basis for proposing efficient measures to control water erosion. In this way, this research constitutes a first phase for future hydrological-forest restoration works in the Cerro de las Cruces area of the Sierra Madre de Chiapas.

(Fernández et al., 2020) y los mecanismos principales para el crecimiento de las cárcavas en este tipo de ambientes son los deslizamientos o desprendimientos de bloques en los taludes (crecimiento en anchura), así como los procesos de flujo hídrico concentrado (crecimiento en profundidad o encajamiento) (Castillo & Gómez, 2016). Tener en cuenta el origen y características de las cárcavas es la base para gestionar adecuadamente la prevención en sus etapas iniciales, el manejo y su control (Rivas, 2023). Las cárcavas se forman a causa de la actividad antrópica (mal uso del suelo, sobrepastoreo, apertura de caminos) y otros factores físicos, hidrológicos, geológicos y ecológicos (deterioro de la vegetación, intensidad y cantidad de lluvia, alteraciones topográficas, tamaño y forma de la cuenca, gradiente y longitud de laderas y características del suelo) (Bravo-Espinosa et al., 2010; Yu et al., 2020; Guan et al., 2021). La erosión en cárcavas impacta su área cercana, minimizando la superficie agrícola, de pastoreo y forestal; además, afecta la infraestructura ubicada aguas abajo, los cuerpos de agua superficiales se contaminan y el nivel freático de las corrientes se debilita (Martineli & Prado, 2007). El crecimiento de una cárcava puede producirse a través de tres mecanismos principales: el crecimiento aguas abajo de su cabecera, el ensanchamiento del cauce y su profundización. Cuando el flujo salva el escarpe de la cabecera, se produce un continuo remolino sobre la base de este que da lugar a su socavación (Díaz-Martínez, 2017).

La erosión de cárcavas es un proceso de gran complejidad (Shellberg et al., 2013; Kou et al., 2020), y aunque los patrones regionales de erosión y sedimentación en cárcavas siguen siendo de gran interés, la mayor parte de estas investigaciones se han centrado en estudiar cuencas individuales o mediciones a gran escala que ignoran los procesos a pequeña escala o a nivel microtopográfico (De Vente & Poesen, 2005).

Las cárcavas en el área del Cerro de las Cruces, municipio de Motozintla, son una manifestación del estado avanzado de degradación de los terrenos de aptitud netamente forestal; estas se han formado desde hace dos décadas, sin que ninguna institución o dependencia de gobierno atienda el problema. Resulta evidente la gravedad del problema, sin embargo, cuantitativamente se desconoce la magnitud e intensidad del proceso erosivo. Esto implica conocer la tasa a la que ocurren las pérdidas de suelo, y en función de ésta, proponer técnicas para el control y restauración de las cárcavas mediante la integración de estrategias que mitiguen la problemática ambiental. Por esta razón, el presente estudio tiene como objetivos: i) analizar la precipitación

Materials and methods

Study area

The study area is located in a place called “Cerro de las Cruces” in the Buenos Aires ejido, municipality of Motozintla de Mendoza, Chiapas, geographically located at coordinates (UTM) -92.279444 and 15.331111 at an elevation of 1880 meters (Figure 1).

The study area has a predominantly Af climate, corresponding to humid temperate with abundant rainfall in summer (PDM, 2012). The Cerro de las Cruces territory is home to the watershed that delimits Hydrological Region No. 30- Grijalva-Usumacinta (upper Grijalva) and Hydrological Region No. 23- Chiapas Coast. In particular, the Huixtla River basin begins in these areas, which is fed downstream by a network of powerful tributaries. Thus, the hydrography of the area is shaped by two slopes: one of them drains into the Pacific Ocean and the other into the Gulf of Mexico.

Methodology

Study period and rainfall evaluation

This research was conducted in the period from April to November 2022. Therefore, a rainfall distribution analysis was carried out for the period between April and October 2022. Subsequently, a historical analysis

pluvial durante los meses de estudio (abril-octubre, 2022) y su comparación con respecto al registro histórico de precipitaciones en la zona de estudio; ii) evaluar la tasa de erosión a nivel de ladera y cárcavas durante un periodo de lluvias y la eficiencia en la retención de azolves en presas de piedra acomodada, como base para proponer medidas eficientes en el control de la erosión hídrica. De esta manera, esta investigación constituye una primera fase para futuros trabajos de restauración hidrológica-forestal del Cerro de las Cruces, en la Sierra Madre de Chiapas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el lugar denominado “Cerro de las Cruces” del ejido Buenos Aires, municipio de Motozintla de Mendoza, Chiapas, ubicado geográficamente en las coordenadas (UTM) -92.279444 y 15.331111 a una altitud de 1880 metros (Figura 1).

El clima predominante en el sitio de estudio es el Af que corresponde al templado húmedo con lluvias abundantes en verano (PDM, 2012). En el territorio del Cerro de las Cruces se configura el parteaguas que delimita la región hidrológica No. 30- Grijalva-Usumacinta (alto Grijalva) y la región hidrológica No. 23- Costa de Chiapas. Particularmente, en estas áreas

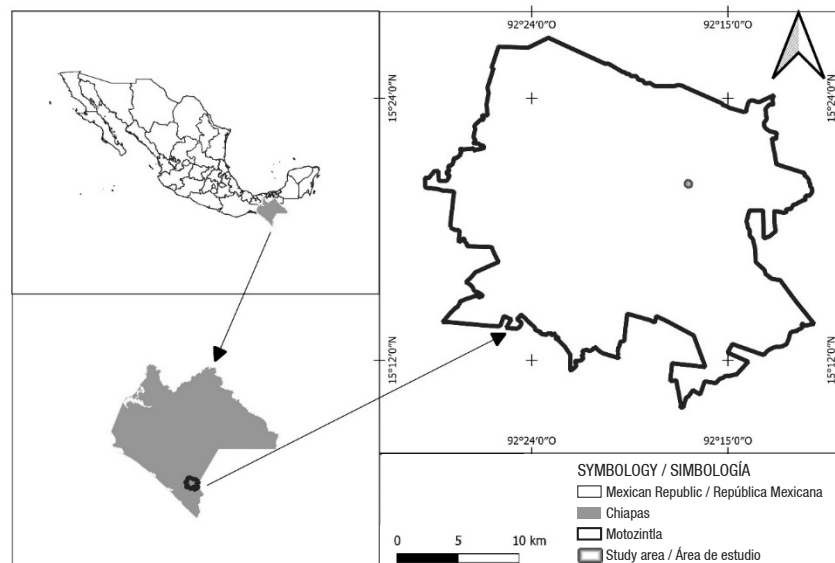


Figure 1. Location of the study area
Figura 1. Localización del área de estudio

of rainfall behavior was performed in a time window between the years 1951 and 2010 from Meteorological Station 7333-Buenos Aires (half a kilometer away in a straight line from the study site). With the data obtained during the evaluation period, a comparative analysis of rainfall in the study year (2022) was made with respect to historical records.

Soil losses

To assess soil losses due to water erosion, “experimental erosion stake plots” were established in strategic slope areas at the end of April 2022. The erosion stake method consists of creating rectangular plots in which “stakes” are installed to mark the initial soil line; the stakes are measured at regular intervals in order to assess the erosion or sedimentation caused by rainfall events during that period. This allows establishing a balance between soil losses and inputs in order to make more realistic estimates (Pizarro & Cuitiño, 2002).

The methodology used for the dimensions of the erosion stake plots was as follows: i) two plots were drawn with a length of 3 m and a width of 1.2 m (Figure 2), ii) the stakes were spaced 30 cm apart along the length of the plot and 40 cm apart along the width, considering maximum variance and a sampling error of 5 %, and iii) each plot was randomly established in the study site, with the distance between each plot being 30 meters.

Stakes of 30 cm in length were used, which were painted halfway (15 cm) to mark the initial ground level or reference height on each stake, and, in comparison

inicia la cuenca del Río Huixtla, que aguas abajo es alimentado por una red de caudalosos tributarios. Así, la hidrografía de la zona se configura por dos vertientes: una de ellas drena hacia el Océano Pacífico y la otra vierte sus aguas hacia el Golfo de México.

