



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN  
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL**



**CIDIR IPN Unidad Michoacán**

**CUANTIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DEL  
SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN LA MICROCUENCA DE  
LA PRESA GUARACHA, MICHOACÁN**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN  
AGRÍCOLA SUSTENTABLE**

**PRESENTA:**

**VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ CEJA**

**DIRECTORES DE TESIS**

**M. en C. SALVADOR OCHOA ESTRADA  
Dr. GUSTAVO CRUZ CÁRDENAS**

**Jiquilpan de Juárez, Michoacán, México**

**Diciembre de 2019**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Jiquilpan, Michoacán siendo las 12:00 horas del día 19 del mes de Noviembre del 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR Unidad Michoacán para examinar la tesis titulada:

"Cuantificación y estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la microcuenca de la presa Guaracha, Michoacán".

Presentada por el alumno:

**Sánchez**

**Ceja**

**Víctor Manuel**

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre

Con registro:

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B | 1 | 7 | 1 | 1 | 5 | 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|

aspirante de:

**Maestría en Ciencias en Producción Agrícola Sustentable**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

#### Directores de tesis

**Dr. Gustavo Cruz Cárdenas**

**M. en C. Salvador Ochoa Estrada**

**Dr. José Teodoro Silva García**

**Dr. José Venegas González**

**Dra. Dioselina Alvarez Bernal**



SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
Instituto Politécnico Nacional  
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE  
INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
CIIDIR - IPN - U- MICN.

**Dra. Hortencia Gabriela Mena Violante.**  
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de **Jiquilpan de Juárez; Michoacán**, el día **27 de Noviembre** del **2019**, el que suscribe **Víctor Manuel Sánchez Ceja** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Producción Agrícola Sustentable** con número de registro **B171152**, adscrito al **C.I.I.D.I.R I.P.N Unidad Michoacán**, manifiesto que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **M. en C. Salvador Ochoa Estrada** y el **Dr. Gustavo Cruz Cárdenas** y cede los derechos del trabajo titulado **Cuantificación y estimación de pérdida del suelo por erosión hídrica en la microcuenca de La Presa Guaracha, Michoacán** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones **victorsanchez\_1991@hotmail.com**, **sochoae@ipn.mx**, **gustavo.cruz.cardenas@gmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

**Víctor Manuel Sánchez Ceja**

Nombre y firma

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme concluir una etapa más en mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el apoyo económico durante el periodo de la maestría y por la oportunidad brindada de obtener las herramientas para forjar un futuro para mí y mis seres queridos.

Al M. en C. Salvador Ochoa Estrada y el Dr. Gustavo Cruz Cárdenas por la dirección de esta tesis, por la paciencia, apoyo, disposición y sugerencias.

Al comité tutorial Dr. Teodoro Silva García, Dra. Dioselina Álvarez Bernal y el Dr. José Venegas Gonzales, por su paciencia y tiempo invertido en la revisión de la tesis.

A todos los profesores, trabajadores y demás que hicieron que mi paso por el CIIDIR fuera bueno, productivo e inolvidable.

## DEDICATORIAS

Con admiración a mi madre: *Sra. Esperanza Sánchez Ceja*, quien con su amor y tenaz lucha me ha ofrecido lo mejor, motivándome siempre a superar y lograr mis metas.

A mis hermanos: *Luz Elena, Ramona, Mari, Reyna, Susana y Sergio* por los momentos vividos, por su apoyo, amor y confianza.

A mi abuela: *María Ceja García (†) q.e.p.d.* por cada uno de sus consejos y regaños.

A mis tíos, primos, sobrinos y demás, que cada uno me ha dado algo que he atesorado y que quizá no lo saben, pero son armas que he usado cuando fueron necesarias.

A todos los amigos de Guaracha, por la gran amistad y confianza.

Que Dios me los bendiga siempre

Con cariño y respeto...

*Víctor Manuel Sánchez Ceja*

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| <b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....                         | ix |
| <b>ÍNDICE DE FÍGURAS</b> .....                         | x  |
| <b>RESUMEN</b> .....                                   | 1  |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                  | 2  |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....                           | 3  |
| <b>II. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN</b> .....          | 6  |
| <b>III. OBJETIVOS</b> .....                            | 9  |
| 3.1 Objetivo general.....                              | 9  |
| 3.2 Objetivos particulares .....                       | 9  |
| <b>IV. HIPÓTESIS</b> .....                             | 9  |
| <b>V. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....                 | 10 |
| 5.1 Definición de suelo .....                          | 10 |
| 5.2 Factores formadores de los suelos .....            | 10 |
| 5.2.1 Material parental .....                          | 11 |
| 5.2.2 Clima .....                                      | 11 |
| 5.2.3 Biosfera .....                                   | 11 |
| 5.2.4 Relieve.....                                     | 12 |
| 5.2.5 Tiempo .....                                     | 12 |
| 5.3 Procesos de formación de los suelos.....           | 12 |
| 5.4 Propiedades físicas y químicas de los suelos ..... | 13 |
| 5.4.1 Propiedades físicas del suelo.....               | 13 |
| 5.4.2 Propiedades químicas del suelo .....             | 15 |
| 5.5 Funciones y servicios de los suelos .....          | 16 |
| 5.6 Erosión hídrica .....                              | 18 |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.7 Métodos de cuantificación de la erosión hídrica del suelo .....               | 19        |
| 5.7.1 Parcelas de escorrentía .....   | 20        |
| 5.7.2 Parcelas de clavos de erosión .....   | 20        |
| 5.8 Modelos de estimación de la erosión hídrica del suelo .....                   | 20        |
| 5.8.1 Modelos empíricos .....   | 21        |
| 5.8.2 Modelos conceptuales .....  | 23        |
| 5.8.3 Modelos de base física .....  | 24        |
| <b>VI. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>   | <b>28</b> |
| 6.1 Descripción del área de estudio .....   | 28        |
| 6.1.1 Localización geográfica .....   | 28        |
| 6.1.2 Geología .....  | 29        |
| 6.1.3 Suelos .....  | 29        |
| 6.1.4 Clima .....   | 31        |
| 6.1.5 Uso del suelo y vegetación.....   | 32        |
| 6.2 Metodología .....   | 33        |
| 6.2.1 Cuantificación de la erosión hídrica.....                                   | 33        |
| 6.2.2 Estimación de la erosión hídrica .....                                      | 34        |
| 6.2.3 Perfiles de suelo y pruebas de infiltración .....                           | 35        |
| 6.2.4 Análisis físico-químico de sedimentos y muestras de perfiles de suelo ..... | 35        |
| 6.2.5 Determinación de variables climáticas.....                                  | 35        |
| 6.2.6 Análisis estadístico.....   | 36        |
| 6.2.7 Software .....  | 36        |
| <b>VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>37</b> |
| 7.1 Cuantificación del escurrimiento y la pérdida de suelo .....                  | 38        |
| 7.2 Infiltración .....  | 48        |

|   |           |
|---|-----------|
| 7.3 Pérdida de nutrimentos .....                                      | 49        |
| 7.3.1 pH.....   | 53        |
| 7.3.2 Materia orgánica.....   | 54        |
| 7.3.3 Carbono orgánico .....  | 56        |
| 7.3.4 Nitrógeno inorgánico.....                                       | 57        |
| 7.4 Perfiles de suelo .....   | 58        |
| 7.5 Estimación de la pérdida de suelo.....                            | 62        |
| <b>VIII. CONCLUSIONES.....</b>  | <b>68</b> |
| <b>IX. LITERATURA CITADA .....</b>                                    | <b>69</b> |
| <b>X. ANEXOS.....</b>   | <b>79</b> |
| 10.1 Resultados de la descripción de perfiles de suelo en campo ..... | 79        |
| 10.2 Resultados sedimentos pH .....                                   | 87        |
| 10.3 Resultados sedimentos materia orgánica .....                     | 88        |
| 10.4 Resultados sedimentos carbono orgánico .....                     | 89        |
| 10.5 Resultados sedimentos nitrógeno inorgánico .....                 | 90        |
| 10.6 Resultados de estimación de la erosión hídrica .....             | 91        |



## ÍNDICE DE CUADROS

|  |    |
|--|----|
| <b>Cuadro 1.</b> Modelos de sedimentación con escurrimiento para cada uso del suelo y vegetación.<br>..... | 44 |
| <b>Cuadro 2.</b> Modelos de sedimento con escurrimiento para cada muestreo. ....                           | 44 |
| <b>Cuadro 3.</b> Modelos de sedimentación con precipitación y escurrimiento para cada mes. ....            | 45 |
| <b>Cuadro 4.</b> Perfil 1 Bosque de Encino (BE) .....  | 59 |
| <b>Cuadro 5.</b> Perfil 2 Pastizal Inducido (PI) .....   | 59 |
| <b>Cuadro 6.</b> Perfil 3 Bosque de Encino (BE) .....  | 60 |
| <b>Cuadro 7.</b> Perfil 4 Pastizal Inducido (PI) .....   | 60 |
| <b>Cuadro 8.</b> Perfil 5 Matorral Subtropical (MS) .....  | 60 |
| <b>Cuadro 9.</b> Perfil 6 Agricultura de Temporal (AT) .....   | 61 |
| <b>Cuadro 10.</b> Perfil 7 Agricultura de Temporal (AT) .....  | 61 |
| <b>Cuadro 11.</b> Perfil 8 Matorral Subtropical (MS) .....   | 61 |
| <b>Cuadro 12.</b> Rangos de clasificación de la erosión hídrica.....                                       | 63 |
| <b>Cuadro 13.</b> Cuantificación y estimación de la sedimentación y escurrimiento. ....                    | 63 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Procesos de degradación del suelo.....   | 18 |
| <b>Figura 2.</b> Tipos de modelos en la evaluación de la erosión hídrica.....   | 19 |
| <b>Figura 3.</b> Ubicación geográfica de la microcuenca la presa Guaracha, Michoacán.....   | 28 |
| <b>Figura 4.</b> Unidades de suelo en la microcuenca la presa Guaracha, Michoacán.....  | 30 |
| <b>Figura 5.</b> Climas existentes en la microcuenca la presa Guaracha, Michoacán.....  | 31 |
| <b>Figura 6.</b> Uso del suelo y vegetación de la microcuenca la presa Guaracha, Michoacán.....   | 32 |
| <b>Figura 7.</b> Diseño de las parcelas de escurrimiento.....   | 33 |
| <b>Figura 8.</b> Toma de muestras de escurrimiento y sedimento.....   | 34 |
| <b>Figura 9.</b> Ubicación de las parcelas de escurrimiento en la microcuenca.....  | 37 |
| <b>Figura 10.</b> Comportamiento del escurrimiento en cada uso del suelo y vegetación.....  | 38 |
| <b>Figura 11.</b> Comportamiento del sedimento en cada uso del suelo y vegetación.....  | 39 |
| <b>Figura 12.</b> Pérdida total de suelo por hectárea en cada uso de suelo y vegetación. PI= Pastizal Inducido; AT= Agricultura de Temporal; MS= Matorral Subtropical; BE= Bosque de Encino.<br>..... | 40 |
| <b>Figura 13.</b> Comparación de medias de la sedimentación en los usos de suelo y vegetación.....  | 41 |
| <b>Figura 14.</b> Pérdida de suelo total de la microcuenca Presa Guaracha por superficie de uso del suelo y vegetación.....   | 42 |
| <b>Figura 15.</b> Relación de la pérdida de suelo vs escurrimiento para cada uso del suelo.....   | 43 |
| <b>Figura 16.</b> Relación de la pérdida de suelo con el escurrimiento en la microcuenca.....   | 43 |
| <b>Figura 17.</b> Pérdida de suelo y precipitación acumulada por mes.....   | 46 |
| <b>Figura 18.</b> Pérdida de suelo por vegetación y precipitación total por mes.....  | 47 |
| <b>Figura 19.</b> Tasa de infiltración en los usos de suelo y vegetación.....   | 48 |
| <b>Figura 20.</b> Medias de las propiedades de suelos por uso de suelo y vegetación.....  | 50 |
| <b>Figura 21.</b> Pérdida de nutrimentos por uso de suelo y vegetación.....   | 51 |
| <b>Figura 22.</b> Correlación entre la sedimentación y las pérdidas de nutrimentos en el PI y BE...52   | 52 |
| <b>Figura 23.</b> Correlación entre la sedimentación y las pérdidas de nutrimentos en el MS y AT.<br>.....  | 53 |
| <b>Figura 24.</b> pH de los sedimentos en los usos del suelo y vegetación.....  | 54 |
| <b>Figura 25.</b> Pérdida de la materia orgánica en los usos de suelo y vegetación.....   | 55 |
| <b>Figura 26.</b> Pérdida de carbono orgánico en los usos de suelo y vegetación.....  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 27.</b> Pérdida de nitrógeno inorgánico en los usos de suelo y vegetación. ....                            | 58 |
| <b>Figura 28.</b> Estimación de la pérdida de suelo con la interfaz del modelo GeoWEPP.....                          | 62 |
| <b>Figura 29.</b> Cuantificación de la pérdida de suelo vs estimación mediante WEPP.....                             | 64 |
| <b>Figura 30.</b> Cuantificación del escurrimiento vs estimación mediante WEPP.....                                  | 65 |
| <b>Figura 31.</b> Comparación de medias de la estimación de sedimentación en los usos de suelo y vegetación. ....    | 66 |
| <b>Figura 32.</b> Erosión anual promedio de la cuantificación y estimación para cada uso de suelo y vegetación. .... | 67 |

## RESUMEN

La erosión hídrica del suelo es el tipo de degradación dominante, la cual tiene serias consecuencias en las funciones del mismo: remueve nutrientes, disminuye la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua. El objetivo principal fue cuantificar y estimar la pérdida del suelo por erosión hídrica en la microcuenca de La Presa Guaracha; Michoacán. Para la cuantificación, se establecieron un total de ocho parcelas de escurrimiento dos por cada uso de suelo y vegetación: pastizal inducido (PI), bosque de encino (BE), matorral subtropical (MS) y agricultura de temporal (AT) y se empleó el modelo de base física Water Erosion Prediction Project (WEPP) para la estimación de la misma. A los sedimentos se les analizaron propiedades químicas como son el pH, carbono orgánico, materia orgánica y nitrógeno inorgánico y a las muestras de los perfiles de suelo propiedades físico-químicas como el pH, carbono orgánico, materia orgánica, nitrógeno inorgánico, textura y densidad aparente siguiendo las especificaciones que establece la NOM-021-SEMARNAT-2000. Se llevaron a cabo pruebas de las tasas de infiltración de los suelos. Los resultados obtenidos mostraron que, en los 15 muestreos, la mayor pérdida de suelo por erosión hídrica en el uso de suelo y vegetación fue en el PI con  $5,512.78 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , en segundo lugar, la AT con  $1,676.20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , en tercer lugar, el MS con  $1,352.34 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  y donde existió la menor pérdida en el BE con  $1,222.24 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . Para el caso de la estimación, se obtuvo la mayor pérdida en PI con  $7,402.10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , la AT con  $4,718.08 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , el MS con  $3,778.14 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  y el BE con  $2,225.04 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . El uso de suelo y vegetación PI es el que promueve en mayor medida la erosión hídrica del suelo, mientras que el BE, MS y AT son más eficientes para la infiltración del agua y disminución de la erosión hídrica.

**Palabras clave:** Modelado de cuencas, degradación de suelos, escurrimiento, uso del suelo y vegetación, sedimentación.

## ABSTRACT

Water erosion of the soil is the type of dominant degradation, which has serious consequences on its functions: it removes nutrients, decreases the infiltration rate and water retention capacity. The main objective was to quantify and estimate soil loss due to water erosion in the microbasin of La Presa Guaracha; Michoacán. For the quantification, a total of eight runoff plots were established, two for each use of soil and vegetation: Induced Grassland (IG), Oak Forest (OF), Subtropical Scrub (SS) and Temporary Agriculture (TA), and the Water Erosion Prediction Project (WEPP) physical base model was used to estimate it. The sediments were analyzed chemical properties such as pH, organic carbon, organic matter and inorganic nitrogen, and to samples of soil profiles physicochemical properties such as pH, organic carbon, organic matter, inorganic nitrogen, texture and apparent density following the specifications established by NOM-021-SEMARNAT-2000. Tests of soil infiltration rates were carried out. The results obtained showed that, in the 15 samples, the greatest loss of soil due to water erosion in the use of soil and vegetation was in the IG with  $5,512.78 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*year}^{-1}$ , secondly, the TA with  $1,676.20 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*year}^{-1}$ , thirdly the SS with  $1,352.34 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*year}^{-1}$  and where there was the least loss was in the OF with  $1,222.24 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*year}^{-1}$ . In the case of the estimate, the greatest loss in IG was obtained with  $7,402.10 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*year}^{-1}$ , the TA with  $4,718.08 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*year}^{-1}$ , the SS with  $3,778.14 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*year}^{-1}$  and the OF with  $2,225.04 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*year}^{-1}$ . The use of soil and vegetation in IG is the one that most promotes water erosion in the soil, while the OF, SS and TA are more efficient for water infiltration and decrease water erosion.

**Key words:** Basin modeling, soil degradation, runoff, land use and vegetation, sedimentation.

## I. INTRODUCCIÓN

El suelo y el agua son recursos naturales esenciales en el desarrollo económico, especialmente en la microcuenca de La Presa Guaracha, Michoacán; donde gran parte de la economía está basada en el aprovechamiento de estos bienes, ya que son de suma importancia en la aplicación de esquemas productivos sostenibles. Sin embargo, su uso plantea el problema de su conservación, el cual involucra a distintos sectores productivos como el agrícola, pecuario y el forestal (Silva *et al.*, 2017).