Metodología

Período de estudio y evaluación de la precipitación pluvial

Esta investigación se realizó en el periodo comprendido del mes de abril a noviembre de 2022. Por lo tanto, se realizó un análisis de distribución de las precipitaciones entre los meses de abril y octubre de 2022. Posteriormente, se realizó un análisis histórico del comportamiento de la precipitación pluvial en una ventana de tiempo entre los años 1951 y 2010 de la Estación Meteorológica 7333-Buenos Aires (distante medio kilómetro en línea recta del sitio de estudio). Con los datos obtenidos durante el periodo de evaluación, se realizó un análisis comparativo de las lluvias en el año de estudio (2022) con respecto a los registros históricos.

Pérdidas de suelo

Para evaluar las pérdidas de suelo por erosión hídrica, se establecieron a finales del mes de abril de 2022, “parcelas experimentales de clavos de erosión” en áreas estratégicas de las laderas. El método de clavos de erosión consiste en realizar parcelas rectangulares en las cuales se instalan “clavos” que marcan la línea inicial del suelo, cuya medición se efectúa a intervalos regulares con el objetivo de evaluar la erosión o la



Figure 2. Installation of experimental erosion stake plots.
Figura 2. Instalación de parcelas experimentales de clavos de erosión.

with this, to measure the increases or decreases in heights on each of the stakes. In each plot, height measurements were made on the marked stakes to establish an average of erosion and sedimentation at the end of the rainy season, and thus know the rate of the erosive process in the study area. On the other hand, at the beginning of July, three stone dams were built to evaluate silt retention in the throat of gully two. This type of construction was chosen due to the availability of the material at the study site. In each of them, monthly silt retention measurements were taken and a record was kept for each work throughout the entire rainy season (May to November 2022). The construction procedure for the conservation works is summarized and illustrated in Figure 3, based on the CONAFOR (2016) construction methodology.

Variables evaluated

To determine the amount of eroded or sedimented soil at each sampling point on the slopes, erosion stakes were used. The variation in their exposed height (Δh in mm) was determined between consecutive periods of measurement on stakes installed on the two slopes on both sides of each gully.

sedimentación producida por los eventos de lluvia en dicho periodo. Lo anterior permite establecer un balance entre pérdidas y entradas de suelo para realizar estimaciones más reales (Pizarro & Cuitiño, 2002).

La metodología utilizada para las dimensiones de las parcelas de clavos de erosión fue la siguiente: i) Se trazaron dos parcelas con longitud de 3 m y ancho de 1.2 m (Figura 2), ii) los clavos se distanciaron a 30 cm en el largo de la parcela y a 40 cm en el ancho, considerando varianza máxima y un error de muestreo de 5 %, y iii) cada parcela se instaló en forma aleatoria en el lugar de estudio, la distancia entre cada parcela fue de 30 metros.

Se utilizaron clavos de 30 cm de longitud que fueron pintados a la mitad (15 cm) para marcar el nivel inicial del suelo o altura de referencia en cada clavo, y en comparación con ésta, medir los incrementos o decrementos de alturas en cada uno de los clavos. En cada parcela se realizaron las mediciones de altura en los clavos marcados para establecer un promedio de erosión y sedimentación al final del periodo de lluvias, y así conocer la tasa del proceso erosivo en el área de estudio. Por otro lado, a principios del mes de julio se construyeron tres presas de piedra acomodada para evaluar la retención



Figure 3. Procedure for building a dam with arranged stone: A) Layout, B) Embedding in the bed and margins of the gully, C) Placement and arrangement of stones that make up the body of the work, D) Construction of the apron and spillway of the dam.

Figura 3. Procedimiento de construcción de presa con piedra acomodada: A) Desplante, B) Empotramiento en el lecho y márgenes de la cárcava, C) Colocación y acomodo de piedras que conforman el cuerpo de la obra, D) Construcción del delantal y vertedor de la presa.

The expression used is the following:

$$\Delta h = h_i - h_{i+1}$$

Where:

Δh : Height variation in the stakes (mm);

h_i : Initial height or reference height value (mm);

h_{i+1} : Height at measurement i or final height (mm).

Thus, the height obtained in the last measurement was subtracted from the initial height value. In this way, when applying the formula, negative values (-) and positive values (+) were obtained, so the following two conditions were established:

If $\Delta h < 0$ (value -) there was soil loss, meaning the point was affected by erosion.

If $\Delta h > 0$ (value +) there was soil gain, meaning there was sedimentation at the point.

Mean erosion

Mean erosion was estimated by the sum of the height increments (Δh), measured between time i and time $i+1$, of all the stakes in the plot that showed erosion (values with a negative sign); this summation was divided by the total number of stakes present in the plot, as indicated in the following formula:

$$h_{es} = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i)}{n}$$

Where:

h_{es} : Mean height of eroded soil (mm);

h_i : Summation of all values with a negative sign (mm);

n : Total number of stakes installed in the plot.

Subsequently, the mean erosion was determined with the following formula:

$$E_{mean} = h_{es} * Da * 10$$

Where:

E_{mean} = Mean erosion ($t \cdot ha^{-1}$);

h_{es} = Mean height of eroded soil (mm);

Da = Bulk density of the soil ($t \cdot m^{-3}$);

10 = Conversion factor to $t \cdot ha^{-1}$ units.

Mean sedimentation

Mean sedimentation was estimated by summing the decreases in height (Δh), measured between time i and time $i+1$, of all the stakes in the plot that denoted the presence of sedimentation processes (values with a positive sign); the summation was divided by the total number of stakes present in the plot. Once the mean

de azolves en la garganta de la denominada cárcava dos. Se eligió este tipo de obras por la disponibilidad del material en el mismo sitio de estudio. En cada una, se realizaron mediciones mensuales de retención de azolves y se llevó un registro por obra durante todo el periodo de lluvias (de mayo a noviembre de 2022). El procedimiento de construcción de las obras de conservación se resume e ilustra en la Figura 3, basado en la metodología de construcción de CONAFOR (2016).

VARIABLES EVALUADAS

Para determinar la cantidad de suelo erosionado o sedimentado en cada punto de muestreo de las laderas, se utilizaron clavos de erosión, se determinó la variación de la altura expuesta de éstos (Δh en mm), entre periodos consecutivos de medición en clavos instalados en las dos laderas a ambos lados de cada cárcava.

La expresión utilizada es la siguiente:

$$\Delta h = h_i - h_{i+1}$$

Donde:

Δh : Variación de altura en los clavos (mm);

h_i : Valor inicial de altura o altura de referencia (mm);

h_{i+1} : Altura en la medición i o altura final (mm).

Así, al valor inicial de altura se le restó la altura obtenida en la última medición. De esta manera, al aplicar la fórmula, se obtuvieron valores negativos (-) y valores positivos (+), por lo que se establecieron las siguientes dos condiciones:

Si $\Delta h < 0$ (valor -) hubo pérdida de suelo, entonces el punto estuvo afectado por erosión.

Si $\Delta h > 0$ (valor +) hubo ganancia de suelo, entonces en el punto hubo sedimentación.

Erosión media

La erosión media se estimó mediante la suma de los incrementos en altura (Δh), medidos entre el tiempo i y el tiempo $i+1$, de todos los clavos de la parcela que presentaron erosión (valores con signo negativo); esta sumatoria se dividió por el total de clavos presentes en la parcela, como se indica en la siguiente fórmula:

$$h_{se} = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i)}{n}$$

Donde:

h_{se} : Altura media del suelo erosionado (mm);

h_i : Sumatoria de todos los valores con signo negativo (mm);

n : Número total de clavos instalados en la parcela.

value of the sedimentation height was obtained, the following formula was applied:

$$S_{mean} = h_{ss} * Da * 10$$

Where:

S_{mean} = Mean sedimentation ($t \cdot ha^{-1}$);
 h_{ss} = Mean height of sedimented soil (mm);
 Da = Soil bulk density ($t \cdot m^{-3}$).
 10 = Conversion factor to $t \cdot ha^{-1}$ units.

Net erosion

Net erosion (E_{net}) was determined by the difference between erosion (E) and sedimentation (S) that occurred on the slope, expressed in tons per hectare by applying the formula reported by Pizarro & Cuitiño (2002):

$$E_{net} = E_{mean} - S_{mean}$$

Where:

E_{net} : Mean net slope erosion ($t \cdot ha^{-1}$);
 E_{mean} : Mean normal erosion ($t \cdot ha^{-1}$);
 S_{mean} : Mean sedimentation ($t \cdot ha^{-1}$).

Mobilized soil

We speak of mobilized soil when quantifying both the mean erosion and sedimentation that occurred on a slope. In this way, it is possible to describe the total amount of soil mobilized on the land, expressed in tons per hectare per year ($t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$) (Pizarro & Cuitiño, 2002; Morales et al., 2010).

The mathematical expression for quantifying this variable is as follows:

$$Soil_{mob} = E_{mean} + S_{mean}$$

Where:

$Soil_{mob}$: mobilized soil on the slope ($t \cdot ha^{-1}$)
 E_{mean} : Mean erosion ($t \cdot ha^{-1}$)
 S_{mean} : Sedimentation on the slope ($t \cdot ha^{-1}$)

In-channel erosion and sedimentation

To measure sedimentation in the channel, resulting from the loss of soil at slope level and the transport of materials in the gullies, three stone filter dams were built near the gully throat.

Posteriormente, la erosión media se determinó con la siguiente fórmula:

$$E_{media} = h_{se} * Da * 10$$

Donde:

E_{media} = Erosión media ($t \cdot ha^{-1}$);
 h_{se} = Altura media de suelo erosionado (mm);
 Da = Densidad aparente del suelo ($t \cdot m^{-3}$);
 10 = Factor de conversión a unidades $t \cdot ha^{-1}$.

Sedimentación media

La sedimentación media se estimó mediante la suma de los decrementos en altura (Δh), medidos entre el tiempo i y el tiempo $i+1$, de todos los clavos de la parcela que denotaron la presencia de procesos de sedimentación (valores con signo positivo); la sumatoria se dividió por el total de clavos presentes en la parcela. Una vez obtenido el valor medio de la altura de sedimentación, se aplicó la siguiente fórmula:

$$S_{media} = h_{se} * Da * 10$$

Donde:

S_{media} = Sedimentación media ($t \cdot ha^{-1}$);
 h_{se} = Altura media del suelo erosionado (mm);
 Da = Densidad aparente del suelo ($t \cdot m^{-3}$).
 10 = Factor de conversión a unidades $t \cdot ha^{-1}$.

Erosión neta

La erosión neta (E_{neta}) se determinó por diferencia entre la erosión (E) y la sedimentación (S) ocurrida en la ladera, expresada en toneladas por hectárea aplicando la fórmula reportada por Pizarro & Cuitiño, (2002):

$$E_{neta} = E_{media} - S_{media}$$

Donde:

E_{neta} : Erosión neta media de la ladera ($t \cdot ha^{-1}$);
 E_{media} : Erosión normal media ($t \cdot ha^{-1}$);
 S_{media} : Sedimentación media ($t \cdot ha^{-1}$).

Suelo movilizado

Se habla de suelo movilizado al cuantificar, tanto la erosión media como la sedimentación ocurrida en una ladera. De esta manera se puede describir la totalidad de suelo que se movilizó en el terreno, expresado en toneladas por hectárea por año ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) (Pizarro & Cuitiño, 2002; Morales et al., 2010).

Quantification of the total sediment retained in the dams

To estimate the total sediment volume retained in the constructed stone dams, the formula proposed in the PROCOREF evaluation (2005) was used:

$$V_{total} = Ws * Hs * \frac{Ls}{2}$$

Where:

V_{total} = Total volume of sediment retained by work (m³);
 Ws = Mean width of sediment captured (m);
 Hs = Mean height of sediment captured (m);
 Ls = Mean length of sediment captured (m).

In this way, measurements were made of the width, height and length of the sediments retained in the three stone dams built in the gully as illustrated in Figure 4.

To estimate the silt retention in weight units (t·ha⁻¹), it was necessary to consider the runoff area between each dam, which corresponds to the spacing between works (15 m distance) multiplied by the current length of the runoff area: in dam one, the length measured from end to end is 123.7 m; in dam two, the length is

La expresión matemática para la cuantificación de esta variable es la siguiente:

$$Suelo_{mov} = E_{media} + S_{media}$$

Donde:

Suelo_{mov}: suelo movilizado en la ladera (t·ha⁻¹)

E_{media}: Erosión media (t·ha⁻¹)

S_{media}: Sedimentación en la ladera (t·ha⁻¹)

Erosión y sedimentación en el cauce

Para medir sedimentación en el cauce, producto de la pérdida de suelo a nivel de ladera y del transporte de materiales en las cárcavas, se construyeron tres presas filtrantes de piedra acomodada cerca de la garganta de la cárcava.

Cuantificación del sedimento total retenido en las presas

Para estimar el volumen de sedimento total retenido en las presas de piedra construidas, se utilizó la fórmula propuesta en la evaluación del PROCOREF (2005):

$$V_{total} = As * Aps * \frac{Ls}{2}$$



Figure 4. Measurement of silt retained in stone dams built in Cerro de las Cruces, municipality of Motozintla, Chiapas.
Figura 4. Medición de azolves retenidos en presas de piedra acomodadas en el Cerro de las Cruces, municipio de Motozintla, Chiapas.

97.5 m and the length of the contribution area to dam three is 107.8 m. With these data and using a “rule of three,” the amount of soil material retained per unit area was determined. It is important to mention that since the three dams were built on the same gully, the total value of material retained by the works was obtained and the total runoff area of the channel was considered, which, according to the measurements cited above, gives a total contribution area of 0.4534 hectares.

Potential sediment retention volume in the dams

To obtain the potential sediment volume retained per dam, the sediment area in the gully was determined using the following formula:

$$A = d * (\sum_{i=1}^n hi)$$

Where:

A= Area of the section occupied by the sediment (m²);

d = Width of the stone dam (m);

$\sum hi$ = Summation of the intermediate distances (for “U” shaped gullies).

Once the value of the retained sediment area (A) was obtained, the height of the dam wall (h) was measured and multiplied by this data, in order to obtain the potential volume of sediment to be captured by each of the dams built in the gully:

$$Vol = A * h$$

Where:

Vol = Potential volume of sediment to be captured in each dam (m³);

A = Area of the section occupied by the sediment (m²);

h = Height of the dam wall (m).

Efficiency of silt control in stone-built dams

The efficiency in controlling water erosion (in %) of each of the dams built was determined using the following formula:

$$\text{Efficiency (\%)} = \left(\left(100 - \left(\frac{\text{total volume of soil retained in the dam}}{\text{potential volume of soil to be retained in the dam}} \right) * 100 \right) \right)$$

In this way, by relating the total volume of silt retained in the study period to the potential volume (related to the dimensions of the dams), the efficiency of the stone dams in controlling silt for a rainy period at the study site was assessed.

Donde:

V_{total} = Volumen total de sedimento retenido por obra (m³);

As = Ancho medio de sedimentos captados (m);

Aps = Altura media de sedimentos captados (m);

Ls= Longitud media de sedimentos captados (m).

De esta manera se realizaron mediciones de ancho, altura y longitud de los sedimentos retenidos en las tres presas de piedra construidas en la cárcava como se ilustra en la Figura 4.

Para estimar la retención de azolves en unidades de peso (t·ha⁻¹), fue necesario considerar el área de escurrimiento que existe entre cada presa, la cual corresponde al espaciamiento entre obras (15 m de distancia) multiplicado por el largo actual de la misma: En la presa uno, la longitud medida de extremo a extremo es de 123.7 m; en la presa dos el largo es de 97.5 m y el largo del área de contribución hacia la presa tres es de 107.8 m. Con estos datos y utilizando una “regla de tres” se determinó la cantidad de material de suelo retenido por unidad de superficie. Es importante mencionar que debido a que las tres presas se construyeron sobre la misma cárcava, se obtuvo el valor total de material retenido por las obras y se consideró el área total de escurrimiento del cauce, que, según las medidas citadas anteriormente, da un área total de aporte de 0.4534 hectáreas.

Volumen potencial de retención de sedimentos en las presas

Para obtener el volumen potencial de sedimentos retenido por presa, se determinó el área de sedimento en la cárcava, mediante la siguiente fórmula:

$$A = d * (\sum_{i=1}^n hi)$$

Donde:

A= Área de la sección ocupada por el sedimento (m²);

d = Ancho de la presa de piedra (m);

$\sum hi$ = Sumatoria de las distancias intermedias (para cárcavas en forma de “U”).