Los suelos son importantes para la existencia de vida en el planeta, la sobreexplotación de este recurso debida a los humanos presenta límites críticos. Existe el aumento de la pérdida de suelos productivos que conlleva al incremento en los precios de los alimentos, causando que millones de personas sigan viviendo en extrema pobreza. Esta pérdida se puede frenar realizando gestiones para su cuidado y no tener la necesidad de importar alimentos (FAO, 2015).

Debido a las funciones que realiza y servicios que proporciona el suelo, y aunque constantemente está en formación, su proceso es lento, por lo cual se le considera como recurso natural no renovable, aunado a lo complicado y el gran costo para recuperarlo y mejorar sus propiedades ya cuando ha sufrido algún tipo de degradación (Bolaños *et al.*, 2016).

El concepto de seguridad del suelo se compara con las nociones afines, pero más limitadas, de calidad del suelo, salud y protección. Se argumenta que el suelo tiene una parte integral ya que participa en los desafíos globales de seguridad alimentaria, seguridad del agua, seguridad energética, reducción del cambio climático, protección de la biodiversidad y servicios ecológicos (McBratney *et al.*, 2014).

Al formar parte de los ecosistemas, el suelo contribuye de manera sustancial a la provisión de servicios ambientales, regulación y provisión, indispensables para el sustento de la humanidad, razón por la cual surge la importancia del cuidado de este recurso y la necesidad de su conservación (Vega, 2008).

De acuerdo con Lal (2003) el recurso suelo es fundamental para la vida, pero por condiciones naturales o antrópicas afronta pérdida de calidad y deterioro de la funcionalidad de los ecosistemas, el debilitamiento de este recurso afecta la sostenibilidad ambiental. Por el uso insostenible del suelo y a las actividades antrópicas, se origina su degradación, que es la disminución de su capacidad de producción o de su capacidad para cumplir con sus funciones ambientales.

Las principales causas de la degradación del suelo en México son la realización de forma no sustentable de las actividades agrícolas y pecuarias (35%), la pérdida de la cobertura vegetal (7.5%) y en menor medida la urbanización, la sobreexplotación y las actividades industriales. En diversos estudios se han realizado mediciones de la superficie nacional con degradación del suelo, la más reciente muestra que el 44.90% (alrededor de 85.70 millones de hectáreas) del recurso suelo presenta degradación en diferentes niveles, que van de ligera a extrema, y el 55.10% (105.20 millones de hectáreas) del territorio nacional cuenta con suelos sin degradación aparente (SEMARNAT, 2008).

La pérdida de suelo superficial es el tipo de degradación que predomina, presentándose serias consecuencias sobre sus funciones como son el desplazamiento de los nutrimentos, la materia orgánica, disminuye la profundidad de enraizamiento de los cultivos, reduciéndose la capacidad de infiltración y retención de agua (Ávila, 2013).

Por otro lado, Bolaños *et al.* (2016) y la CONAFOR (2015) mencionan que los principales impactos de la pérdida de suelo superficial son la sedimentación en lagos, ríos y presas; la disminución en la captación de agua y recarga de mantos acuíferos; las inundaciones; la reducción del potencial productivo por la pérdida paulatina de fertilidad de suelos; alejamiento de productores en las tierras de cultivo por efectos de la sequía y los impactos negativos en la biodiversidad, el Carbono Orgánico del Suelo (COS) es removido y depositado en depresiones y ecosistemas acuáticos donde se contribuye a la eutrofización y gases de efecto invernadero, cuyas consecuencias son la migración y pobreza de la población rural.

En este contexto, la degradación del suelo por erosión hídrica en la microcuenca de la presa Guaracha y la pobreza de los productores rurales que la habitan, constituye un problema socioambiental muy serio en el cual se tiene que buscar una solución.

Debido a la falta de información de la erosión hídrica en la microcuenca. La implementación de recursos dirigidos hacia la cuantificación y estimación del grado de erosión, es una necesidad creciente cuyo propósito es facilitar la toma de decisiones, lograr un manejo sostenible del recurso suelo y por supuesto incrementar el nivel de vida en las poblaciones rurales, que cada día basan su economía en este recurso.

En función de lo anteriormente expuesto, ya que no hay estadísticas recientes ni precisas en la microcuenca de la presa Guaracha. En la presente investigación se planteó la cuantificación y estimación de la pérdida del suelo con el fin de hacer el levantamiento del estado actual de la pérdida de suelo por erosión hídrica; para optimizar razonablemente el aprovechamiento de las funciones del suelo.



## II. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la FAO (2017) se calcula que para el año 2050, la población mundial alcanzará casi los 9,700 millones de personas, lo que aumenta la demanda de alimentos, creciendo exponencialmente el uso intensivo del suelo y su posible degradación. Por ello, las amenazas para las funciones del suelo son: erosión del suelo, pérdida del COS, desequilibrio de nutrientes, acidificación, contaminación, anegamiento, compactación, sellado, salinización y pérdida de la biodiversidad.

La degradación del suelo afecta alrededor de 2,000 millones de hectáreas, equivalentes al 15% de la superficie del planeta, que se han degradado por causa de las actividades humanas. Los principales tipos de degradación del suelo son la erosión hídrica (56%), la erosión eólica (28%), la degradación química (12%) y la degradación física (4%); más de 1,200 millones de habitantes afectados, lo cual se refleja en el cambio climático y creciente escasez de agua y alimentos (CP-SAGARPA, 2013).

La FAO (2015) hace referencia, que la degradación de los suelos genera impactos negativos en la producción agrícola, empeora las condiciones de vida de los agricultores, la calidad de los recursos naturales, además desequilibra los ecosistemas, genera hambre y pobreza. Alvarado *et al.* (2011) mencionan que se genera empobrecimiento de la clase campesina y se va a aumentar la importación de productos, así como la implementación de costosos programas para la difícil recuperación de suelos.

Conocer el estado actual a detalle del suelo es una necesidad fundamental para la gestión integral sostenible de los recursos naturales. La carencia de esta información espacial retarda el diseño y ejecución de políticas, planes, programas o proyectos para hacer frente al escenario de degradación del suelo hasta su posible desertificación (Bedolla *et al.*, 2012).

Sin embargo, en México es escaso el desarrollo de investigaciones para el estudio de los suelos, lo cual ha significado la falta de información que permita diseñar y ejecutar planes de cara a la amenaza de la degradación y en particular sobre la cuantificación y estimación de la pérdida del suelo por erosión hídrica (Camas *et al.*, 2012).

Estudio como el del CP-SAGARPA (2013) muestra que cada año se pierde 1.42 millones de hectáreas de suelo, y la recuperación de la fertilidad de un suelo requiere varios años y tiene un costo aproximado de \$120,000.00 por hectárea. Bolaños *et al.* (2016) mencionan que el 76% de la superficie nacional tiene algún grado de afectación por erosión hídrica. Siendo los estados más afectados el Distrito Federal, Tlaxcala, Estado de México y Michoacán.

Como referencia de investigación cerca de la microcuenca, lo señala Silva *et al.* (2017) en la cuenca del Lago de Chapala, porción Michoacán, se encuentra sujeta a procesos de pérdida de suelo por erosión hídrica, acelerados por la falta de prácticas agrícolas que consideren la conservación del mismo, siendo más perceptible en áreas donde se desarrolla la agricultura de temporal; se presenta en el transcurso del arrastre de sedimentos, la pérdida de altos porcentajes de materia orgánica y macronutrientes, lo que influye en la disminución de su productividad.

En este sentido, Rodríguez *et al.* (2009) mencionan que las pérdidas más altas de suelo se presentan en zonas bajo cultivo limpio, ya que se asocia con la escasa cobertura y las deficientes prácticas de manejo del suelo.

De acuerdo con Castro (2013) para el caso de la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica, se han realizado trabajos tomando como base la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (EUPS). Con esto se permite el cálculo de las tasas de pérdida de suelo, elaborando cartografía, permitiendo una identificación de áreas con sensibilidad a la erosión hídrica.

A nivel nacional existe poca información frente al empleo de estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica de los suelos con el modelo de base física Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (PPEH), Water Erosion Prediction Project (WEPP) por sus siglas en inglés. Shen *et al.* (2009) realizaron una comparación para el modelado de la erosión del suelo entre WEPP con el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) obteniendo como mejor modelo el WEPP tanto para la escorrentía y producción de sedimentos, de la misma manera Gvozdenovich *et al.* (2017) demuestran que el modelo WEPP comparado con la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (EUPS) presenta mayor eficiencia en la estimación de erosión hídrica. Esto pone en evidencia la gran necesidad de contar con información para ajustar el modelo al escenario actual que se presenta en la microcuenca de la presa Guaracha. Por ello, es

necesario continuar generando investigación que permita estimar no solo los sedimentos, sino también el escurrimiento con mayor nivel de detalle para que se pueda contribuir a un mejor manejo del recurso suelo y prácticas de conservación que se asocien al control de la erosión hídrica.

Debido a que no existen trabajos relacionados con la cuantificación y la estimación mediante este modelo. Como solución alternativa a las parcelas de escurrimiento se pretende explorar el uso del modelo de base física WEPP, para estimar la erosión hídrica. Ya que los métodos directos para la evaluación de la erosión hídrica suelen proporcionar datos precisos, pero son laboriosos, requieren mucho tiempo y son costosos (Pando *et al.*, 2003). El método indirecto evalúa la tasa de erosión relativamente fácil de aplicar, pero su precisión no ha sido ampliamente probada para los diferentes usos de suelo. Por estas razones, se propone como método alternativo el desarrollo de una metodología para estimar la erosión hídrica. La solución posee la ventaja de no alterar la superficie del terreno.

Se espera que esta solución se convierta en una herramienta que permita obtener información precisa y oportuna que facilite la toma de decisiones en temas de gestión del uso del suelo, transporte de sedimentos, manejo de recursos hídricos y prácticas agrícolas.

Las actividades económicas y productivas desarrolladas en la parte de la microcuenca, aunadas a las características edafoclimáticas y topográficas, generan el desprendimiento de la capa arable impactando no solo la fertilidad y productividad de los suelos, sino que provoca una alta cantidad de sedimentos, generándose un impacto negativo ya que esta provoca azolvamientos en los ríos y la presa aumentando las amenazas de inundación en los cultivos y en las comunidades cercanas.

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

- Cuantificar y estimar la pérdida del suelo por erosión hídrica en la microcuenca de la presa Guaracha, Michoacán.

#### **3.2 Objetivos particulares**

- Determinar la escorrentía y sedimentos utilizando parcelas de escurrimiento en diferente uso del suelo y vegetación.
- Determinar la infiltración del suelo en los diferentes usos de suelo y su relación con los procesos erosivos.
- Cuantificar la pérdida de nutrimentos en cada uso de suelo y vegetación.
- Utilizar el modelo de base física Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (PPEH) para estimar los sedimentos y escurrimientos.
- Realizar una correlación entre los valores de cuantificación y estimación de sedimentos y escorrentías en cada uso de suelo y vegetación.

### **IV. HIPÓTESIS**

Un manejo inadecuado del suelo en actividades agrícolas presenta mayor erosión hídrica. Esta erosión aumenta conforme transcurre la temporada de lluvias. Siendo alterado la captación de carbono orgánico del suelo (COS).

## V. REVISIÓN DE LITERATURA

### 5.1 Definición de suelo

La palabra suelo, como muchas otras, tiene varios significados. Tradicionalmente, se le conoce al suelo como el cuerpo natural para el crecimiento de las plantas, ya sea que presente o no horizontes. Las personas consideran que el suelo es importante porque ayuda a las plantas que suministran alimentos, filtra el agua y recicla los desechos (USDA, 2014).

Ming *et al.* (2012) mencionan que el suelo, es la piel extremadamente delgada que cubre nuestro planeta y aporta nutrientes a los ambientes. Forma parte de una unidad viviente, uniendo partículas inorgánicas con materia orgánica y biota bañada en un medio de agua líquida y gases. De igual manera es considerado como un sistema biogeoquímico y que evoluciona lentamente, regula y amortigua el suministro de nutrimentos, la calidad y cantidad del agua para el crecimiento de organismos vivientes.

La definición más aceptada es que, el suelo es un cuerpo natural trifásico compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases, que está sobre la superficie, ocupa espacio y se caracteriza por una o ambas de las siguientes características: horizontes o capas, que son distinguibles por el material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, migraciones y transformaciones de materia y energía; o la capacidad de soportar las raíces de las plantas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 2017).

En cambio, Kohnke y Franzmeier (1995) dicen que una definición de suelo puede ser dada desde varios puntos, dependiendo de la función del suelo en el que estamos interesados (Gallardo, 2017).

### 5.2 Factores formadores de los suelos

De acuerdo con Ortiz (2010) para la formación del suelo existen cinco factores, los cuales son: Material parental (pasivo), Clima (activo), Biosfera (activo), Relieve (pasivo) y Tiempo (neutro).

### **5.2.1 Material parental**

El material parental del suelo se refiere a los materiales no consolidados, orgánicos y minerales en los que se forman los suelos (Soil Survey Staff, 2017).

Chinchilla *et al.* (2011) hacen referencia, en que, con la génesis de suelos, se conoce la taxonomía, propiedades fisicoquímicas, mineralógicas y cuál factor formador ha sido determinante en la evolución del suelo.

El material parental es definido como el estado inicial de la materia sólida que constituirá el sistema suelo, ya que influye en sus características morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas y en consecuencia en su fertilidad. Se consideran tres orígenes para los materiales, que al intemperizarse llegan a constituir un suelo: geológico (rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas), orgánico y antrópico (Krasilnikov *et al.*, 2011).

De esta manera, el suelo se forma como consecuencia del fenómeno llamado intemperismo que altera a la roca. El intemperismo, también llamado comúnmente meteorización, es la acción de fuerzas químicas, físicas, biológicas que actúan sobre las rocas, permitiendo la formación de horizontes para constituir así suelo genéticamente evolucionado hasta la normalidad (Lin, 2012).

### **5.2.2 Clima**

El clima es uno de los factores dominantes en la formación de suelos. Su mayor influencia está dada por la precipitación y la temperatura. Algunos efectos son: Acumulación de  $\text{CaCO}_3$  en regiones áridas, suelos ácidos en áreas húmedas, erosión hídrica, mayor intemperismo y lavado de minerales (Ortiz, 2010). Del mismo modo, Dai y Huang (2006) señalan que las temperaturas más cálidas significan un mayor crecimiento de las plantas, organismos y descomposición de la materia orgánica.

### **5.2.3 Biosfera**

De acuerdo a Liu *et al.* (2007) la actividad de las plantas y animales, así como la descomposición de sus residuos orgánicos y sus desperdicios, ayudan al desarrollo de suelo como lo es el contenido y distribución de materia orgánica, acidez y compactación del suelo.

#### **5.2.4 Relieve**

El relieve comprende las deformaciones de la superficie terrestre, dictadas por la geomorfología del paisaje e interactúa con los otros factores como el clima y la biosfera de manera dinámica, obteniéndose diferentes paisajes y unidades del suelo. Este factor afecta el desarrollo pedogenético de diferentes maneras. Entre los parámetros más importantes están la altitud, la forma, magnitud y orientación de la pendiente. Con todo esto se incide a la temperatura superficial, régimen de humedad, textura del suelo, así como remoción y lavado interno del perfil del suelo (Krasilnikov *et al.*, 2011).

#### **5.2.5 Tiempo**

El tiempo constituye un agente que influye en la diferenciación espacial en la cobertura del suelo, este factor es el más difícil de percibir (Krasilnikov *et al.*, 2011). Sin embargo, existen condiciones que retardan el desarrollo del suelo como son: la baja precipitación, baja humedad, alto porcentaje de arcilla, materiales parentales resistentes, temperaturas bajas y nivel del agua elevado (Ortiz, 2010).

### **5.3 Procesos de formación de los suelos**

Las variables que presenta el medio ambiente aumentan los procesos que participan sobre el suelo geológico para afectar la alteración pedogenética. En ocasiones, existen muchos procesos que accionan parcialmente en conjunción y parcialmente en oposición.

De acuerdo con Turk *et al.* (2011) los procesos de formación del suelo se clasifican en cuatro: Adiciones, Pérdidas, Transformaciones y Migraciones o Translocaciones.

Las Adiciones son parte de los materiales que llegan agregarse al perfil del suelo proveniente de fuentes externas, tales como, la materia orgánica y sales contenidas en las aguas. Los residuos de estos procesos se acumulan en los suelos en formas complejas, dado que la adición de residuos orgánicos es mayor cerca de la superficie.

Las Pérdidas se refieren a los materiales que salen del perfil del suelo, ocurren a través de la lixiviación causada por el agua, ya que algunos elementos son llevados a las corrientes o agua subterránea, por erosión de los materiales y por la filtración de solutos.

Las Transformaciones por medio del intemperismo de minerales y la descomposición de la materia orgánica, provocan que los constituyentes del suelo sean destruidos. La meteorización de los minerales proporciona no solo nutrientes para la actividad biológica, sino también bloques de construcción para síntesis de minerales secundarios como lo son las arcillas.

Las Migraciones o Translocaciones de materiales pasan de un horizonte superior o interno a otro, esto se realiza regularmente por agua y la acción de organismos del suelo. Por lo general, los compuestos de materia orgánica de bajo peso molecular y pequeñas partículas de arcilla o coloides pueden moverse a través de los poros del suelo.