Una vez obtenido el valor del área de sedimento retenido (A), se midió la altura del muro de la presa (h) y se multiplicó por este dato, para poder obtener así el volumen potencial de sedimento a captar por cada una de las presas construidas en la cárcava:

$$Vol = A * h$$

Results and discussion

Precipitation

In terms of precipitation, between April and October 2022, total rainfall of 1132.6 mm was recorded; September was the wettest month with 296.2 mm, representing 26 % of the total rainfall for that period, followed by July and August with monthly rainfall greater than 240 mm. The rainfall events recorded in October only accumulated 48.2 mm (Figure 5).

It should be noted that the average annual rainfall in Cerro de las Cruces is 1233.7 mm and that, on average, there are 94 days with rain (Servicio Meteorológico Nacional, 2023).

The results of the analysis of the historical series of precipitation records (period between the years 1951-2010) show that the months of June and September recorded the highest number of rainy days; on average, there are 18 rainy days in these two months, which determines a greater amount of accumulated rainfall per month. This coincides with what was recorded in 2022, in terms of being the rainiest months.

Likewise, it was found that in the month of September 1998 the maximum amount of rainfall was recorded with 745 mm, while in the month of October 2005 (the year of Hurricane "Stan") 692.2 mm were recorded; on

Donde:

Vol = Volumen potencial de sedimento a captar en cada presa (m³);

A = Área de la sección ocupada por el sedimento (m²);

h = Altura del muro de la presa (m).

Eficiencia en el control de azolve en presas de piedra acomodada

La eficiencia en el control de la erosión hídrica (en %) de cada una de las presas construidas, se determinó mediante la utilización de la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \left(\left(100 - \left(\frac{\text{volumen total de suelo retenido en la presa}}{\text{volumen potencial de suelo a retener en la presa}} \right) \right) * 100 \right)$$

De esta manera, al relacionar el volumen total de azolves retenido en el periodo de estudio con el volumen potencial (relacionado a las dimensiones de las presas), se valoró qué tan eficientes fueron las presas de piedra en el control de azolves para un periodo de lluvias en el sitio de estudio.

Resultados y discusión

Precipitación

En términos de precipitación, entre el mes de abril y octubre de 2022, se registró una lámina total de lluvia de 1132.6 mm; siendo septiembre el mes más lluvioso

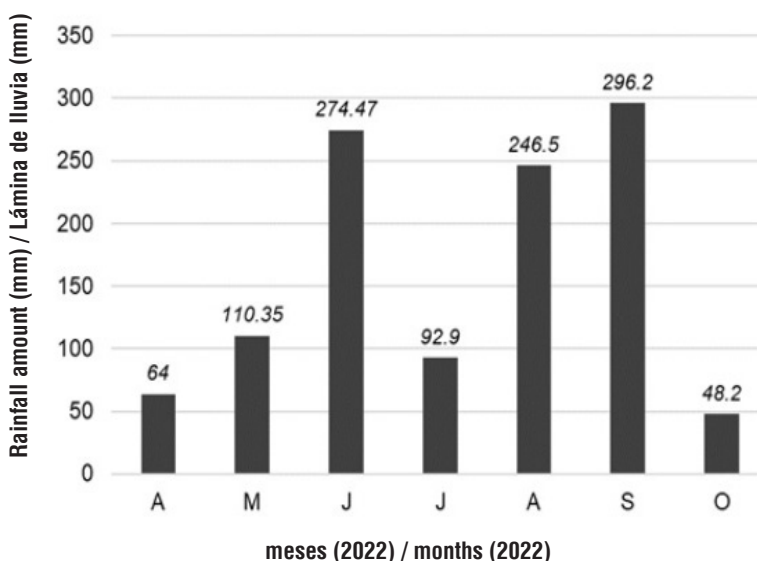


Figure 5. Precipitation recorded during the research period.

Figura 5. Precipitación registrada en el período de investigación.

Source: Station 7333 – Buenos Aires. Latitude: 15°19'57" N, Longitude: 92°16'03" W, elevation:1820 m

Fuente: Estación 7333 – Buenos Aires. Latitud: 15°19'57" N, Longitud: 92°16'03" W, altitud:1820 m

(Servicio Meteorológico Nacional, 2023).

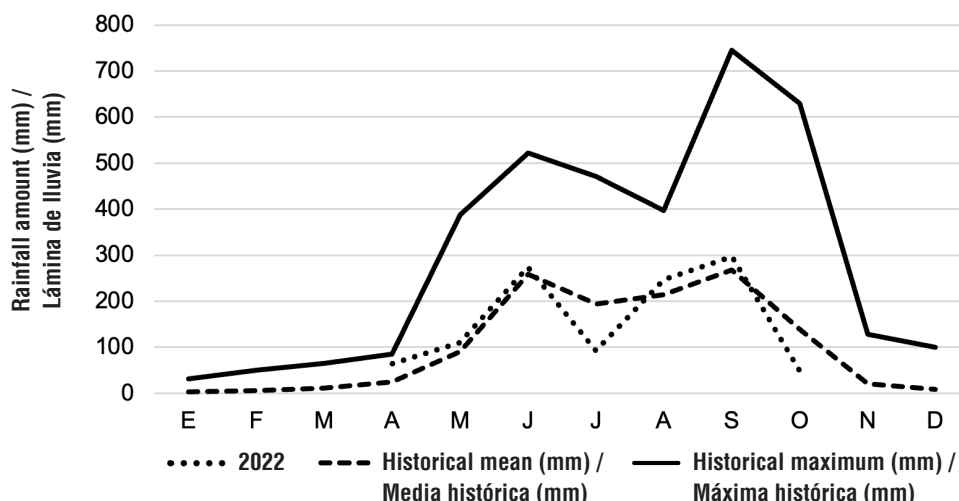


Figure 6. Comparison of rainfall in the study year with historical records. (Constructed with historical records from station 7333-Buenos Aires. Servicio Meteorológico Nacional, 2023).

Figura 6. Comparación de la lluvia en el año de estudio con los registros históricos. (Construido con registros históricos de la estación 7333-Buenos Aires. Servicio Meteorológico Nacional, 2023).

October 4, 2005 it rained 180.7 mm. When comparing rainfall in 2022 with the historical average (Figure 6), it was found that the amount of rainfall in the months of July and October 2022 was lower than the historical average, while, during April, May, August and September, rainfall was slightly higher than average levels.

From the series of historical maximums analyzed, it was determined that there were 100 mm of accumulated rainfall in December 2009, which is out of the ordinary given that the historical average for December barely reaches 8 mm of precipitation (Figure 8).

Soil losses and gully characterization

The results obtained on the characterization of gullies under different criteria are presented; in addition, the results of the estimation of mean erosion and sedimentation, net erosion and mobilized soil at slope level are shown, along with the estimation of the total volume of sediment retained in the stone dams built for the control of siltation in small gullies.

Slope erosion and sedimentation

In this study, height values (decreases and increases) were obtained for the erosion stakes. Table 1 shows the average height values obtained. With the values in the aforementioned table, the following variables considered in this study were determined: mean erosion, mean sedimentation, net erosion and mobilized

con 296.2 mm que representa el 26 % del total precipitado de dicho periodo, seguido de julio y agosto con láminas mensuales mayores de 240 mm. Las láminas de los eventos de lluvia registrados en el mes de octubre solo acumularon 48.2 mm (Figura 5).

Es de destacar que la lluvia media anual en el Cerro de las Cruces es de 1233.7 mm y en promedio son 94 los días con lluvia (Servicio Meteorológico Nacional, 2023).

Los resultados del análisis de la serie histórica de registros de precipitación (periodo comprendido entre los años 1951-2010) muestran que los meses de junio y septiembre fueron los que registraron el mayor número de días con lluvia; en promedio son 18 días lluviosos en estos dos meses, lo que determina una mayor cantidad de lluvia acumulada por mes. Esto coincide con lo registrado en 2022, en cuanto a que son los meses más lluviosos.