Los procesos del suelo reflejan un equilibrio entre ganancias, pérdidas, redistribución interna y cambios químicos y físicos. Las propiedades resultantes del suelo representan el efecto a largo plazo de estos procesos que actúan sobre una columna de reacción que está abierta al intercambio de materia y energía con el medio ambiente.

Autores como Bockheim y Gennadiyev (2000) identificaron 17 procesos de formación, los cuales son: Argiluvación, Enriquecimiento biológico de cationes, Andisolización, Paludización, Gleyización, Melanización, Ferralitización, Podzolización, Lavado de cationes, Vertización, Crioturbación, Salinización, Calcificación, Solonización, Solodización, Silicificación y Antrosolización.

## **5.4 Propiedades físicas y químicas de los suelos**

### **5.4.1 Propiedades físicas del suelo**

#### **5.4.1.1 Textura del suelo**

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla (Soil Survey Staff, 2017). Se basa en la cantidad de partículas menores de 2 mm de diámetro (Kohnke y Franzmeier, 1995).

Fischer *et al.* (2014) mencionan que la textura afecta tanto las propiedades físicas, químicas y biológicas. Ya que esta propiedad ayuda a la facilidad de abastecimiento de nutrientes y también a la retención de agua y aire, tan importante para la vida de las plantas. En los suelos de textura fina predomina la arcilla, poseen mayor capacidad de retención de nutrientes y



por lo regular son más fértiles. Los suelos arenosos son más porosos permitiendo una percolación e infiltración de agua más rápida. En cambio, los suelos arcillosos tienen una mayor capacidad de retención de agua debido a que presentan mayor número de microporos. Las 12 clases texturales por orden de finura son: Arena, arena migajosa, migajón arenoso, franco, migajón limoso, limo, migajón arenoso arcilloso, migajón arcilloso, migajón arcillo arenoso, arcilla arenosa, arcilla limosa y arcilla (Reza *et al.*, 2016).

#### **5.4.1.2 Estructura del suelo**

La estructura del suelo se refiere al reacomodo de las partículas elementales que forman compuestos y que tienen propiedades diferentes de las de una masa igual de partículas elementales sin agregación (Munkholm *et al.*, 2013).

Esta propiedad afecta la penetración del agua, el drenaje, la aireación, el desarrollo de raíces y facilidades en la labranza. De esta manera, una mala estructura puede significar efectos perjudiciales para las plantas por el exceso o deficiencia de agua, falta de intercambio gaseoso, incidencia de enfermedades, poca actividad microbiana e impide el crecimiento de las raíces (Peigné *et al.*, 2013; Pires *et al.*, 2017).

#### **5.4.1.3 Densidad del suelo**

La densidad es el peso por unidad de volumen, reportada comúnmente en  $\text{g/cm}^3$ . En el estudio de los suelos se distinguen dos tipos de densidades: Densidad real y densidad aparente. La densidad real permite diferenciar la evolución de los horizontes con base a los materiales litológicos y permite conocer la movilidad del agua en el perfil del suelo. En cambio, la densidad aparente es importante para estudios cuantitativos de suelos, ya que es fundamental para calcular los movimientos de humedad, grados de formación de arcilla, acumulación de los carbonatos en los perfiles, cálculo del peso de una capa de suelo, espacio poroso y láminas de riego (Ng *et al.*, 2014; Ortiz, 2010).

#### **5.4.1.4 Color del suelo**

El color del suelo refleja las propiedades biofísicoquímicas de la relación suelo y planta. El color puede ser heredado del material parental o de cambios ocurridos en el perfil de suelo. Se tiene relación con el clima y el contenido de materia orgánica (Kirillova *et al.*, 2015).

## **5.4.2 Propiedades químicas del suelo**

### **5.4.2.1 pH del suelo**

Es una de las características más importantes, ya que los microorganismos y las plantas responden a su medio químico y se puede presentar en tres condiciones: acidez, neutralidad y alcalinidad (Rosas *et al.*, 2017).

La reacción del suelo es fundamental ya que influye en la morfogénesis, en los niveles de fertilidad, participando en la disponibilidad nutrimental para las plantas y condiciona los efectos del cambio global en asociaciones vegetales y ecosistemas terrestres (Cheng *et al.*, 2014).

La acidez del suelo se puede generar a través del humus o materia orgánica, arcillas aluminosilicatadas, óxidos de Fe y Al, sales solubles y CO<sub>2</sub>. Las causas más comunes que llegan a modificar la reacción del suelo ya que en las regiones áridas el pH del suelo es más elevado que en las húmedas debido a aportaciones orgánicas inferiores a las de climas lluviosos, menos actividad microbiana y precipitaciones que no se drenan. Finalmente, la calidad y cantidad de agua, el drenaje y material parental son los factores principales que influyen en la reacción del pH (Ortiz, 2010).

### **5.4.2.2 Materia orgánica**

La materia orgánica de los suelos se genera y acumula en ellos por incorporaciones de residuos vegetales, así como aquella incorporada de descomposición de fauna. De acuerdo con Tan (2003) a medida que aumenta la precipitación existe aumento en la cantidad de materia orgánica, ya que se fermenta por la acción de los microorganismos, formándose quelatos, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, huminas y aminoácidos con bajo y alto peso molecular. Esto conlleva a que aporte al suelo macro y micronutrientes e incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Yang *et al.* (2014) también comentan que la materia orgánica actúa como reguladora de pH, participa en propiedades físicas como el mejorar la estructura del suelo, favoreciendo la aireación ya que aumenta la cantidad de agregados, mejora la capilaridad y permeabilidad del suelo; pero en general tiene un impacto tremendo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas, garantizando la fertilidad del suelo.

Por otra parte, Lehmann y Kleber (2015) hacen referencia en que el intercambio de nutrimentos, energía y carbono entre la materia orgánica del suelo, el medio ambiente, los sistemas acuáticos y la atmósfera es importante para la productividad agrícola, la calidad del agua y el clima.

#### **5.4.2.3 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

Se refiere a la capacidad que presenta un suelo para el intercambio entre un catión en solución y otro catión sobre material como las arcillas o material orgánico. En suelos de zonas áridas los cationes intercambiables son principalmente básicos como:  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$  y  $\text{Na}^{+}$ . Mientras que en suelos de zonas húmedas  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{H}^{+}$  y  $\text{Al}^{+3}$  (Ortiz, 2010).

#### **5.4.2.4 Conductividad Eléctrica**

Esta propiedad se relaciona con la concentración de sales en la solución del suelo. La conductividad eléctrica es una de las propiedades del suelo, que está asociada con el tamaño de partículas, estructura, porosidad, contenido de agua y temperatura. En suelos arcillosos, la conductividad eléctrica está relacionada con la distribución del tamaño de partículas, donde la densidad de carga eléctrica se encuentra básicamente en la superficie de las partículas de arcilla (Bai *et al.*, 2013).

### **5.5 Funciones y servicios de los suelos**

De acuerdo a Greiner *et al.* (2017) los suelos juegan siete funciones fundamentales: 1) producción de alimentos y biomasa, 2) almacenamiento, filtración y transformación de compuestos, 3) hábitats para organismos vivos, 4) medio físico y cultural, 5) fuente de materias primas, 6) reserva de carbono y 7) archivo del patrimonio geológico y arqueológico.

Los servicios ecosistémicos que realiza el suelo se agrupa en cuatro categorías: 1) servicios de aprovechamiento (alimentos, agua, madera, fibra y combustibles); 2) servicios de regulación (clima, inundaciones, erosión y procesos biológicos); 3) servicios culturales (estéticos, espirituales, educativos y recreativos) y 4) servicios de apoyo (reciclado de nutrientes, producción y biodiversidad). De esta manera los suelos son determinantes importantes de la economía de una región y la toma de decisiones y su cuidado es esencial (Adhikari y Hartemink, 2016).

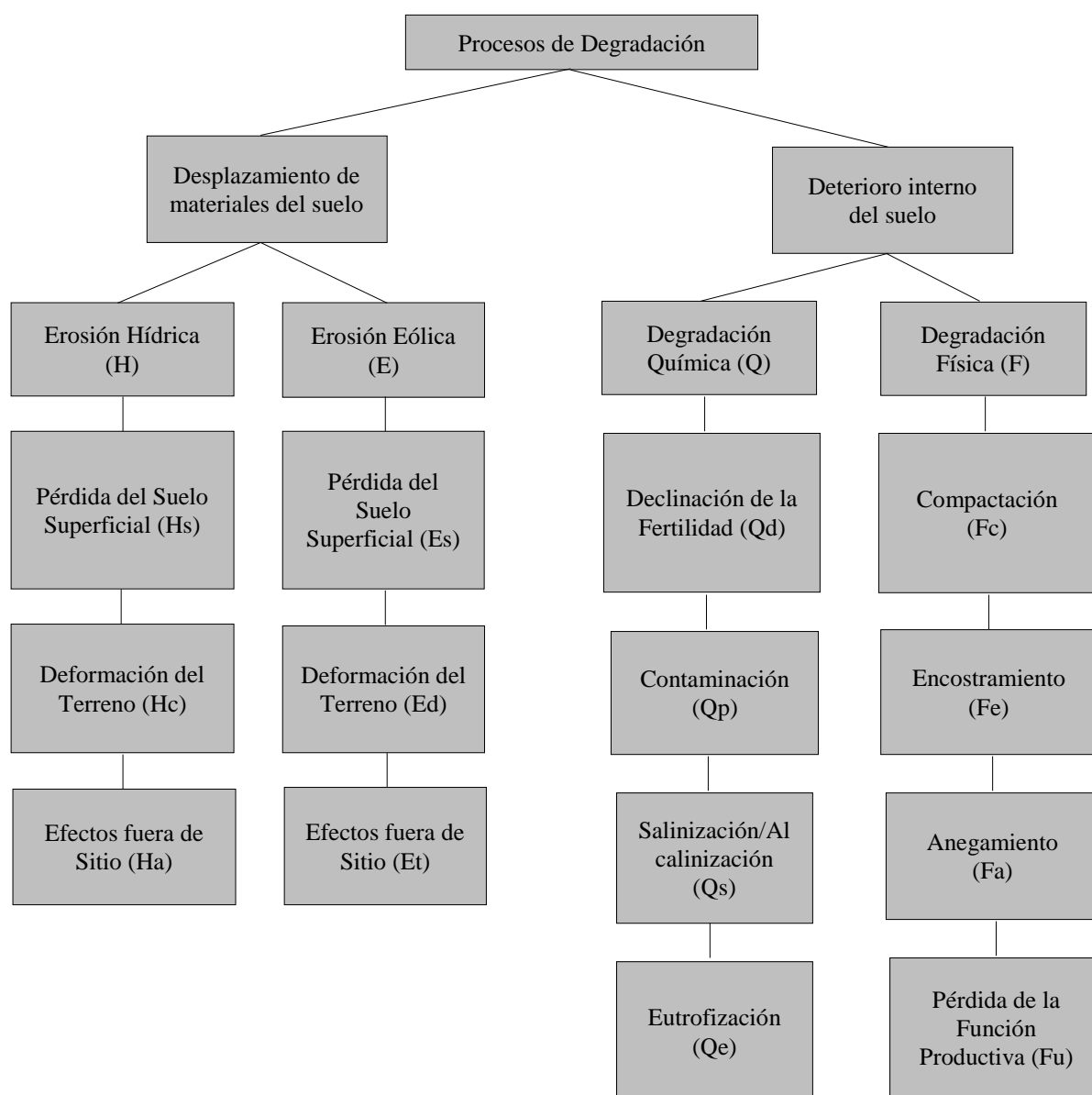
Haslmayr *et al.* (2016) diferencian las funciones del suelo de la siguiente manera:

- 1) Funciones naturales (ecológicas).
  - a) Entorno de vida para humanos, animales, plantas y microorganismos.
  - b) Elemento característico de la naturaleza.
  - c) Parte integral del equilibrio ecológico (agua, nutrientes)
  - d) Filtro, buffer y transformador de sustancias.
- 2) Funciones históricas (socioculturales).
  - a) Archivo de historia natural y cultural.
- 3) Funciones de uso del suelo (socioeconómicas).
  - a) Fuente de materia prima (arcilla, turba, grava).
  - b) Ubicación para uso agrícola incluyendo pastizales y silvicultura.
  - c) Espacio para asentamientos humanos, recreación turística y transporte, etc.

Para Ortiz (2010) los suelos juegan cinco papeles fundamentales. El primero es considerarlo como el medio natural para el crecimiento y desarrollo de las plantas y que ofrece elementos nutritivos a toda la planta. La segunda está referida a las pérdidas, los usos, la contaminación y la purificación del agua. En el tercer papel, el suelo actúa como un sistema natural de reciclado, donde se llevan a cabo productos de desecho y restos de plantas y animales, que son asimilados y sus elementos básicos en los que se transforman se vuelve disponibles y son usados nuevamente. Como cuarta función, los suelos proporcionan el hábitat para un gran número de organismos vivos. Finalmente, el suelo se convierte en el medio ingenieril, como un importante material y cimiento de construcción.

## 5.6 Erosión hídrica

Se refiere al proceso de degradación por desplazamiento de materiales del suelo como agente causativo el agua (CP-SAGARPA, 2013) (Figura 1). El proceso de erosión hídrica se lleva a cabo en tres fases: la primera consiste en la separación o desprendimiento de los agregados del suelo en partículas individuales; la segunda se refiere al transporte de las partículas por el agente erosivo el agua; y la tercera es la depositación (FAO, 2015).



**Figura 1.** Procesos de degradación del suelo.

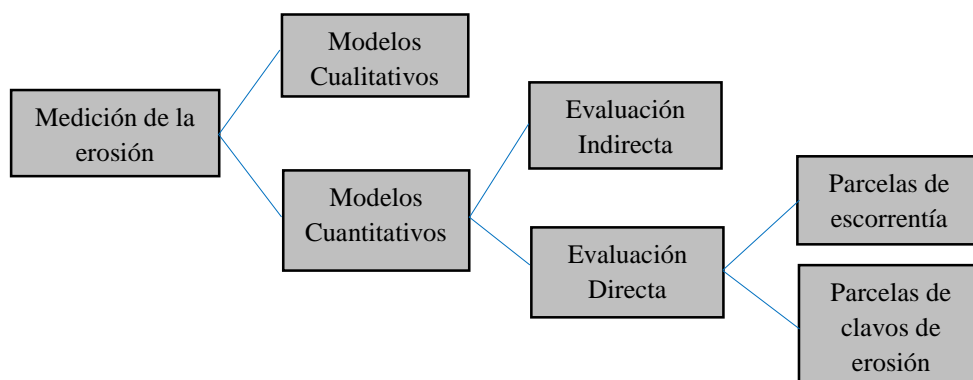
De acuerdo a Gutiérrez (2014) las formas de la erosión son las siguientes: a) laminar, b) surcos o canalillos y c) Cárcavas.

- a) **Erosión laminar.** - Está directamente relacionada con la salpicadura de la lluvia. Es la erosión que más afecta la agricultura por degradación y pérdida del horizonte A de los suelos.
- b) **Erosión en surcos.** - Son el resultado de la remoción del suelo por la acción de la escorrentía. La escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para formar los surcos.
- c) **Erosión en cárcavas.** - Es el estado más avanzado de la erosión en surcos. Es uno de los procesos más severos ya que modifican el paisaje y generan un gran movimiento de sedimentos a los cuerpos de agua

Morales (2014) menciona que los principales factores que se relacionan en el proceso de la erosión hídrica son: Factor activo: Precipitación. Factor pasivo: Suelo, topografía y cobertura vegetal.

### 5.7 Métodos de cuantificación de la erosión hídrica del suelo

García (2006), citado por Estrada (2016) hace referencia en que, para la evaluación directa de la erosión hídrica, las dos metodologías más utilizadas son: a) Parcelas de escorrentía y b) Parcelas de clavos de erosión (Figura 2).



**Figura 2.** Tipos de modelos en la evaluación de la erosión hídrica.

### **5.7.1 Parcelas de esorrentía**

Constituyen uno de las metodologías más precisas para cuantificar la erosión del suelo bajo diversas condiciones de uso de suelo y vegetación. Son porciones de terreno de tamaño variable, limitadas por paredes que evitan el paso del agua de esorrentía hacia afuera como hacia adentro, para lo cual son establecidos límites con bandas de plástico, metal, madera u otro material. Presentan un elevado costo y trabajo. En estas parcelas por lo general se permite al menos dos repeticiones (Ávila, 2013). Cabe mencionar, que antes de instalar estas parcelas se debe de tener en cuenta diseños estándares, dimensión de la parcela, forma de la parcela, bordes de la parcela y colectores (Estrada, 2016).

Para Vega (2008) las razones donde se justifica el empleo de las parcelas de esorrentía son: Fines demostrativos, para estudios comparativos y obtención de datos que se van a emplear para validar o construir algún modelo o ecuación destinado a predecir la erosión hídrica. Sin embargo, la información obtenida, es limitada por falta de continuidad en el tiempo, para obtención de dicha información.

### **5.7.2 Parcelas de clavos de erosión**

Consiste en colocar parcelas rectangulares a las que se les instalan clavos, marcando la línea inicial del suelo. La extensión del clavo debe presentar una longitud de penetración de 30 cm y un diámetro de por lo menos 6 mm; los clavos pueden ser de hierro, madera u otro material. Estas parcelas son fáciles de obtener y de bajo costo (Estrada, 2016). Una desventaja de la colocación de los clavos es que pueden ser fácilmente dañados por animales (Ávila, 2013).

## **5.8 Modelos de estimación de la erosión hídrica del suelo**

La investigación aplicada sobre la erosión hídrica ha conocido un importante avance en los últimos años gracias a la incorporación de modelos de simulación numérica. Estos modelos permiten evaluar espacialmente la ocurrencia de los procesos de erosión. El interés de los modelos de erosión y producción de sedimento es por parte de administraciones públicas como es el caso de la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) y del Departamento de Agricultura (USDA) de los Estados Unidos.

Los distintos modelos se diferencian en aspectos importantes de cara a su aplicación como la naturaleza de los procesos que incluyen, su formalización matemática, la representación espacial y temporal, los requerimientos de información y de tiempo de computación (Asselman, 2003).

La elección del modelo para estimar la erosión hídrica dependerá de los objetivos que se establezcan y de las características propias del área de estudio.

Merritt *et al.* (2003) mencionan que dependiendo de la forma matemática, los modelos se dividen en tres categorías: Empírico o estadístico, conceptuales y basados en la física. Los modelos empíricos son los más sencillos, se basan en el análisis estadístico de un conjunto de observaciones. Los modelos conceptuales están basados en representaciones del sistema de erosión como una serie interna de almacenamientos entre los que se establecen relaciones matemáticas simplificadas. Los modelos de base física, estos se basan en leyes físicas que controlan las relaciones entre los diferentes parámetros y procesos observados. Los esfuerzos actuales en la modelización de la erosión del suelo se centran en procesos conceptuales y base física.

Gomes *et al.* (2017) mencionan que un gran número de modelos de erosión están basados en la USLE. Algunos ejemplos, son los modelos: AGNPS (Agricultural Non Point Source Pollution), ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator), EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) y SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

### **5.8.1 Modelos empíricos**

Los modelos empíricos son generalmente los más simples. Se basan principalmente en análisis de observaciones y buscar caracterizar la respuesta de los datos. Se fundamentan en la utilización de procedimientos de inferencia estadística para su formulación. Para ello se basan en la acumulación de información cuantitativa a partir de instalaciones experimentales y de monitorización en campo (Wheater *et al.*, 1993).

Debido a la utilización de técnicas de regresión, los modelos empíricos son matemáticamente sencillos, adquiriendo generalmente la forma de una ecuación paramétrica. Estas



características han hecho que los modelos empíricos sean los más utilizados en la práctica como herramienta de planificación (Karydas *et al.*, 2012).

La gran mayoría de modelos de erosión de tipo empírico que se utilizan en la actualidad se derivan de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*Universal Soil Loss Equation*, USLE). La USLE evalúa la pérdida de suelo promedio producida en un año por la erosión hídrica por el flujo laminar y en surcos sobre zonas en donde no hay formación de cárcavas, siendo diseñada para parcelas agrícolas con una superficie de hasta 1 hectárea (Bahrawi *et al.*, 2016).

#### **5.8.1.1 USLE (Universal Soil Loss Equation)**

La ecuación USLE ha sido el modelo de erosión empírico más utilizado. La predicción de la pérdida de suelo anual promedio se obtiene como función de seis factores:

$$E=R*K*L*S*C*P$$

Donde  $E$  ( $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) es la pérdida de suelo promedio;  $R$  ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) es el factor de erosividad de la precipitación;  $K$  ( $\text{ton ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ) es el factor de erodibilidad del suelo, o la pérdida de suelo por unidad de erosividad de la lluvia y de la escorrentía, medido sobre una parcela de 22.1 m de largo y 1.83 m de ancho, con una pendiente constante del 9 %;  $LS$  es el factor topográfico que incluye la longitud de la ladera ( $L$ ) y la pendiente ( $S$ ), y representa la razón de pérdida de suelo con respecto a la parcela de 22.1 m y 9% de pendiente;  $C$  es el factor de manejo de suelo y cobertura vegetal, expresado como la razón de pérdida de suelo con respecto a una parcela bajo barbecho continuo;  $P$  es el factor de las medidas de conservación del suelo, expresado como la razón de pérdida de suelo con respecto a un sistema de laboreo en pendiente (Devathaa *et al.*, 2015).

Alatorre y Beguería (2009) hacen mención que la USLE ha sido modificada y adaptada a muchos casos. Algunos ejemplos son la ecuación MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) y RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). A pesar de su popularidad, los modelos empíricos han sido muy criticados. Al basarse exclusivamente en relaciones estadísticas obtenidas a partir de una base de datos, su extrapolación a otras áreas de estudio o a condiciones diferentes resulta difícil de justificar.

Otro aspecto criticado de estos modelos es el emplear suposiciones sobre el medio físico. La USLE se limita a la estimación de la erosión bruta y no contempla los procesos de transporte y sedimentación. Al estar diseñados para predecir la erosión promedio a largo plazo, los modelos empíricos no son sensibles a los eventos, por lo que no pueden utilizarse para modelar procesos de precipitación-escorrentía (Prado, 2017).

Jakeman *et al.* (1999) dicen que los modelos empíricos son frecuentemente más usados que los modelos complejos, debido a que pueden ser implementados en situaciones donde la principal limitante es la falta de datos para alimentar al modelo. Ya que permiten el primer acercamiento en identificar causas y fuentes de los sedimentos erosionados.

### **5.8.2 Modelos conceptuales**

Estos modelos se basan en conceptualizaciones de los mecanismos de transporte de partículas con una serie de almacenamientos temporales que se establecen mediante ecuaciones matemáticas genéricas y están controladas por parámetros que se determinan con calibración a partir de datos observados como lo son la escorrentía y concentración de sedimento (Merritt *et al.*, 1993).

Se basan en descripciones generales de los procesos que ocurren dentro de una cuenca hidrográfica. Estos modelos son adecuados para describir el comportamiento dinámico del sistema de erosión hídrica, permitiendo indicaciones en los efectos cualitativos y cuantitativos de los cambios de uso de suelo, no se requieren grandes bases de datos tanto espaciales como temporales (Vanacker *et al.*, 2013).

La dificultad de estos modelos conceptuales es la determinación de los valores de los parámetros, ya que estos no se corresponden con parámetros físicos y deben ser ajustados mediante un proceso de calibración. Estos modelos presentan problemas de predicción cuando el número de parámetros es muy elevado en comparación con la información disponible para la calibración, los modelos tienden a presentar los resultados de forma agregada y proporcionan un escaso nivel de detalle acerca de los procesos internos del sistema, son capaces de describir los procesos fundamentales que gobiernan la erosión hídrica. Esto es lo principal que distingue los modelos conceptuales de los empíricos, estos últimos se enfocan

fundamentalmente a la predicción confiando en las relaciones observadas entre las distintas variables y no proporcionan una descripción dinámica de los procesos (Webb y Strong, 2011).

#### **5.8.2.1 AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution)**

Modelo para simulación de pequeñas cuencas a resolución de evento. Es posible obtener estimaciones uniformes y precisas de la escorrentía con énfasis principal en nutrientes y sedimentos, para comparar los efectos de varias conservaciones alternativas que podrían incorporarse en la gestión de cuencas hidrográficas. Es posible identificar las zonas en donde se produce carga de contaminantes, así como la ruta por cual se transporta (Lenzi y Luzio, 1997).

#### **5.8.2.2 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)**

El modelo procede de Simulator for Water Resources in Rural Basin (SWRRB). Se puede aplicar para predecir los efectos de cambios en las condiciones ambientales de una cuenca sobre la producción de escorrentía, erosión y el transporte de sedimentos y contaminantes químicos. Puede efectuar simulación continua ya que el modulo hidrológico se basa en una ecuación de balance de masas, teniendo en cuenta la precipitación, escorrentía superficial, evapotranspiración, infiltración y escorrentía subterránea (Gassman *et al.*, 2014).

#### **5.8.3 Modelos de base física**

Se basan en el entendimiento de los procesos físicos de erosión y transporte de sedimento, se describen mediante ecuaciones de transferencia de masa, momento y energía. Incluyen el arranque de partículas por el impacto de las gotas de lluvia y por la tensión ejercida por la escorrentía superficial, el transporte por impacto de gotas de lluvia, y el transporte y sedimentación por la escorrentía laminar (Morgan, 2005).

Alatorre y Beguería (2009) hacen referencia a que los primeros modelos físicos que se desarrollaron fueron: ANSWERS (Aerial Non Point Source Watershed Environment Response Simulation), CREAMS (Runoff and Erosion from Agricultural Management System), WEPP (Water Erosion Prediction Project), SHETRAN (European Distributed Basin Flow and Transport Modeling System) y SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Estos modelos se basan en ecuaciones de validez universal y sus parámetros poseen significado físico. En su mayoría tienen una representación espacial distribuida, que permite implementar las ecuaciones de conservación de masa, requieren de la introducción de una gran cantidad de parámetros, pero la información que se utiliza para la calibración de estos modelos procede de mediciones puntuales (Wagner, 2013).

Los problemas de calibración y sobreajuste del modelo se elevan por tanto en el caso de los modelos de base física, ya que la incertidumbre en la distribución espacial de los parámetros se propaga al modelo, generalmente amplificando la incertidumbre final de los resultados. Estos modelos sufren de problemas de obtención de diferentes combinaciones de parámetros que dan lugar a resultados óptimos, no presentan problemas para su extrapolación a áreas geográficas con características diversas, si bien conviene asegurarse al hacerlo de que la descripción de los procesos físicos que se hace en el modelo se adecua a las condiciones de la nueva área de estudio. Además, ayudan a permitir la predicción de la erosión bajo diferentes escenarios de clima y de usos de suelo, así como estudiar los efectos de transformaciones en los factores externos tales como el cambio climático (Pandey *et al.*, 2016).

#### **5.8.3.1 ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator)**

De acuerdo con Walling y Whelan (2003) dicen que es uno de los primeros modelos. El modelo ambicionaba llegar a ser una herramienta de gestión, capaz de predecir el efecto de distintos escenarios de uso del suelo y prácticas agrícolas, mediante una descripción de la erosión altamente basada en procesos.

#### **5.8.3.2 CREAMS (Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)**

Es un modelo que predice la escorrentía, la erosión y el transporte de contaminantes en parcelas agrícolas de superficie inferior a cinco hectáreas. El modelo fue desarrollado como una herramienta para evaluar los efectos de diferentes prácticas agrícolas sobre agentes contaminantes transportados por la escorrentía superficial y del agua contenida en el suelo por debajo del nivel de las raíces. El modelo puede operar sobre eventos o de forma continua. Evalúa también la erosión en regueros y la sedimentación en el cauce y a lo largo de la ladera, utilizando una aproximación de balance de masas (Merritt *et al.*, 2003).

### **5.8.3.3 EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator)**

Este modelo tiene como objetivo la cuantificación de la productividad del suelo. Predice los efectos de distintas estrategias de manejo sobre las dinámicas del agua, sedimentos, nutrientes y agroquímicos en una cuenca específica. Puede simular la escorrentía superficial, percolación y la evapotranspiración (Wang, 2011).

### **5.8.3.4 PESERA (*Pan-European Soil Erosion Risk Assessment*)**

El modelo proporciona una estimación de base física más detallada del proceso de la erosión. Predice la erosión ya teniendo en cuenta el comportamiento fenológico de cada cultivo, y por tanto tiene el potencial de responder a los cambios de clima y de la utilización del suelo. Las desventajas del modelo PESERA son el requerimiento de una compleja base de datos. Este modelo considera una serie de simplificaciones acerca de los procesos simulados lo que limita su adaptación a las circunstancias locales donde se pretenda aplicar (Fernández y Vega, 2016).

### **5.8.3.5 EROSION-3D**

Starkloff y Stolte (2014) mencionan que es un modelo de base física para hacer simulaciones de eventos de tormenta en pequeñas cuencas. Estos autores también comentan que el modelo incluye el arranque de partículas de suelo por la energía de la lluvia y por la escorrentía superficial mediante ecuación empírica dependiente de coeficientes adimensionales. Ayuda a calcular el transporte de sedimento, cantidad de escorrentía y la distribución espacial del tamaño de partículas del suelo en la cuenca.

### **5.8.3.6 WEPP (Water Erosion Prediction Project)**

WEPP es un modelo de base física que simula la producción de sedimentos y la disposición, utilizando un enfoque distribuido espacialmente y temporalmente (Shen *et al.*, 2009). El objetivo del modelo es reemplazar a la USLE. Además, fue creado para incorporar los mecanismos principales que controlan la erosión hídrica laminar, asumiendo que las tasas de arranque y sedimentación están en función de la capacidad de transporte. El modelo se puede

aplicar a tiempo de evento o continuo, teniendo una resolución espacial de parcela. Los procesos de erosión simulados por WEPP están limitados a la erosión laminar y en surcos. El modelo se subdivide en seis componentes conceptuales: información climática, hidrología, crecimiento vegetal, suelos, riego y sedimentación. Blackburn *et al.* (1990) mencionan que la precisión en la simulación en ocasiones es pérdida debido a la estimación de gran cantidad de parámetros incluidos en el modelo.

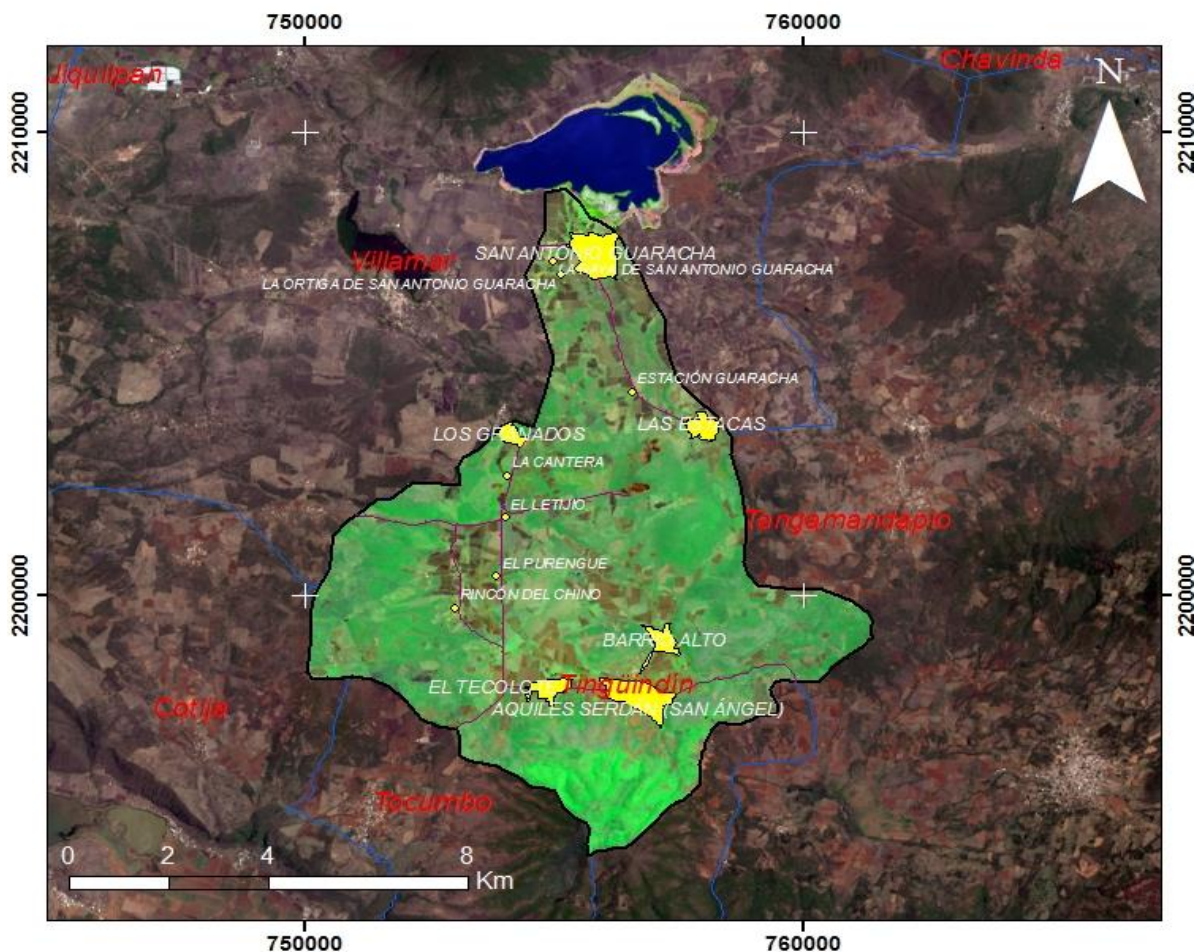
## VI. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 Descripción del área de estudio

El presente trabajo se realizó en los terrenos de la microcuenca La Presa Guaracha, Michoacán.

#### 6.1.1 Localización geográfica

La microcuenca de La Presa Guaracha, se localiza entre los municipios de Villamar, Tingüindín, Santiago Tangamandapio, Tocumbo y Cotija; Michoacán, en las coordenadas geográficas  $19^{\circ} 57' 27.91''$ ,  $19^{\circ} 49' 48.55''$  de Latitud Norte y  $102^{\circ} 33' 50.32''$ ,  $102^{\circ} 33' 30.02''$  de Longitud Oeste. Tiene una superficie aproximada de 7,263 ha, perímetro (43.40 Km). Una altitud que va de 1577 a 2246 m (Figura 3). El cuerpo de agua de la presa cuenta con aproximadamente 858 ha (INEGI, 2018).



**Figura 3.** Ubicación geográfica de la microcuenca la presa Guaracha, Michoacán.

### **6.1.2 Geología**

Estrada (2008) menciona que la zona de estudio pertenece al Eje Neovolcánico, en la subprovincia del lago de Chapala. Constituida principalmente por rocas ígneas extrusivas básicas (basaltos).