Asimismo, se encontró que en el mes de septiembre del año 1998 se registró la máxima cantidad de lluvia con 745 mm; en tanto que en el mes de octubre de 2005 (año del Huracán “Stan”) se registraron 692.2 mm; el 04 de octubre de 2005 llovió 180.7 mm. Al comparar la lluvia en 2022 con la media histórica (Figura 6) se encontró que la cantidad de lluvia precipitada en los meses de julio y octubre del 2022 fue menor que la media histórica; mientras que, durante abril, mayo, agosto y septiembre, las lluvias fueron ligeramente mayores que las láminas medias.

Table 1. Mean height values for erosion stakes in Cerro de las Cruces areas, municipality of Motozintla, Chiapas.
Cuadro 1. Valores medios de altura en clavos de erosión en áreas del Cerro de las Cruces municipio de Motozintla, Chiapas.

Slope No. / Ladera No.	Slope exposure / Exposición de ladera	Mean stake height (cm) / Altura media en clavos (cm)	
		Increase / Aumento	Decrease / Disminución
1	East / Este	11.98	3.90
2	East / Este	3.1	0.00*

*Note: Indicates that there were no changes; it was not affected by erosion or sedimentation.

*Nota: Indica que no hubo cambios; no se afectó por erosión ni sedimentación.

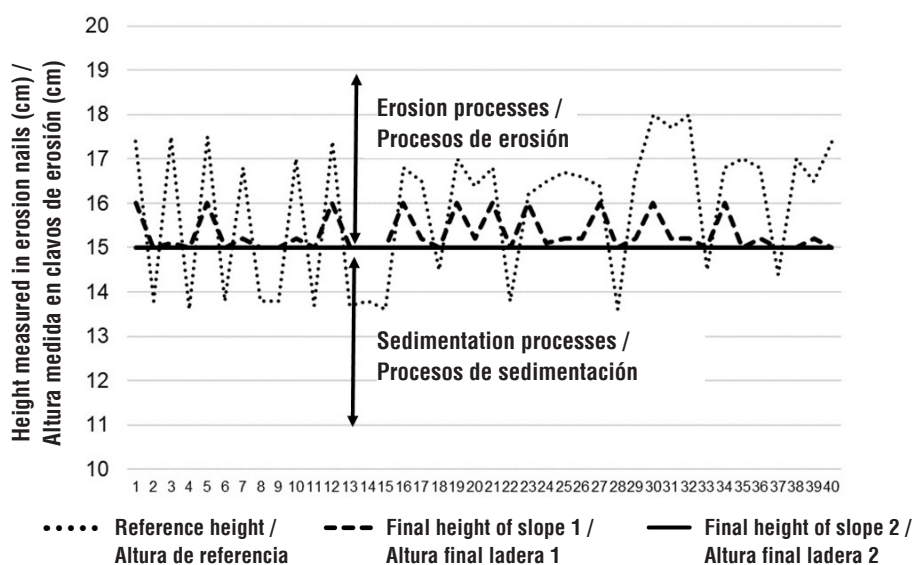


Figure 7. Height variation in experimental stake plots at the study site.
Figura 7. Variación de altura en parcelas experimentales de clavos en el sitio de estudio.

soil with the formulas described in the methodology section and referred to in Pizarro & Cuitiño (2002) and Morales et al., (2010).

Figure 5 shows the variation in heights over the six months of the study. This variation is compared to the reference or initial height of each stake inserted in the ground, which was 15 cm. With the difference in these two readings, increases (denoted by negative values) or decreases in height (positive values) are obtained, which are evidence of erosion and sedimentation processes, respectively.

It should be noted that the accumulated rainfall during the six months in which the measurements were taken was 1132.6 millimeters (mm).

De la serie de máximas históricas analizadas, resulta que en diciembre del año 2009 se acumularon 100 mm, algo fuera de lo común, dado que la media histórica para diciembre apenas llega a los 8 mm de precipitación (Figura 6).

Pérdidas de suelo y caracterización de cárcavas

Se presentan los resultados obtenidos sobre la caracterización de cárcavas bajo diferentes criterios; además, se muestran resultados de la estimación de la erosión y sedimentación media, erosión neta y suelo movilizado a nivel de ladera. Asimismo, la estimación del volumen total de sedimento retenido en las presas de piedra acomodadas construidas para el control de azolve en cárcavas pequeñas.

Mean erosion

The values of eroded soil on both slopes, expressed in units of height (mm), volume ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) and weight ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), are presented in Table 2. If the value of the mean height (mm) is transformed into meters and multiplied by the $10\,000\text{ m}^2$ that make up a hectare, an estimate of the erosion in $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ is obtained.

When comparing the erosion values obtained for the conditions of slope one with those of slope two, it can be seen that the erosion on slope one is approximately five times greater than that on slope two, which is evidence of intense water erosion processes (Table 3). This difference is due to the fact that in the areas where plot one was established (slope one), cattle pass through more frequently, there is little grass vegetation, crumbling of the soil on the surface is noticeable, and erosion is favored by an average slope of 85 %; on the contrary, on slope two, there is more

Erosión y sedimentación en ladera

En este estudio se obtuvieron los valores de altura (decrementos e incrementos) en los clavos de erosión. En el Cuadro 1 se presentan los valores medios de alturas obtenidas. Con los valores del cuadro referido se determinaron las siguientes variables consideradas en el presente estudio que son: erosión media, sedimentación media, erosión neta y suelo movilizado con las fórmulas descritas en el apartado de metodología y referidas en Pizarro & Cuitiño (2002) y Morales et al., (2010).

La Figura 7 muestra la variación de alturas en los seis meses del estudio. Esta variación es comparada a la altura de referencia o altura inicial en cada clavo insertado en el suelo que fue de 15 cm. Con la diferencia en estas dos lecturas, se obtienen aumentos (denotados en valores negativos) o disminución de alturas (valores positivos), que evidencian procesos de erosión y sedimentación, respectivamente.

Table 2. Erosion in Cerro de las Cruces areas, municipality of Motozintla, Chiapas.

Cuadro 2. Erosión en áreas del Cerro de las Cruces, municipio de Motozintla, Chiapas.

Slope No. / Ladera No.	Mean height of eroded soil (mm) / Altura media de suelo erosionado (mm)	Bulk density ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$) / Densidad aparente ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	Mean erosion volume ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) / Volumen de erosión media ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$)	Mean erosion weight ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / Peso de erosión media ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
1	11.98	1.47	119.80	176.10
2	3.10	1.19	31.00	36.89
Mean / Media				106.79
Total erosion / Erosion total				282.99

Table 3. Water erosion classification ranges for Mexico

Cuadro 3. Rangos de clasificación de la erosión hídrica para México

Type 1 / Tipo 1	Range ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$) / Rango ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$)	Classification / Clasificación
1	< 50	Low / Baja
2	50 – 100	Medium / Media
3	100 – 150	Considerable
4	150 – 200	High / Alta
5	200 – 250	Very high / Muy alta
6	>250	Extreme / Extrema

Source: Montes-León et al., 2011.

Fuente: Montes-León et al., 2011.

vegetation, grass and bushes, and it has a less steep slope (average value of 32 %).

Regarding the effect of slope, it has been proven that small changes generate a greater or lesser degree of sedimentation (decrease in slope), that is, retention of soil particles that are transported by runoff causes lower effective losses or net soil erosion (Pizarro & Cuitiño, 2002).

Considering the water classification ranges for our country cited by Montes-León et al. (2011) and shown in Table 3, it can be seen that in the conditions of slope two, erosion is in the *low* range ($36.89 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$), while for the values obtained for the plot on slope two ($176.1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$), erosion is classified as *high*.

Since the mean erosion fluctuates in the range of $36.89 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ (low erosion) to $176.1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ (high erosion) with a mean of $106.79 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$, this mean value is classified in the *considerable erosion* range according to the ranges of values established by Montes-León et al. (2011) and according to other erosion reports such as those reported by Pereyra et al. (2005) who indicated as very high the soil losses of $224 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ estimated in soils of Veracruz, Mexico or those reported by Rivera et al. (2014) who recorded an annual average of $374.4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ of soil loss due to erosion at the Alamar site in Tamaulipas, Mexico, during the period from 2003 to 2010, considered above tolerable levels, even reaching extreme erosion values for the Chihue, Tamaulipas site, which corresponds to an average of up to $1042.8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$. In this regard, it is worth mentioning that 64 % of the national territory is exposed to extreme erosion, according to the national erosion assessment conducted by Montes-León et al. (2011), so it is necessary and urgent to implement a watershed management and conservation plan, such as land-use change management and reforestation, as well as to locate areas where a more detailed study is required.