Tarbuck y Lutgens (2006) dicen que el basalto es una roca volcánica de grano fino que puede ser de color verde oscuro a negro, compuesta por piroxeno y plagioclasa rica en calcio con cantidades menores de olivino y anfíbol. También cuenta con una textura rugosa y presenta muchos poros, permitiendo que la roca sea permeable y el agua pueda penetrar con facilidad y transformarla en suelo.

### **6.1.3 Suelos**

De acuerdo al INEGI (2018) y WRB (2014) las unidades de suelos que predominan en la microcuenca La Presa Guaracha son los Vertisoles y Luvisoles, en menor proporción los Phaeozems, Leptosoles, Andosoles, Cambisoles y Gleysoles (Figura 4).

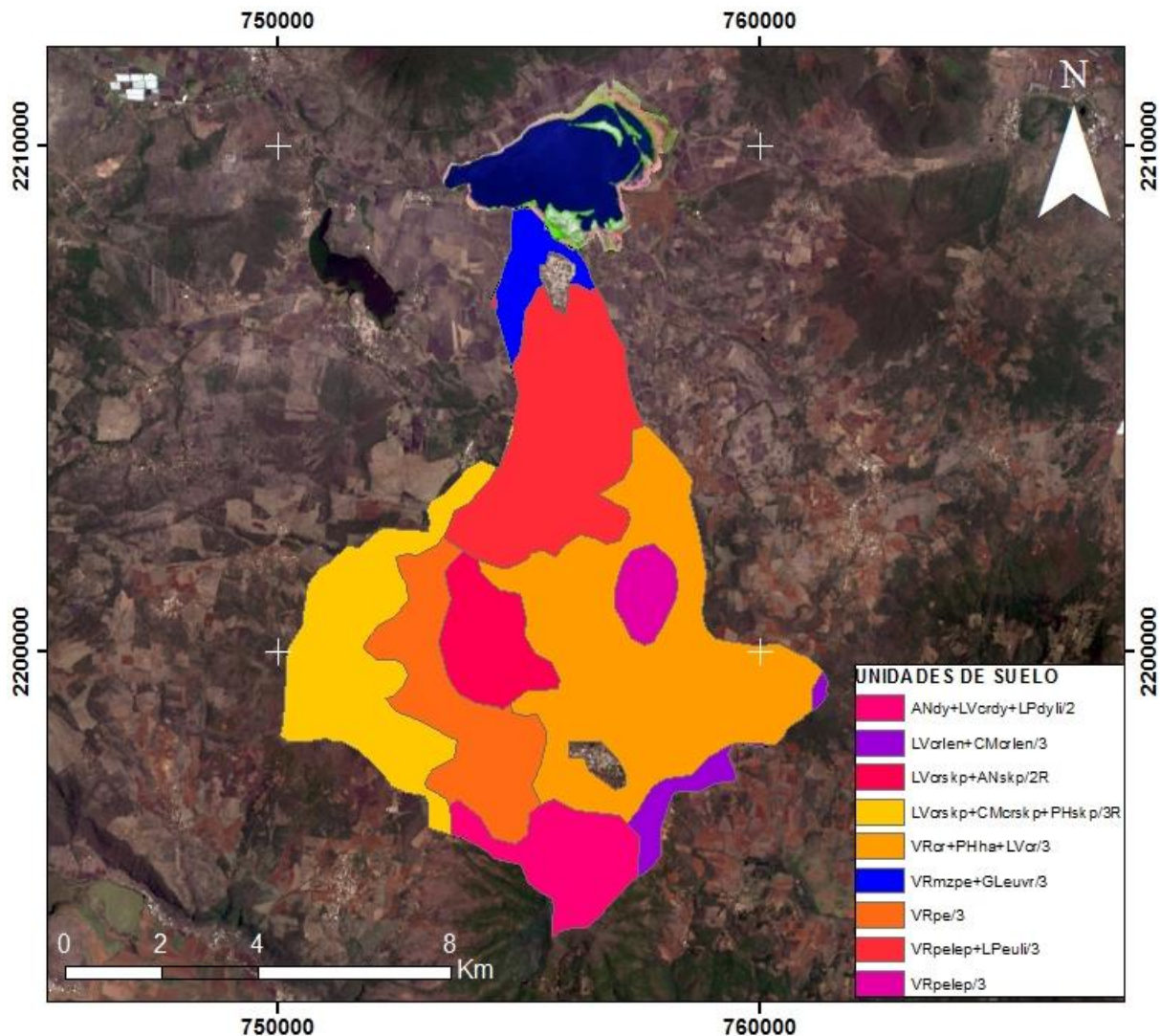
Los Vertisoles, presentan una textura arcillosa con alta proporción de arcillas expandibles llamada montmorillonita, forman grietas anchas y profundas cuando se secan. Se distribuyen en depresiones y en climas semiáridos a subhúmedos y húmedos con alternancia en estación seca y húmeda. El microrelieve de gilgai es peculiar en estos suelos (De la Rosa, 2013).

Estos suelos presentan gran potencial agrícola debido a que la fertilidad química es buena. Las características físicas es un problema por su difícil manejo del agua. Los usos agrícolas que se les da a estos suelos son en época de estiaje hasta agricultura bajo riego. La velocidad de infiltración es muy lenta (WRB, 2014).

Los Luvisoles, tienen un mayor contenido de arcilla en el suelo subsuperficial que en la capa superior del suelo, como resultado de procesos edafogénicos (especialmente migración de arcilla) que conduce a la formación de un horizonte árgico en el suelo subsuperficial. Presentan un color rojo a café rojizo, textura arcillosa con presencia de caolinita, drenaje superficial moderadamente lento y drenaje interior muy eficiente (Medina *et al.*, 2006).



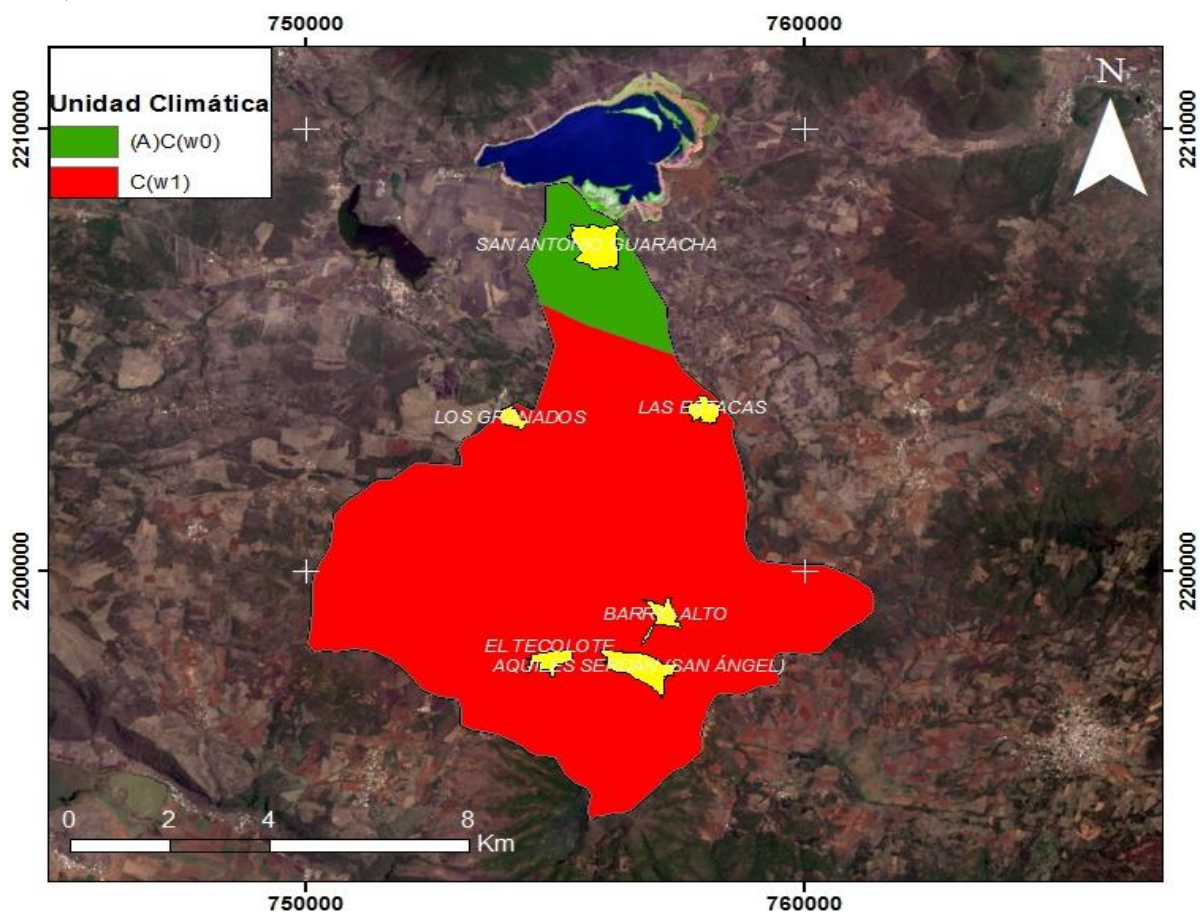
Presentan arcillas de alta actividad en todo el espesor del horizonte árgico y una alta saturación de bases a la profundidad de 50 a 100 cm. Los Luvisoles en la clasificación de la USDA (2014) son conocidos como Alfisoles con arcillas de alta actividad. Presentan una amplia variedad de materiales no consolidados como son los depósitos eólicos, aluviales y coluviales. Se presentan frecuentemente en terrenos ligeramente inclinados con marcadas estaciones secas y húmedas. Tienen una diferenciación edafogénica en el contenido de arcilla, con un menor contenido en la capa superior y un mayor contenido en el suelo subsuperficial. La mayoría de los Luvisoles son fértiles y adecuados para una amplia gama de usos agrícolas. Presentan un alto contenido de limo, son susceptibles a un deterioro de la estructura con las labores de labranza en húmedo o cuando se utiliza maquinaria pesada. Estos suelos en pendientes pronunciadas requieren medidas de control de la erosión (WRB, 2014).



**Figura 4.** Unidades de suelo en la microcuenca la presa Guaracha, Michoacán.

### 6.1.4 Clima

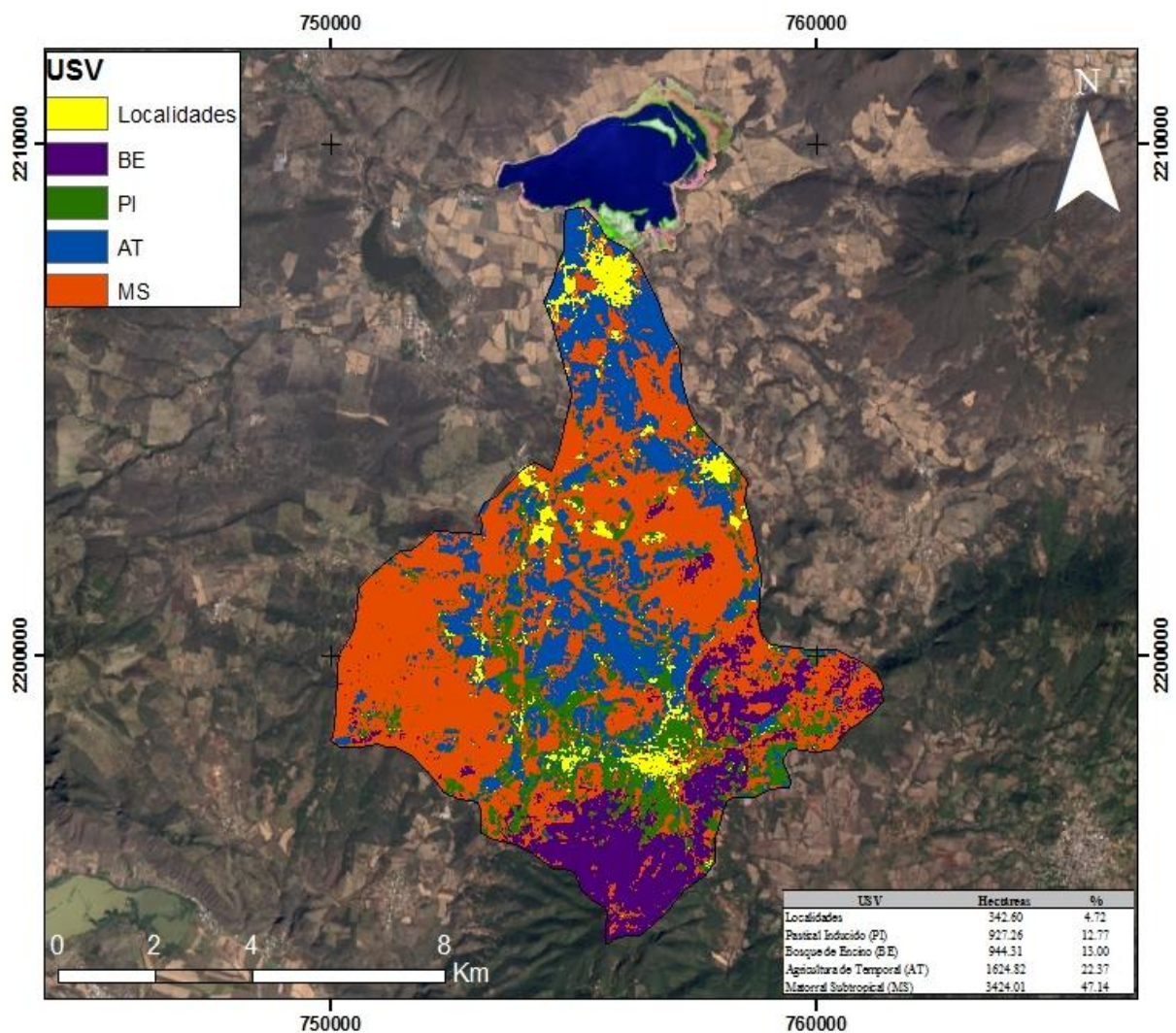
El clima en la parte norte de la microcuenca según la clasificación de Köppen modificada por García (2004) es semicálido, con lluvias en verano (A)C(w0), porcentaje de precipitación en invierno del 5 al 10.2%; con una precipitación anual de 800 mm, marzo es el mes que registra la menor precipitación (4.50 mm) y julio con la máxima (194.20 mm). El periodo de lluvias dentro de la microcuenca está comprendido entre los meses de junio a octubre, la época de estiaje es de noviembre a mayo. En la parte centro-sur el clima predominante es templado, subhúmedo con lluvias en verano C(w1), porcentaje de precipitación en invierno del 5 al 10.2%; con una precipitación anual de 950 mm, marzo el mes que registra la menor precipitación (5.90 mm) y julio el mes con la máxima de (226 mm) (Figura 5). La temperatura media anual en la parte norte es de 18.6 °C, el mes de mayo con mayor temperatura 22.3 °C y enero el mes más frío 14.6 °C. La temperatura media anual en la parte centro-sur es de 12 °C, el mes de mayo con mayor temperatura 15.1 °C y enero el mes más frío 8.5 °C (CONAGUA, 2018).



**Figura 5.** Climas existentes en la microcuenca la presa Guaracha, Michoacán.

### 6.1.5 Uso del suelo y vegetación

El principal uso del suelo dentro de la microcuenca es el matorral subtropical (MS), con una superficie de 3,424.01 ha (47.14%), seguido de la agricultura de temporal (AT) con 1,624.82 ha (22.37%), el bosque de encino (BE) con 944.31 ha (13%) y el pastizal inducido (PI) con 927.26 ha (12.77%) (Figura 6).



**Figura 6.** Uso del suelo y vegetación de la microcuenca la presa Guaracha, Michoacán.

## 6.2 Metodología

### 6.2.1 Cuantificación de la erosión hídrica

Durante el mes de junio se realizaron recorridos de verificación en campo para determinar el uso del suelo y vegetación presente en la microcuenca de La Presa Guaracha. En donde se colocaron un total de ocho parcelas de escurrimiento, dos por cada uso de suelo y vegetación (BE, PI, MS y AT).

Las parcelas fueron delimitadas y aisladas con láminas galvanizadas, las cuales se fijaron en el suelo, enterrándolas o utilizando rocas y estacas según el caso. Cada parcela presentó una superficie de 35 m<sup>2</sup>, 7 m de largo x 5 m de ancho. Longitud sugerida por Parsons *et al.* (2006), para disminuir el efecto de incremento de la cantidad de sedimentos (a mayor longitud de la parcela) al inicio y su reducción al final de los eventos de lluvia. Cabe mencionar que cada una de las parcelas está compuesta de la zona de escurrimiento y sedimentación, por un sistema colector con un recipiente de plástico con capacidad de entre 40 y 50 litros. También se colocaron lonas, con la finalidad de evitar la evaporación del agua escurrida (Figura 7).



**Figura 7.** Diseño de las parcelas de escurrimiento.

Se realizaron muestreos cada siete días (15 en total) durante la época de lluvias (julio-octubre), para la toma de muestras del sedimento se utilizaron bolsas de plástico etiquetadas, en el caso de la cuantificación del escurrimiento se utilizó una probeta y un vaso de 1 L, como se observa en la Figura 8.

A los sedimentos colectados se les determinó la humedad presente, utilizando una balanza de humedad, después se procedió a pesar en una balanza analítica del laboratorio de suelos del CIIDIR-IPN Unidad Michoacán. Los sedimentos de los muestreos se expresaron en  $t \cdot ha^{-1}$  y los escurrimientos en  $L \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ .



**Figura 8.** Toma de muestras de escurrimiento y sedimento.

### 6.2.2 Estimación de la erosión hídrica

Se utilizó el modelo de base física Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (PPEH), Water Erosion Prediction Project (WEPP) versión 2012.8 con interfaz para ArcGIS (GeoWEPP) proveniente de la USDA. De la información existente de las parcelas de escurrimiento y con características edafoclimáticas de la microcuenca, se completaron archivos para el modelo

con datos correspondientes al período comprendido 2005-2018 de las estaciones meteorológicas presa Guaracha (16094) y San Ángel (16106). A continuación se mencionan los parámetros que se requirieron para la alimentación del modelo: a) clima (datos de temperatura máxima, media, mínima, evaporación y precipitación), b) topografía (modelo digital de elevación y de pendientes), c) suelo (datos de los perfiles de suelo realizados en campo: porcentaje de materia orgánica, porcentaje de arena, limo y arcilla de cada profundidad de los horizontes) y d) manejo (para este parámetro no se colocaron datos, porque dentro de la microcuenca no se encontró ningún tipo manejo).

### **6.2.3 Perfiles de suelo y pruebas de infiltración**

Se colectaron muestras de suelo en cada uno de los horizontes de los perfiles de suelo, en sitios donde se colocaron las parcelas de escurrimiento, para realizar su clasificación se tomó en cuenta la guía de campo para muestreo y descripción de perfiles de suelos versión 2.0 (2002). Igualmente se llevaron a cabo pruebas de infiltración mediante el método de doble cilindro con el infiltrometro Turf-Tec.

### **6.2.4 Análisis físico-químico de sedimentos y muestras de perfiles de suelo**

A los sedimentos colectados se les analizó pH, carbono orgánico, materia orgánica y nitrógeno inorgánico. En el caso de las muestras de los perfiles de suelo se les analizó pH, carbono orgánico, materia orgánica, nitrógeno inorgánico, textura y densidad aparente en el laboratorio de suelos del CIIDIR, siguiendo en todos los casos las especificaciones que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000.

### **6.2.5 Determinación de variables climáticas**

Se obtuvieron datos de precipitación, a partir de dos estaciones meteorológicas presa Guaracha (16094) y San Ángel (16106), cercanas a la zona de estudio.

### **6.2.6 Análisis estadístico**

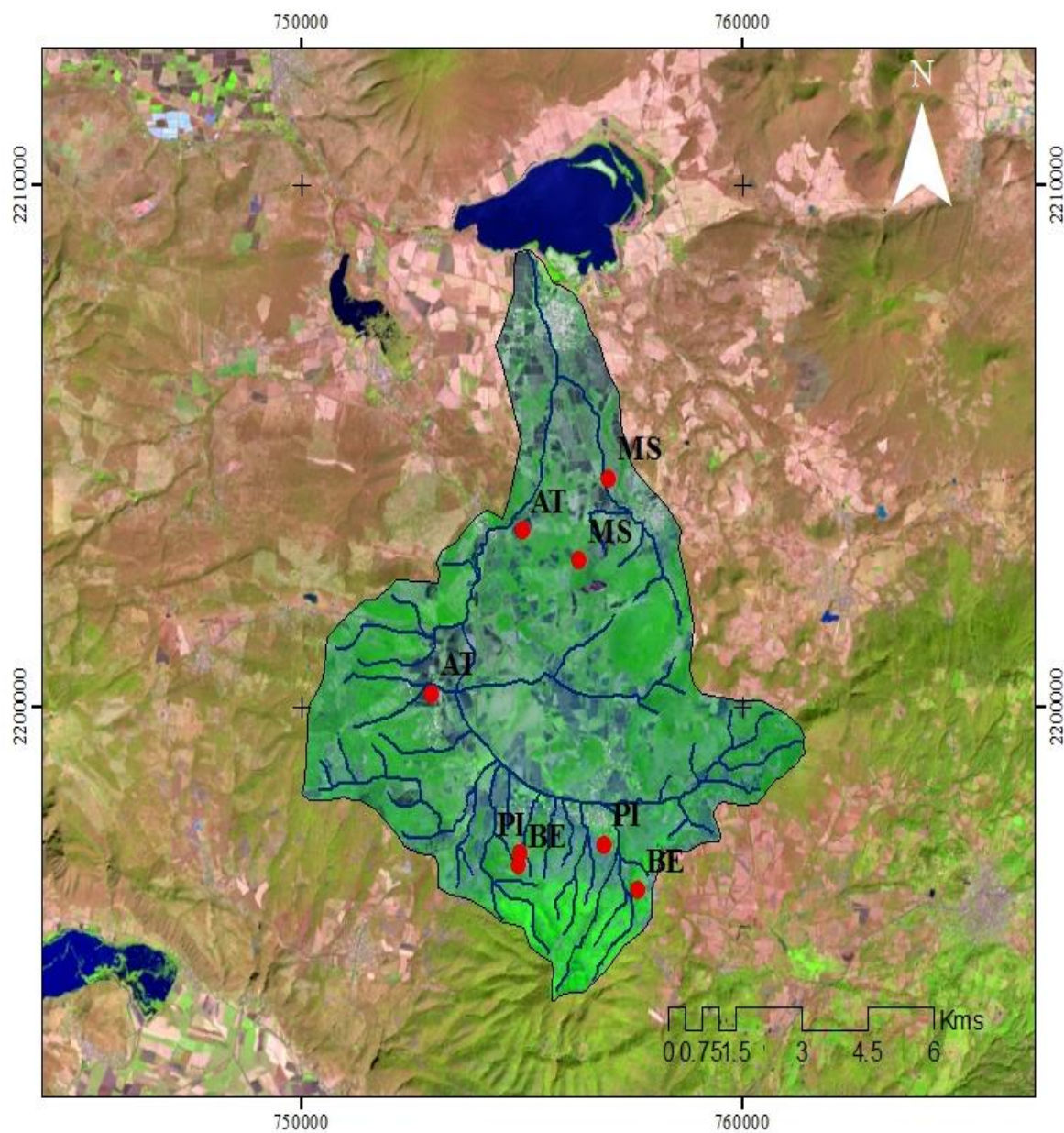
Se realizó un diseño factorial entre el uso del suelo y vegetación (USV) y el tiempo (muestreos), se utilizó modelo de efectos mixtos ya que de acuerdo a Correa y Salazar (2016) es lo ideal para analizar datos de medidas repetidas. Se realizó un ANOVA a los datos obtenidos de sedimentación, después una comparación de medias por Tukey  $p \leq 0.05$ . A las variables de sedimento-escurrimiento y sedimento-nutrientes se les aplicó una regresión lineal simple y un ANOVA, así como una comparación de medias.

### **6.2.7 Software**

Los datos obtenidos de la pérdida de suelo se analizaron con R-3.5.1 (Core Team, 2018) y el análisis espacial y la elaboración de los mapas con QGIS 2.18 y ArcGIS 10.2.2 (Development Team, 2016).

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las ocho parcelas de escurrimiento corresponden a dos por cada uso de suelo: pastizal inducido (PI), bosque de encino (BE), matorral subtropical (MS) y agricultura de temporal (AT), como se muestra en la (Figura 9).

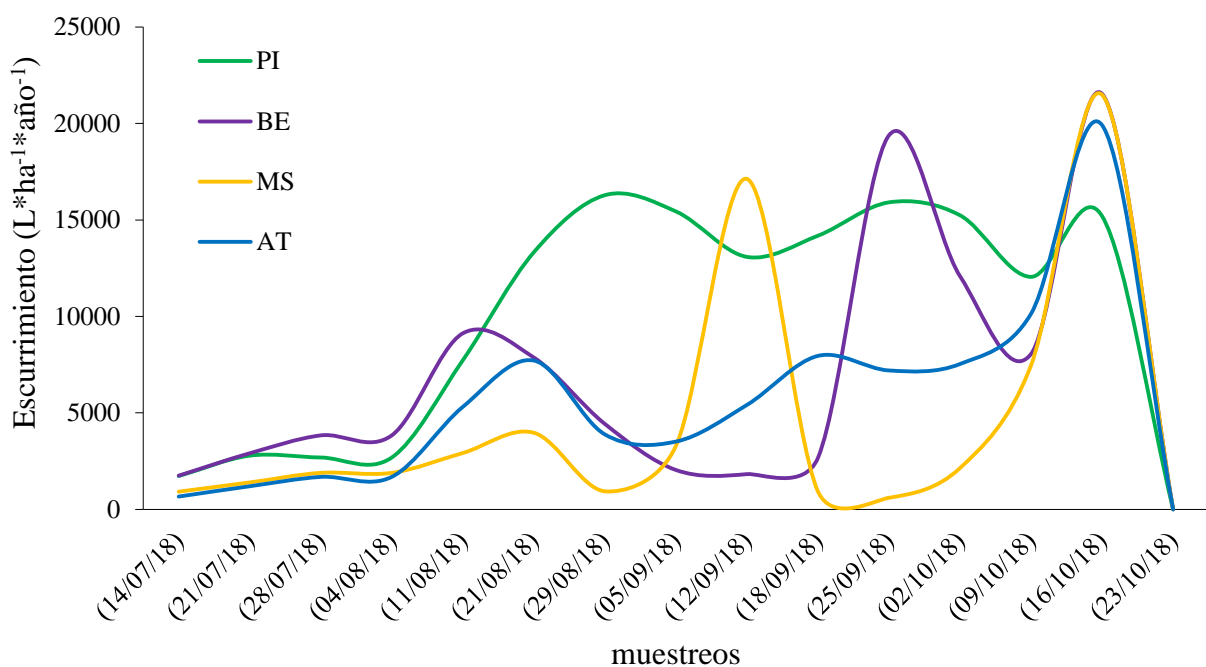


**Figura 9.** Ubicación de las parcelas de escurrimiento en la microcuenca.



## 7.1 Cuantificación del escurrimiento y la pérdida de suelo

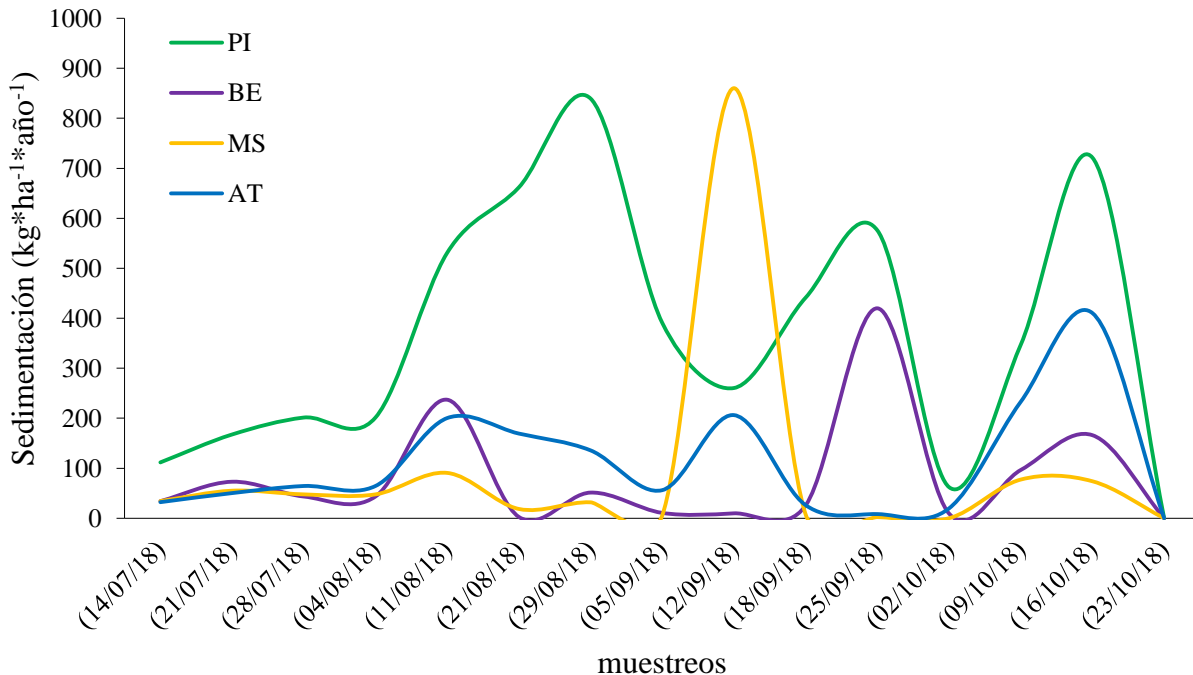
De los escurrimientos, parcelas con PI presentaron un aumento desde el muestreo cuatro hasta el muestreo siete ( $16,285.71 \text{ L*ha}^{-1}$ ), después se comportó con altibajos. Para el caso del MS, AT y BE el comportamiento muestra que existió mayor escurrimiento en el penúltimo muestreo  $21,485.71 \text{ L*ha}^{-1}$ ,  $19,914.28 \text{ L*ha}^{-1}$  y  $21,534.29 \text{ L*ha}^{-1}$  respectivamente. En promedio el mayor escurrimiento se presentó en el PI con un total de  $9,890.71 \text{ L*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$ , después el BE con  $6,757.73 \text{ L*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$ , la AT con  $5,588.80 \text{ L*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$  y MS con  $4,465.39 \text{ L*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$  (Figura 10).



**Figura 10.** Comportamiento del escurrimiento en cada uso del suelo y vegetación.

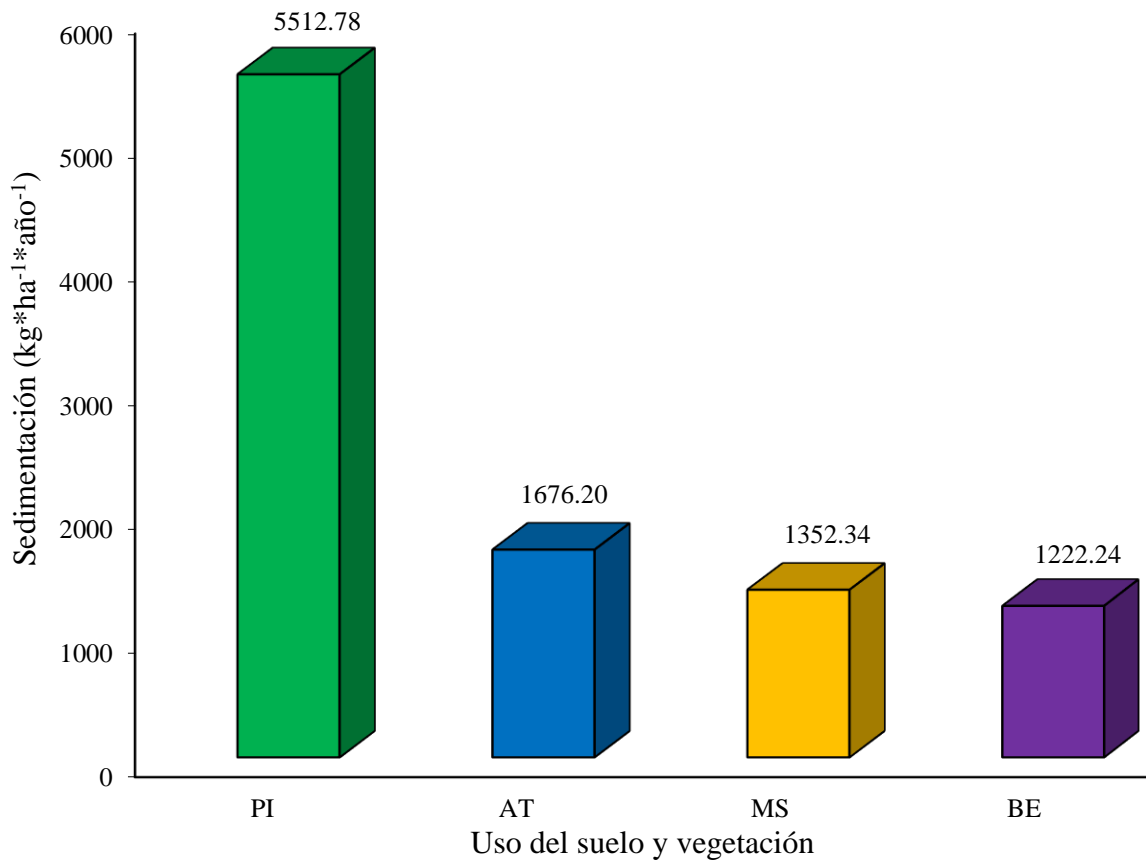
Los sedimentos de parcelas con PI presentaron un aumento desde el primer muestreo hasta el muestreo siete ( $839.52 \text{ kg*ha}^{-1}$ ), después se comportó con altibajos. Para el caso del MS el comportamiento que existió fue mayor en el muestreo nueve ( $860.30 \text{ kg*ha}^{-1}$ ), en la AT la pérdida de suelo fue más estable, donde se presentó mayor pérdida fue en el penúltimo muestreo ( $410.30 \text{ kg*ha}^{-1}$ ) y para el BE la cantidad de mayor sedimento fue el muestro 11 ( $419.89 \text{ kg*ha}^{-1}$ ), en general el comportamiento de la sedimentación en este uso de suelo y

vegetación fue el que presentó mayor estabilidad a lo largo del tiempo de muestreos. Cabe mencionar que en el último muestreo ya no se encontró sedimento ni escurrimiento (Figura 11).



**Figura 11.** Comportamiento del sedimento en cada uso del suelo y vegetación.

La mayor pérdida por erosión hídrica en la microcuenca se presentó en el uso de suelo y vegetación PI con un total de  $5,512.78 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$ , después la AT con  $1,676.20 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$ . En el caso del MS se obtuvo una pérdida de suelo de  $1,352.34 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$  y la menor pérdida fue en el BE con  $1,222.24 \text{ kg*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$  (Figura 12). El volumen de suelo sedimentado es considerado como grado de erosión baja, de acuerdo a los criterios de la clasificación de la FAO (1980), citados por Nájera *et al.* (2016) ya que presenta una pérdida menor a  $10 \text{ ton/ha/año}$ . En la microcuenca la AT se lleva a cabo en lugares menores al 5% de pendiente, mientras que el MS y el BE son las zonas mayores al 5% de pendiente, además de que en estos lugares existe más estabilidad y es nula la perturbación antrópica. Por otra parte, el PI es la zona más alterada por actividades agropecuarias, debido a la deforestación y pastoreo excesivo, ha provocado que se acelere el proceso de pérdida de suelo por erosión hídrica.

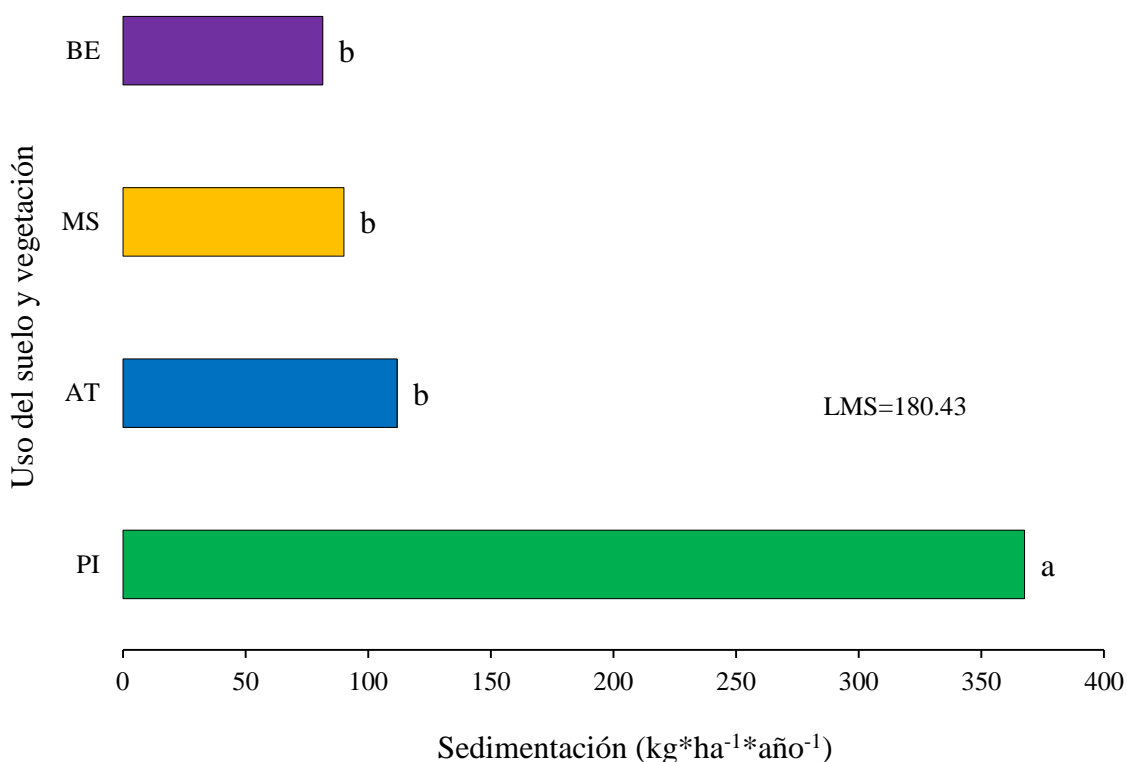


**Figura 12.** Pérdida total de suelo por hectárea en cada uso de suelo y vegetación. PI= Pastizal Inducido; AT= Agricultura de Temporal; MS= Matorral Subtropical; BE= Bosque de Encino.

En el estudio que realizaron Silva *et al.* (2017) en la cuenca del Lago de Chapala; porción Michoacán, encontraron que la mayor pérdida de suelo por erosión hídrica se presentó donde se desarrolla la AT, con 630.70 kg\*ha<sup>-1</sup>, seguido de pastizales con 87.90 kg\*ha<sup>-1</sup> y en menor cantidad el BE con 3.90 kg\*ha<sup>-1</sup>, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación; en el BE la cobertura vegetal es mayor y la presencia de capas de hojarasca sobre la superficie del suelo retarda el escurrimiento de la superficie y proporciona más tiempo para que el agua se infiltre en el suelo (Gómez *et al.*, 2014).

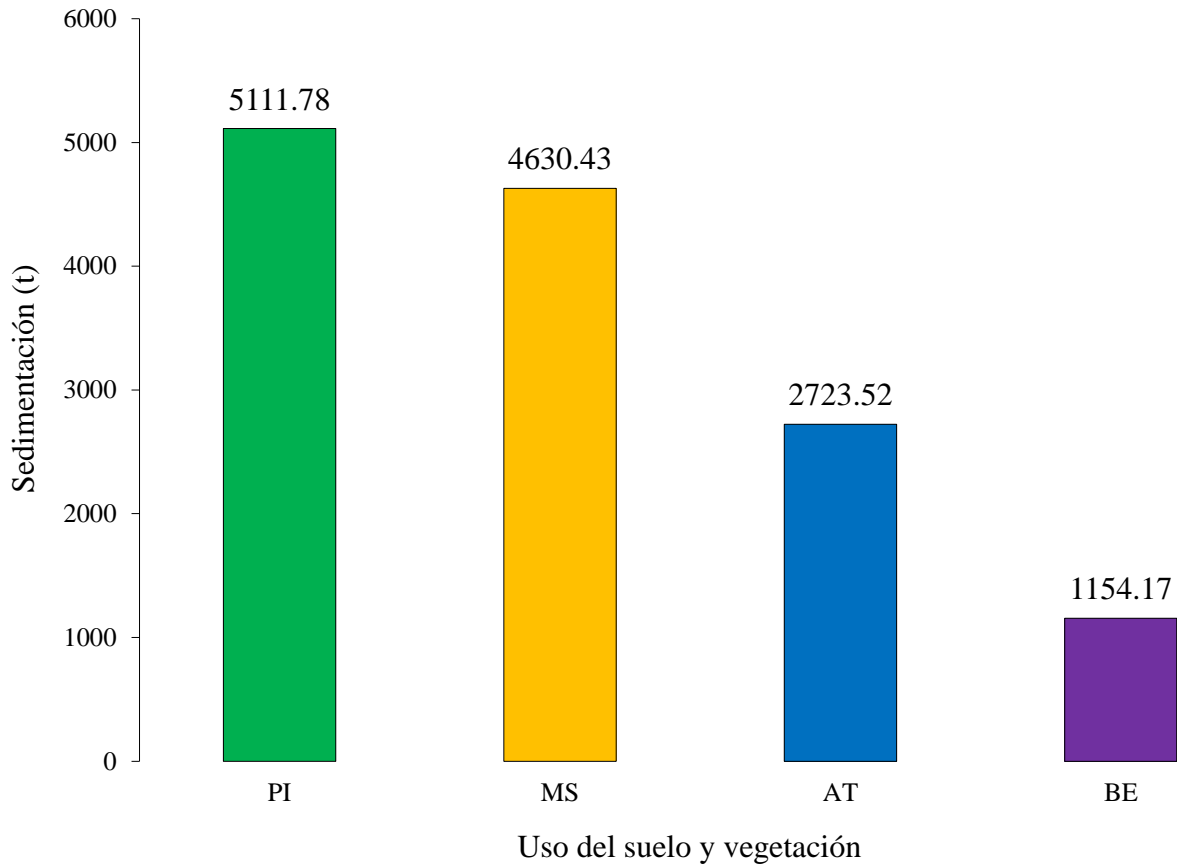
Las medias de la sedimentación por uso de suelo y vegetación se pueden observar en la (Figura 13). En promedio el PI presentó 367.52 kg\*ha<sup>-1</sup> de sedimentación, en la AT de 111.75

kg\*ha<sup>-1</sup>. Para el caso del MS de 90.16 kg\*ha<sup>-1</sup> y en el BE de 81.48 kg\*ha<sup>-1</sup>. El análisis de varianza mostró diferencia significativa  $p \leq 0.05$  entre los usos de suelos y vegetación, observándose mayores pérdidas en el PI y donde no existe diferencia es en la AT, MS y BE. Alvarado *et al.* (2011) en un estudio que realizaron sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica en diferentes sistemas de producción con papa encontraron un promedio mayor de pérdida de suelo de 450.17 kg\*ha<sup>-1</sup> y con promedio menor de 164.55 kg\*ha<sup>-1</sup>.



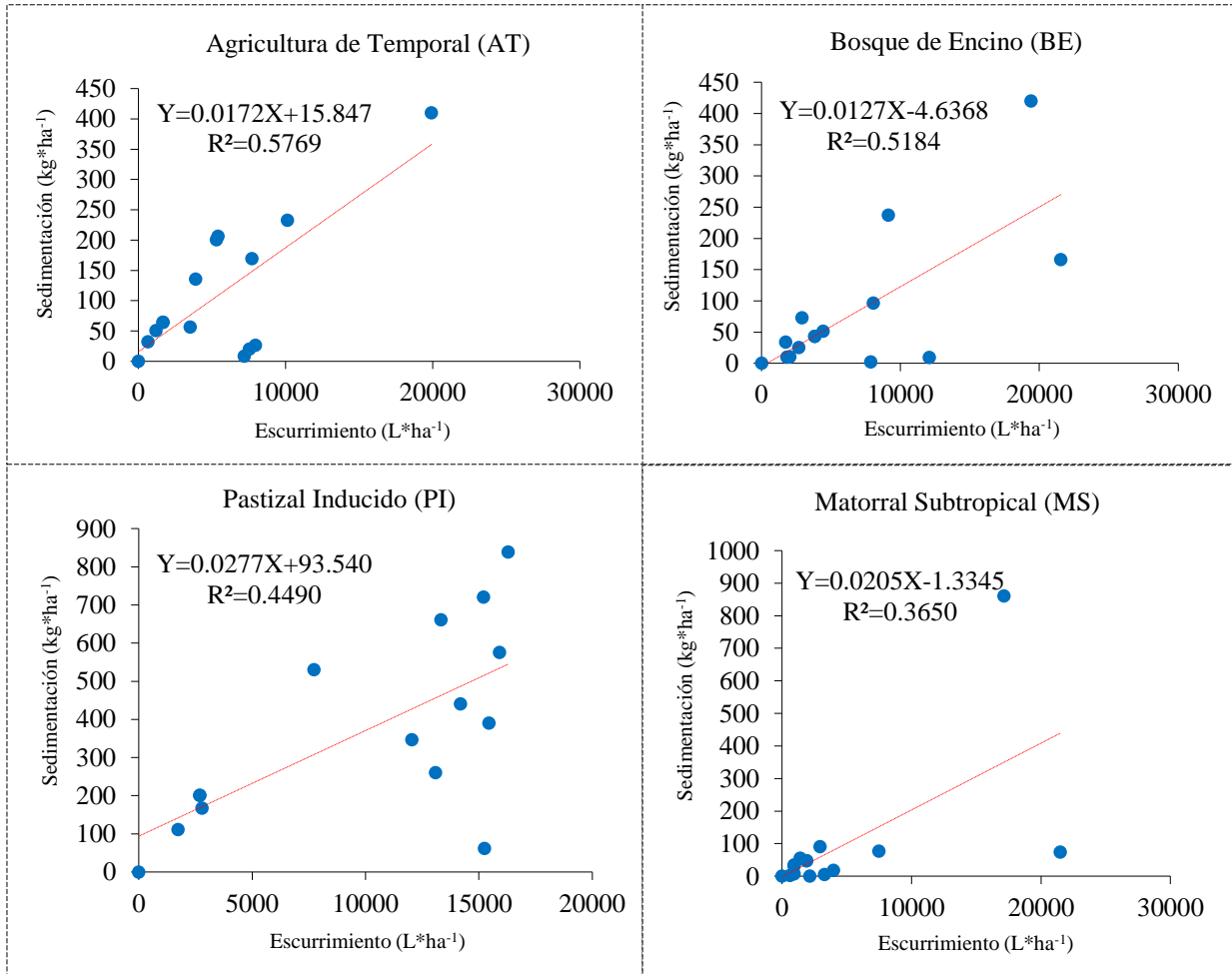
**Figura 13.** Comparación de medias de la sedimentación en los usos de suelo y vegetación.

Los resultados obtenidos muestran que por superficie la pérdida de suelo total en el PI es de 5,111.78 t\*año<sup>-1</sup>, en segundo lugar, se encuentra el MS con 4,630.43 t\*año<sup>-1</sup>, después le sigue la AT con 2,723.52 t\*año<sup>-1</sup> y por último el BE con 1,154.17 t\*año<sup>-1</sup>. Lo cual se estima una pérdida de suelo total por erosión hídrica dentro de la microcuenca de 13,619.90 t\*año<sup>-1</sup> (Figura 14).

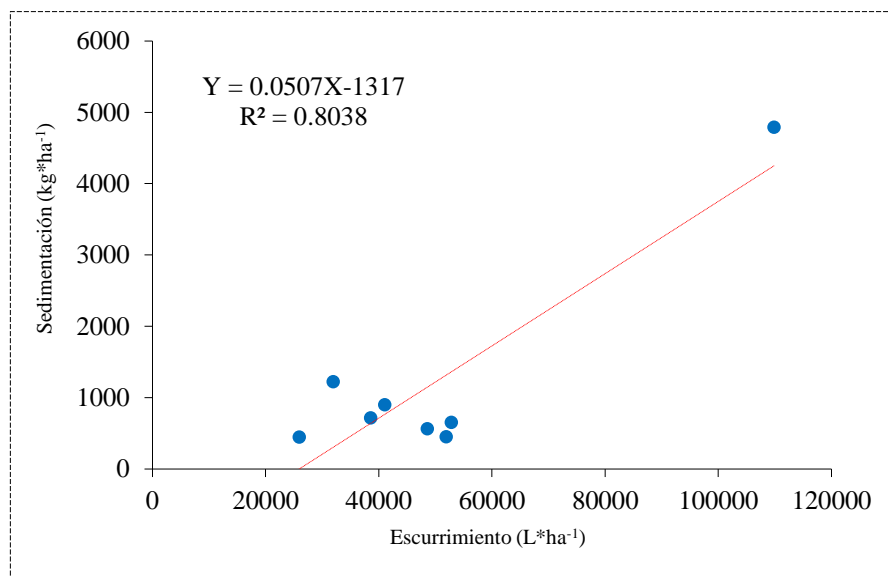


**Figura 14.** Pérdida de suelo total de la microcuenca Presa Guaracha por superficie de uso del suelo y vegetación.

En la (Figura 15), se muestra la relación de la generación de sedimentos en función con el escurrimiento, el uso de AT presentó una  $R^2=0.5769$ , BE una  $R^2=0.5184$ . Las ecuaciones obtenidas en PI con  $R^2=0.4490$  y MS con  $R^2=0.3650$  presentaron las más bajas  $R^2$  ya que no se obtuvieron muchos datos de sedimento ni escurrimiento. En cambio, Camas *et al.* (2012) en un estudio realizado en usos de suelo de maíz en labranza de conservación; maíz en barreras de muro vivo y milpa intercalada con árboles frutales encontraron  $R^2=0.80$ ,  $0.82$  y  $0.91$  respectivamente. Para la correlación realizada para toda la microcuenca se obtuvo mejor  $R^2=0.8038$  (Figura 16). De tal manera, a medida que aumentan los escurrimientos, se incrementa la producción de sedimentos. Este incremento sucede en diferentes escalas debido a las distintas eficiencias asociadas a cada uso de suelo y vegetación.



**Figura 15.** Relación de la pérdida de suelo vs escurrimiento para cada uso del suelo.



**Figura 16.** Relación de la pérdida de suelo con el escurrimiento en la microcuenca.

Se observó mediante los modelos de sedimento con escurrimiento  $R^2$  bajas, la  $R^2$  más alta fue en el sitio AT2 con  $R^2=0.6004$  y la más baja en el sitio PI2 con  $R^2=0.0064$  (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Modelos de sedimentación con escurrimiento para cada uso del suelo y vegetación.

| Sitio                     | Modelo                  | $R^2$  |
|---------------------------|-------------------------|--------|
| Pastizal Inducido 1       | Sed=0.0346(Esc)+66.599  | 0.3840 |
| Pastizal Inducido 2       | Sed=-0.0015(Esc)+51.877 | 0.0064 |
| Agricultura de Temporal 1 | Sed=0.0094(Esc)-2.5935  | 0.3524 |
| Agricultura de Temporal 2 | Sed=0.0231(Esc)+32.572  | 0.6004 |
| Matorral Subtropical 1    | Sed=0.0258(Esc)-10.504  | 0.3386 |
| Matorral Subtropical 2    | Sed=0.0098(Esc)+13.071  | 0.3983 |
| Bosque de Encino 1        | Sed=0.0062(Esc)+17.598  | 0.4076 |
| Bosque de Encino 2        | Sed=0.0149(Esc)-8.6259  | 0.3628 |

Para el caso de los modelos para cada muestreo, el que presentó mayor  $R^2=0.8778$  fue el realizado el 05 de septiembre y el último muestreo efectuado el 23 de octubre fue donde no se obtuvieron datos de escurrimiento y sedimento (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Modelos de sedimento con escurrimiento para cada muestreo.