Cabe señalar que el acumulado de precipitaciones durante los seis meses en que se realizaron las mediciones fue de 1132.6 milímetros (mm).

Erosión media

Los valores de suelo erosionado en ambas laderas, expresado en unidades de altura (mm), de volumen ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) y de peso ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), se presentan en el Cuadro 2. Si el valor de la altura media (mm) se transforma a metros y se multiplica por los $10\,000 \text{ m}^2$ que posee una hectárea, se tiene una estimación de la erosión en $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$.

Al comparar los valores de erosión obtenidos para las condiciones de la ladera uno con la ladera dos, se observa que la erosión en la primera es aproximadamente cinco veces mayor que en la ladera dos, lo que evidencia procesos de erosión hídrica intensos (Cuadro 3). Esta diferencia es debida a que en las áreas donde se instaló la parcela uno (ladera uno) el ganado transita con mayor frecuencia y hay poca vegetación de pasto, se nota el desmoronamiento del suelo en la superficie, además de ser favorecido por la pendiente media de 85 %; por el contrario, en la ladera dos, hay más vegetación, pasto y arbustos, además de tener una pendiente menos abrupta (valor medio de 32 %).

En cuanto al efecto de la pendiente, se ha comprobado que pequeños cambios han generado un mayor o menor grado de sedimentación (disminución de pendiente), es decir, de retención de las partículas de suelo que son transportadas por el escurrimiento, provocando menores pérdidas efectivas o erosión neta del suelo (Pizarro & Cuitiño, 2002).

Considerando los rangos de clasificación hídrica para nuestro país citados por Montes-León et al. (2011) transcritos en el Cuadro 3, se tendría que en las condiciones de la ladera dos, la erosión está en el rango de *baja* ($36.89 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$); mientras que los valores obtenidos

Table 4. Mean sedimentation in Cerro de las Cruces areas, municipality of Motozintla, Chiapas.

Cuadro 4. Sedimentación media en áreas del Cerro de las Cruces, municipio de Motozintla, Chiapas.

Slope No. / Ladera No.	Mean height of sedimented soil (mm) / Altura media de suelo sedimentado (mm)	Bulk density ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$) / Densidad aparente ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	Mean sedimentation ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / Sedimentación media ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
1	3.90	1.47	57.33
2	0.00	---	---

Mean sedimentation

The mean sedimentation values obtained are shown in Table 4. It should be noted that no sedimentation processes were observed in experimental plot two, while 57.33 t·ha⁻¹ were sedimented on slope one in the six months of the research, with this plot also being the one that generated the highest average erosion rate.

Net erosion

According to Pizarro & Cuitiño (2002), net erosion (E_n) is the difference between mean erosion and sedimentation occurring on a slope, expressed in cubic meters per hectare or tons per hectare. The results obtained during the research period are shown in Table 5 below.

Net erosion was three times higher in plot one than in plot two.

Mobilized soil

The results obtained for this variable are shown in Table 6. It can be seen that the mobilized soil is up to six times greater on slope one, compared to that obtained for slope two.

Mobilized soil indicates the total soil mobilized in the plot, which is a measure of soil dynamics in its response to the action of precipitation and surface runoff (Pizarro & Cuitiño, 2002). It is worth mentioning that the degradation of grass cover in the study sites can influence soil losses due to water erosion. The presence of *vegetation cover* not only protects the soil

para la parcela en la ladera dos (176.1 t·ha⁻¹·año⁻¹), la erosión se clasifica como *alta*.

Como la erosión media fluctúa en el rango de 36.89 t·ha⁻¹·año⁻¹ (erosión baja) a 176.1 t·ha⁻¹·año⁻¹ (erosión alta) con una media de 106.79 t·ha⁻¹·año⁻¹, este valor medio se clasifica en el rango de *erosión considerable* según los rangos de valores establecidos por Montes-León et al. (2011) y según otros reportes de erosión como los reportados por Pereyra et al. (2005) que señalaron como muy altas las pérdidas de suelo de 224 t·ha⁻¹·año⁻¹ estimadas en suelos de Veracruz, México o las reportadas por Rivera et al. (2014) que reportan una media anual de 374.4 t·ha⁻¹·año⁻¹ de pérdida de suelo por erosión en el sitio Alamar en Tamaulipas, México, durante el periodo de 2003 al 2010 consideradas por encima de los niveles tolerables, llegando incluso a obtener valores de erosión extrema para el sitio Chihue, Tamaulipas, que corresponde a un promedio de hasta 1042.8 t·ha⁻¹·año⁻¹. A este respecto es de hacer mención que el 64 % del territorio nacional se encuentra expuesto a erosión extrema, según la evaluación nacional de erosión realizada por Montes-León et al. (2011), por lo que es necesaria y urgente la implementación de un plan de manejo y conservación de cuencas, tales como manejo en el cambio de uso de suelo y reforestación, así como ubicar zonas donde se requiera un estudio más detallado.

Sedimentación media

Los valores de sedimentación media obtenidos se presentan en el Cuadro 4. Es de resaltar que no se observaron procesos de sedimentación en la parcela

Table 5. Net erosion (t·ha⁻¹·year⁻¹) in Cerro de las Cruces areas, municipality of Motozintla, Chiapas.

Cuadro 5. Erosión neta (t·ha⁻¹·año⁻¹) en áreas del Cerro de las Cruces, municipio de Motozintla, Chiapas.

Slope No. / Ladera No.	Mean erosion (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Mean sedimentation (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Net erosion (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)
1	176.1	57.33	116.77
2	36.89	0.00	36.89

Table 6. Mobilized soil (t·ha⁻¹) in Cerro de las Cruces areas, municipality of Motozintla, Chiapas.

Cuadro 6. Suelo movilizado (t·ha⁻¹) en áreas del Cerro de las Cruces, municipio de Motozintla, Chiapas.

Slope No. / Ladera No.	Mean erosion (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹) / Erosión media (t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Mean sedimentation (t·ha ⁻¹) / Sedimentación media (t·ha ⁻¹)	Mobilized soil (t·ha ⁻¹) / Suelo movilizado (t·ha ⁻¹)
1	176.1	57.33	233.43
2	36.89	0.00	36.89

against the impact of erosion, but also provides roughness to the terrain through which the surface flow travels, reducing its velocity and, therefore, its erosive power (Morgan, 2005). Thus, the more vegetation cover there is, the less the expected erosion (García, 2010).

Erosion and sedimentation in gullies

Gully cubing. The results of this variable are presented in Table 7, which shows the approximate cubage of the two large gullies at the study site. It should be noted that this is a rough estimate of the amount of scoured material, since its calculation was based on tape measurements of its length, width and depth dimensions. In the last, sections were analyzed every 20 m, measuring the depth at ten-meter intervals, to estimate the area of the respective section. The scoured volume (m^3) was the product of the average area (between two continuous sections) and the separation between them.

Quantification of total sediment retained in the dams

Table 8 shows the results obtained for this variable. The total volume of sediment retained per stone-built dam in the evaluation year was the product of the width, height and length reached by the sediment as silt in the retention area.

Table 9 shows the results expressed in units of volume and weight.

experimental dos; mientras en la ladera uno se sedimentó $57.33 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en los seis meses de la investigación, siendo además en ésta, en la que se generó la mayor tasa de erosión media.

Erosión neta

De acuerdo con Pizarro & Cuitiño (2002) la erosión neta (E_n) es la diferencia entre la erosión y la sedimentación media ocurridas en una ladera, expresada en metros cúbicos por hectárea o toneladas por hectárea. Los resultados obtenidos en el periodo de investigación se muestran en el siguiente Cuadro 5.

La erosión neta fue tres veces mayor en la parcela uno en comparación con la dos.

Suelo movilizado

Los resultados obtenidos para esta variable se muestran en el Cuadro 6. Se observa que el suelo movilizado es hasta seis veces mayor en la ladera uno, respecto a lo obtenido para la ladera dos.

El suelo movilizado indica el suelo total que se moviliza en la parcela siendo ésta una medida de la dinámica del suelo en su respuesta a la acción de las precipitaciones y al escurrimiento superficial (Pizarro & Cuitiño, 2002). Cabe hacer mención que la degradación de la cobertura de pastos en los sitios de estudio

Table 7. Approximate cubage of the study gullies.

Cuadro 7. Cubicación aproximada de las cárcavas de estudio.

Gully / Cárcava	Scoured volume (m^3) / Volumen socavado (m^3)	Bulk density ($t\cdot m^{-3}$) / Densidad aparente ($t\cdot m^{-3}$)	Soil weight (t) / Peso de suelo (t)
1	4 639.720	1.47	6 820.368
2	4 2071.64	1.19	50 065.25

Table 8. Soil volume (m^3) retained in the stone-built dams.

Cuadro 8. Volumen de suelo (m^3) retenido en las presas de piedra acomodada.

Dam No. / Presa No.	Mean sediment width (m) / Ancho promedio del sedimento (m)	Mean sediment height (m) / Altura promedio de sedimento (m)	Mean sediment length (m) / Longitud promedio de sedimento (m)	Total volume retained by dams (m^3) / Volumen total retenido por presas (m^3)
1	2.40	0.39	2.0	1.872
2	3.0	0.47	2.30	3.243
3	2.40	0.48	2.15	2.477

Table 9. Soil retained (t) in stone-built dams in Cerro de las Cruces, municipality of Motozintla, Chiapas.
Cuadro 9. Suelo retenido (t) en presas de piedra acomodada en el Cerro de Las Cruces, municipio de Motozintla, Chiapas.

Dam No. / Presa No.	Volume (m ³) / Volume (m ³)	Bulk density (t·m ⁻³) / Densidad aparente (t·m ⁻³)	Soil retained (t) / Suelo retenido (t)
1	1.872	1.56	2.608
2	3.243	1.67	5.416
3	2.477	1.65	4.087
Total	7.392		12.111

By relating the total soil retained in the three dams to the contribution area (0.4534 ha), a volume of 16.303 m³·ha⁻¹ and a weight of 21.631 t·ha⁻¹ as sedimented material are obtained. It is important to note that the bulk density values are high; however, they correspond to the sedimented material retained by each conservation work. Flores & Alcalá (2010) report that the bulk density value increases with soil depth in the profile, due to the low organic matter content and, consequently, less aggregation and greater compaction.

Potential retention volume

The estimation of sediment potential shows the capacity of the dams to retain silt during the rainy season. The values in Table 10 show the height and width of the wall, which determined the retention area of the dams and the potential volume of sediment (m³) that the stone-built dams can retain.

Efficiency in the control of water erosion of stone dams

Taking into account that the water erosion process is made up of three phases, namely detachment, transport and sedimentation, it should be noted that the material detached in the hillside areas reaches the channel or gully at a certain time to leave the contribution area. By applying the relationship for calculating the efficiency in silt retention in the three stone-built dams, the values shown in Table 11 were obtained.

As can be seen in the table above, the efficiency ranges determined for each of the dams vary from 68 to 94 %, with the average value being 80 %, evidencing the good performance of the works in retaining silt. On the other hand, net erosion on slope two (which drains towards the small gully where the three stone dams were built) was 36.89 t·ha⁻¹; the material retained in the dams was 26.83 t·ha⁻¹. In this way, the dams retained about 73 % of the total eroded material at slope level. Sánchez (2014), in a study on erosion and runoff in a hillside agroforestry system in the municipality of Huehuetán,

puede influenciar las pérdidas de suelo por erosión hídrica. La presencia de una *cobertura vegetal* no solo protege el suelo contra la erosión de impacto, sino que también brinda rugosidad al terreno, por el que el flujo superficial viaja, reduciendo su velocidad y, por ende, su poder erosivo (Morgan, 2005). Así, mientras más cobertura vegetal se tenga, menor es la erosión esperada (García, 2010).

Erosión y sedimentación en cárcavas

Cubicación de cárcavas. Los resultados de esta variable se presentan en el Cuadro 7 en el que se muestra la cubicación aproximada de las dos cárcavas grandes presentes en el sitio de estudio. Cabe aclarar que es una estimación gruesa de la cantidad de material socavado, dado que su estimación se basó en mediciones con cinta en sus dimensiones de longitud, ancho y profundidad. En este último se levantaron secciones cada 20 m, midiendo la profundidad a intervalos de diez metros, para estimar el área de la sección respectiva. El volumen socavado (m³) resulta del producto del área promedio (entre dos secciones continuas) y la separación entre éstas.

Cuantificación del sedimento total retenido en las presas

En el Cuadro 8 se presentan los resultados obtenidos para esta variable. El volumen total de sedimento retenido por presa de piedra acomodada en el año de evaluación resultó del producto del ancho, la altura y longitud alcanzada por el sedimento como azolve en el área de retención.

En el Cuadro 9 se presentan los resultados expresados en unidades de volumen y peso.

Al relacionar el total de suelo retenido en las tres presas con la superficie de aporte (0.4534 ha) se obtiene un volumen de 16.303 m³·ha⁻¹ y un peso 21.631 t·ha⁻¹ como material sedimentado. Es importante hacer mención que los valores de densidad aparente resultan ser elevados, sin embargo, corresponden al material

Table 10. Potential volume of sediment to be retained in stone-built dams (m³) in Cerro de las Cruces areas, municipality of Motozintla, Chiapas.**Cuadro 10. Volumen potencial de sedimentos a retener en presas de piedra acomodada (m³) en áreas del Cerro de Las Cruces, municipio de Motozintla, Chiapas.**

Dam No. / Presa No.	Area (m ²) / Área (m ²)	Height of the wall in each dam* (m) / Altura del muro en cada presa* (m)	Volume (m ³) / Volumen (m ³)
1	4.8	0.8	2.40
2	6.9	0.8	3.45
3	7.2	0.8	3.60

*Note: Spillway height was 30 cm.

*Nota: Altura del vertedor fue de 30 cm.

Table 11. Efficiency of stone-built dams in silt retention in Cerro de las Cruces, municipality of Motozintla, Chiapas.**Cuadro 11. Eficiencia de presas de piedra acomodada en la retención de azolves en el Cerro de Las Cruces, municipio de Motozintla, Chiapas.**

Dam No. / Presa No.	Volume of soil retained (m ³) / Volumen de suelo retenido (m ³)	Potential volume to be retained (m ³) / Volumen potencial por retener (m ³)	Efficiency (%) / Eficiencia (%)
1	1.872	2.40	78
2	3.243	3.45	94
3	2.477	3.60	68
Mean / Media			80

Chiapas, reported total silt retention of 18.9 m³ under a high rainfall regime since the average annual rainfall is 3334 mm. However, it should be noted that the material retained is the accumulated amount of four years of measurement and that the land use also includes a diversity of vegetation, such as fruit trees and weeds, riparian vegetation (on the margins of the gully), and conservation practices such as individual terraces.

Conclusions

The mean erosion calculated with the methodology used was 106.79 t·ha⁻¹·year⁻¹, categorized as considerable when compared to other studies that report extreme erosion values averaging up to 1042.8 t·ha⁻¹·year⁻¹. The constructed dams retained almost all of the eroded material at slope level and showed efficiencies in silt retention. The results obtained can be useful for the design of gully control and rehabilitation strategies to stop the growth of gullies due to headward erosion.

sedimentado y retenido por cada obra de conservación. Flores & Alcalá (2010) reportan que el valor de densidad aparente aumenta con la profundidad del suelo en el perfil, debido al bajo contenido de materia orgánica y, consecuentemente, menor agregación y mayor compactación.

Volumen potencial de retención

La estimación del potencial de sedimento muestra la capacidad de las presas para retener azolve durante la temporada de lluvias. Los valores del Cuadro 10 muestran los valores de altura y el ancho del muro, con lo que se determinó el área de retención de las presas y el volumen potencial del sedimento (m³) que las presas de piedra acomodada pueden retener.

Eficiencia en el control de erosión hídrica de presas de piedra

Tomando en cuenta que el proceso de erosión hídrica está integrado de tres fases: desprendimiento, transporte y sedimentación, es de referir que el material desprendido en las áreas de ladera llega en determi-

End of English version

References / Referencias

- Alvarado, M., Colmenero, A., & Valderrábano, Ma. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo-Sum*, 14(3), 317-326. <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/7151>
- Aramayo, V., Nosetto, M., & Cremona M. V. (2024). Análisis de la susceptibilidad a la erosión hídrica en una cuenca de la Patagonia árida bajo distintos escenarios. *Investigaciones Geográficas*, (81), 181-199. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25246>
- Bravo-Espinosa, M., Mendoza, M., Medina-Orozco, L., & Sáenz-Reyes, T. (2010). Características y control de cárcavas. *Terra Latinoamericana*, 28(3), 281-285.
- Camargo, C., Pacheco, C., & López, R. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente*, 20(2), 265-280.
- Castillo, C., & Gomez, J. A. (2016). A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, 160, 300-319. <https://doi.org/10.1016%2Fj.earscirev.2016.07.009>
- Programa de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales (PROCOREF). (2005) Evaluación del Programa de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales. CONAFOR: México.
- Comisión Nacional Forestal. (2016). Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de Obras y Prácticas. México: Editorial CONAFOR.
- De Vente, J., & Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth Science Review*, 71, 95-125. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>
- Díaz-Martínez, P. (2017). Análisis espacio-temporal de la erosión en cárcavas en el olivar. Aplicación de técnicas microgeodésicas. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Experimentales Universidad de Jaén. España. https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/6333/1/TFG_Pedro_Diaz_Martinez.pdf
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2009). Erosión de suelos en América Latina. Roma, Italia.
- FAO (2015). Estado mundial del recurso suelo. (en línea). Roma. 92 p. https://www.icia.es/icia/download/Agroecolog%C3%ADa/Material/Estado_suelo.pdf
- Fernández, T., Pérez-García, J. L., Gómez-López, J. M., Cardenal, J., Calero, J., Sánchez-Gómez, M., Delgado, J., & Tovar-Pescador, J. (2020). Multitemporal analysis of gully erosion in olive groves by means of digital elevation models obtained with aerial photogrammetric and LiDAR data. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9(4), 260. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040260>
- Fitz Patrick, E. (2011). Introducción a la ciencia del suelo. Editorial Trillas, México.
- Flores D. L., & Alcalá M. J. R. (2010). Física de suelos. Manual de procedimientos analíticos. México, D.F.: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

nado momento al cauce o cárcava para salir del área de aporte. Al aplicar la relación para el cálculo de la eficiencia en la retención de azolves en las tres presas de piedra acomodada, se obtuvieron los valores representados en el Cuadro 11.

Como puede apreciarse en el cuadro anterior, los rangos de eficiencia determinados por cada una de las presas varían en el rango de 68 a 94 %, siendo el valor medio igual a 80 %, lo que evidencia el buen funcionamiento de las obras en la retención de azolves. Por otro lado, la erosión neta en la ladera dos (que drena hacia la cárcava pequeña donde se construyeron las tres presas de piedra acomodada) fue de 36.89 t·ha⁻¹; el material retenido en las obras fue de 26.83 t·ha⁻¹. De esta manera, las presas retuvieron cerca del 73 % del total de material erosionado a nivel de ladera. Sánchez (2014) en su estudio sobre erosión y escurrimiento en un sistema agroforestal de laderas en el municipio de Huehuetán, Chiapas, reportó una retención total de azolves de 18.9 m³ bajo un régimen alto de lluvia ya que el promedio anual de precipitación es de 3334 mm. Sin embargo, es de aclarar que el material retenido es el acumulado de cuatro años de medición y además el uso del suelo integra una diversidad de vegetación, como frutales y arvenses, vegetación riparia (en las márgenes de la cárcava), además de prácticas de conservación como las terrazas individuales.

Conclusiones

La erosión media calculada con la metodología empleada fue de 106.79 t·ha⁻¹·año⁻¹ categorizada como considerable al compararse con otros estudios que presentan valores de erosión extrema con un promedio de hasta 1042.8 t·ha⁻¹·año⁻¹. Las presas construidas retuvieron cerca del total de material erosionado a nivel de ladera y mostraron eficiencias en la retención de azolves. Los resultados obtenidos pueden ser útiles para el diseño de estrategias de control y rehabilitación de las cárcavas para detener su crecimiento por erosión remontante.

Fin de la versión en español

- García Ch. P. (2010). Factores que afectan la erosión y sedimentación. In: Brea J.D. y Balocchi C. F. (Eds). Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas. Capítulo VI. 9-21. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 22.
- Guan, Y., Yang, S., Zhao, C., Lou, H., Chen, K., Zhang, C., & Wu, B. (2021). Monitoring longterm gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chines Loess Plateau. *Soil and Tillage Research* 205, 104800. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104800>
- Kou, P., Xu, Q., Jin, Z., Tao, Y., Yunus, A., Feng, J., Pu, C., Yuan, S., & Xia, Y. (2023). Analyzing gully erosion and deposition patterns in loess tableland: Insights from small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS InSAR). *Science of the Total Environment*, 916, 169873. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169873>
- Li, Z., & Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 163, 94-117. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004>
- Martineli, C. F., & Prado, L. A. (2007). Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. *Catena* 69, 230-238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2006.05.007>
- Martínez, M. M., Rubio, G. E., Oropeza, M. J. L., & Palacios E. C. (2009). Control de cárcavas. [Documento en línea] Disponible: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Control%20de%20carcavas.pdf>
- Montes-León, M. A., Uribe-Alcántara, E. M., & García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(1), 5-17.
- Morales, C. C., Balocchi, C. F., & Pizarro, T. R. (2010). Estimación de erosión por parcelas de clavos. In: Brea J. D. y Balocchi C. F. (Eds). Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas. Capítulo VI. 92-101. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 22.
- Morgan, R. (2005). Soil Erosion and Conservation. UK: National Soil Resources Institute. Cranfield University. Blackwell Science Ltd. Oxford,
- PDM (2012). Plan de Desarrollo Municipal 2011- 2012, Motozintla Chiapas. https://www.haciendachiapas.gob.mx/planeacion/planes_desarrollo_muni.asp
- Pereyra, D., Gómez, L., & Loeza, F. (2005). Pérdida de suelo por erosión hídrica. pp. 61-84. In: Rivera, F., Gutiérrez, T. A., Val, R., Mejía, R., Sánchez, P. A., Aparicio, J., Díaz, L. (eds.). La medición de los sedimentos en México. Ediciones IMTA-UJAT. Jiutepec, Morelos/Villa Hermosa, Tabasco, México.
- Pidwirny, M. (2006). Erosion and deposition. In *Fundamentals of physical geography*. (en línea). Kelowna, Canada. Disponible en <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10w.html>
- Pizarro T. R., & Cuitiño M. H. (2002). Método de evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos en Chile. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, (13). <https://doi.org/10.31167/csef.v0i13.9291>
- Rivas, S. (2023). Análisis de cárcavas mediante un enfoque que integra características geológicas, edafológicas, de uso y manejo de suelos en sitios ubicados en el departamento de cerro largo. Tesis de Licenciatura. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay. 116 p. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/42180>
- Rivera-Ortiz, P., Rivera Lárraga, J. E., Andrade-Limas, E., de la Garza-Requena, F., Castro, B., & Belmonte Serrato, F. (2014). Medición de la erosión en cárcavas por medio de imágenes de satélite. *Terra Latinoamericana*, 32 (1), 13-21.
- Sánchez, P. S. E. (2014). Esgurrimiento y erosión en un sistema agroforestal de laderas de la zona de lomeríos en Huehuetán, Chiapas. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Chiapas.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2023). Normales climatológicas de la estación 7333 – Buenos Aires, municipio de Motozintla, Chiapas. Comisión Nacional del Agua. Consultado en <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chis>
- Shellberg, J. G., Brooks, A. P., & Rose, C. W. (2013). Sediment production and yield from an alluvial gully in northern Queensland, Australia. *Earth Surface Process and Landforms*, 38 (15) 1765–1778. <https://doi.org/10.1002/esp.3414>
- SIAC. (2014). Degradación de suelos. <http://www.siac.gov.co/erosion>.
- Yu, G.A., Lu, J., Lyu, L., Han, L., & Wang, Z. (2020). Mass flows and river response in rapid uplifting regions—a case of lower Yarlung Tsangpo basin, Southeast Tibet, China. *International Journal of Sediment Research*, 35(6), 609–620. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.05.006>