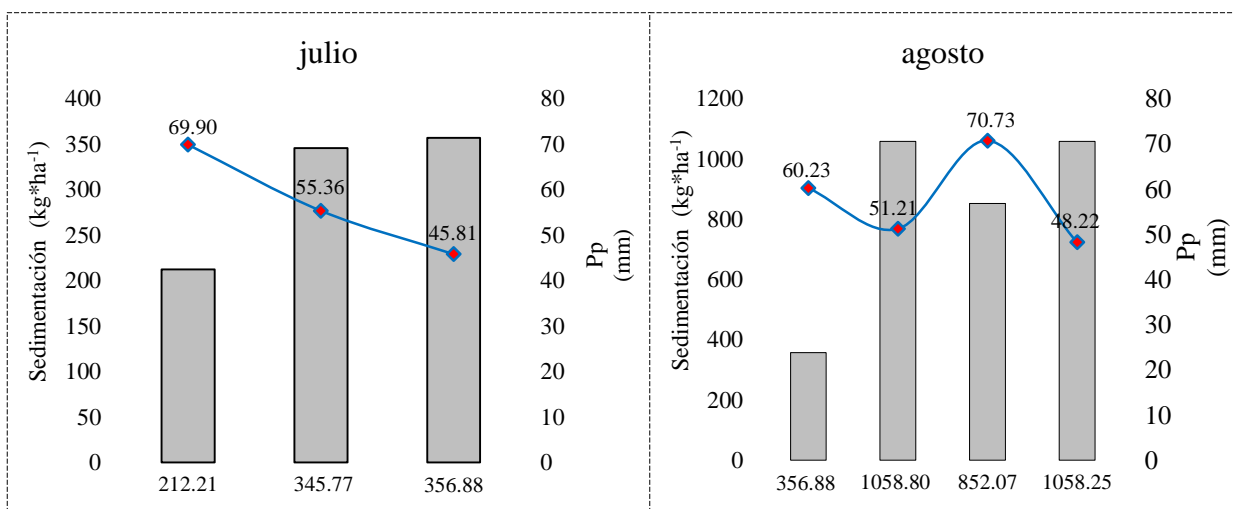
| Muestreo   | Modelo                 | $R^2$    |
|------------|------------------------|----------|
| 14-07-2018 | Sed=0.0200(Esc)+13.850 | 0.2311   |
| 21-07-2018 | Sed=0.0235(Esc)+18.879 | 0.1824   |
| 28-07-2018 | Sed=0.0164(Esc)+23.862 | 0.2079   |
| 04-08-2018 | Sed=0.0164(Esc)+23.862 | 0.2079   |
| 11-08-2018 | Sed=0.0277(Esc)+45.392 | 0.3158   |
| 21-08-2018 | Sed=0.0420(Esc)-66.092 | 0.4784   |
| 29-08-2018 | Sed=0.0560(Esc)-46.354 | 0.6233   |
| 05-09-2018 | Sed=0.0304(Esc)-34.507 | 0.8778   |
| 12-09-2018 | Sed=0.0475(Esc)-55.403 | 0.7309   |
| 18-09-2018 | Sed=0.0289(Esc)-30.514 | 0.5305   |
| 25-09-2018 | Sed=0.0272(Esc)-20.846 | 0.4662   |
| 02-10-2018 | Sed=0.0230(Esc)+66.480 | 0.2878   |
| 09-10-2018 | Sed=0.0089(Esc)+52.397 | 0.1970   |
| 16-10-2018 | Sed=0.0097(Esc)+76.606 | 0.0139   |
| 23-10-2018 | Cero (0)               | Cero (0) |

También se realizaron modelos para observar el comportamiento del sedimento con la precipitación y el escurrimiento. En general se presentaron  $R^2$  altas, la mayor fue la del mes de julio  $R^2=1.000$  y la más baja, la de septiembre con  $R^2=0.6975$  (Cuadro 3).

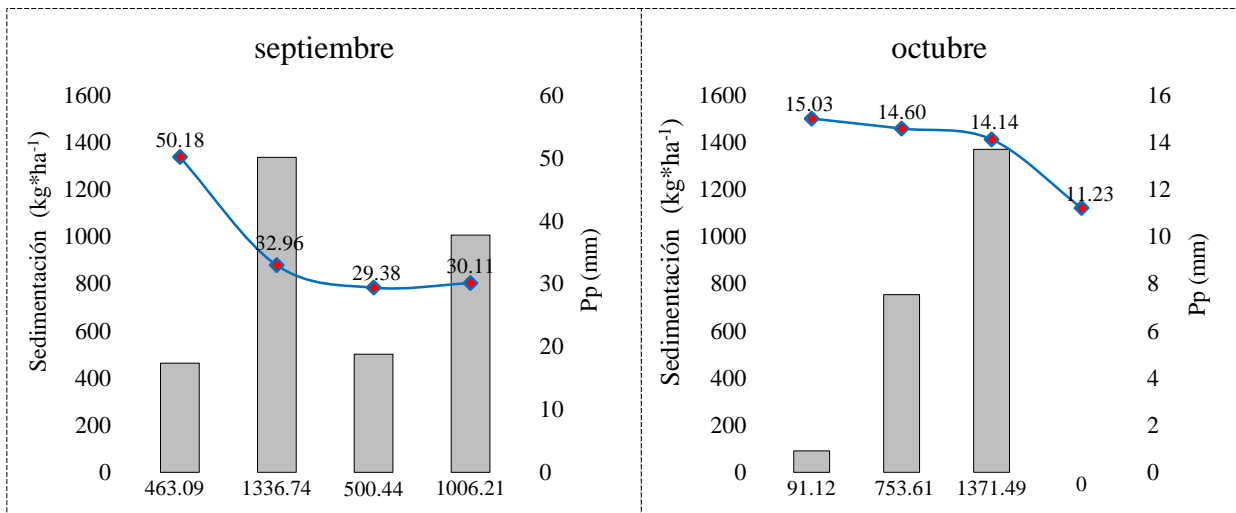
**Cuadro 3.** Modelos de sedimentación con precipitación y escurrimiento para cada mes.

| Mes           | Modelo                                   | $R^2$  |
|---------------|--|--------|
| julio         | $Sed=-4302.1251+0.2505(Esc)+46.4374(Pp)$ | 1.0000 |
| agosto        | $Sed=1293.4115+0.0313(Esc)-20.7563(Pp)$  | 0.9909 |
| septiembre    | $Sed=-465.7893+0.0389(Esc)+0.6580(Pp)$   | 0.6975 |
| octubre       | $Sed=1534.8342+0.0226(Esc)-134.1521(Pp)$ | 0.8557 |
| julio-octubre | $Sed=-169.3021+0.0199(Esc)+7.2298(Pp)$   | 0.6181 |

La precipitación pluvial durante los meses de muestreo (julio-octubre) fue de 599.08 mm. En el mes de julio la precipitación acumulada de los muestreos fue de 171.07 mm y la sedimentación de  $914.86 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . La época más lluviosa corresponde al mes de agosto 230.39 mm y en la cual se registraron los valores más altos de sedimentación con  $3,326.00 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , en septiembre la precipitación acumulada fue de 142.63 mm y el sedimento de  $3,306.48 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Finalmente, para el mes de octubre la precipitación acumulada disminuyó reportándose de 54.99 mm con una sedimentación de  $2,216.22 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Figura 17).



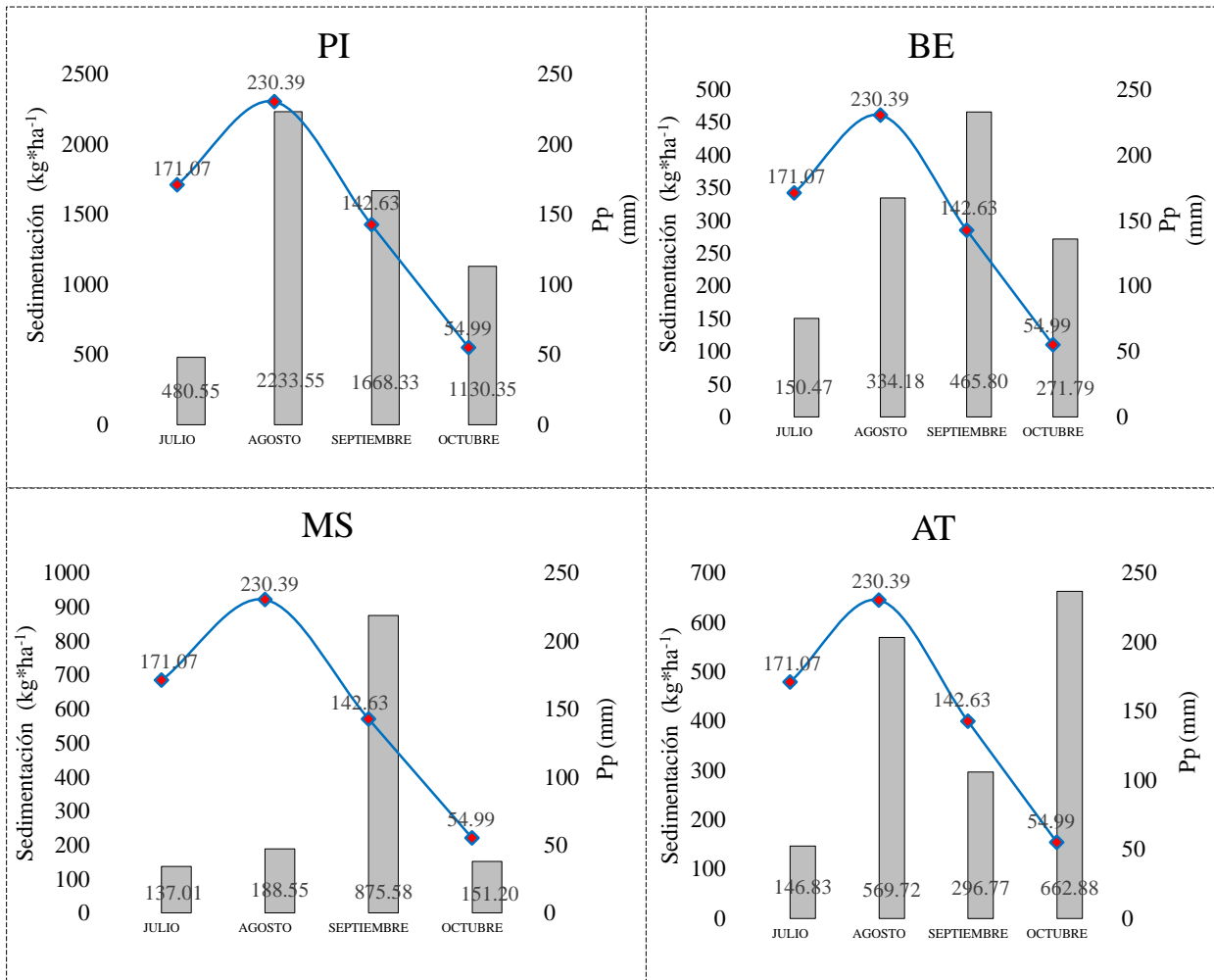




**Figura 17.** Pérdida de suelo y precipitación acumulada por mes.

Los resultados obtenidos de la pérdida de suelo y precipitación total para cada uso de suelo y vegetación, en el PI para el mes de julio se perdieron  $480.55 \text{ kg*ha}^{-1}$ , mientras que en el mes de agosto fue donde se perdió la mayor cantidad de suelo con  $2,233.55 \text{ kg*ha}^{-1}$ . Para septiembre la sedimentación disminuyó a  $1,668.33 \text{ kg*ha}^{-1}$  y para octubre de  $1,130.35 \text{ kg*ha}^{-1}$ . Yang *et al.* (2019) hacen referencia a que existe una relación lineal entre la pérdida de suelo y la intensidad de la lluvia en bajas intensidades de precipitación, también mencionan que el volumen de escorrentía aumenta con la intensidad de la lluvia. En cambio, en el BE para el mes de julio la sedimentación fue de  $150.47 \text{ kg*ha}^{-1}$ , en agosto de  $334.18 \text{ kg*ha}^{-1}$ , en septiembre se presentó la mayor pérdida de suelo con  $465.80 \text{ kg*ha}^{-1}$  y en octubre bajó a  $271.79 \text{ kg*ha}^{-1}$ .

En el MS la pérdida de suelo en julio fue de  $137.01 \text{ kg*ha}^{-1}$ , en agosto de  $188.55 \text{ kg*ha}^{-1}$ . Este uso de suelo para el mes de septiembre se comportó igual que el BE porque fue donde más suelo se perdió con  $875.58 \text{ kg*ha}^{-1}$  y octubre con  $151.20 \text{ kg*ha}^{-1}$ . Por último, en la AT en el mes de julio se perdieron  $146.83 \text{ kg*ha}^{-1}$ , en agosto aumentó con  $569.72 \text{ kg*ha}^{-1}$ , la pérdida disminuyó con  $296.77 \text{ kg*ha}^{-1}$  y en octubre fue donde más se perdió con  $662.88 \text{ kg*ha}^{-1}$  (Figura 18).

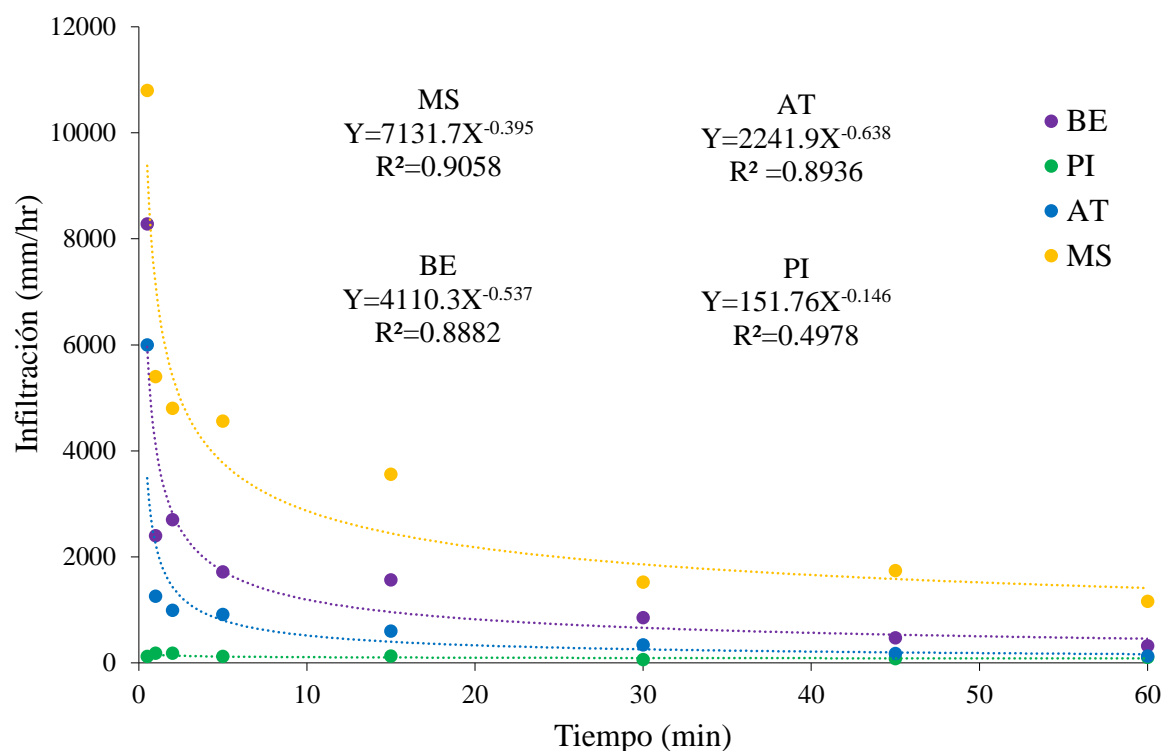


**Figura 18.** Pérdida de suelo por vegetación y precipitación total por mes.

Coblinski *et al.* (2019) obtuvieron una pérdida de suelo anual de 2.6 kg\*ha<sup>-1</sup> en cultivos de maíz y girasol y sistemas de pastos sin labranza. Por otro parte, Vadas y Powell (2013) monitorearon la pérdida de sedimento en parcelas de campo de norte a sur en lotes de ganado lechero de diferentes densidades de población y tierras de cultivo de ensilaje de maíz, obteniendo la pérdida anual de sedimentos para parcelas del norte de 0.1-0.3 t\*ha<sup>-1</sup>. Para las parcelas al sur, la pérdida de sedimentos fue extremadamente alta de 20-80 t\*ha<sup>-1</sup> debido a tres eventos de tormentas y escorrentía muy intensos. Sin considerar estos eventos, la pérdida de sedimentos de las parcelas del sur fue todavía de cinco a siete veces mayor (0.5-1.6 t\*ha<sup>-1</sup>), debido a que en las parcelas del norte existió mayor aplicación de materia orgánica en estiércol y esto ayudó a promover la infiltración del agua.

## 7.2 Infiltración

De acuerdo con los resultados de las tasas de infiltración en los diferentes usos de suelo y vegetación, el modelo obtenido para MS se observó una  $R^2=0.9058$ , manifestándose que existe mayor infiltración del agua y por ende es donde se retarda el escurrimiento y la pérdida de suelo (Figura 19), también por la diversidad de flora existente, el modelo obtenido para el uso de AT representa una  $R^2=0.8936$ , aquí la infiltración también es alta y la pérdida de suelo es baja, debido a que las hojas de maíz y su asociación con algún otro cultivo aumentan la capacidad de infiltración de agua (Castelán *et al.*, 2017).



**Figura 19.** Tasa de infiltración en los usos de suelo y vegetación.

Para el modelo de BE se presentó una  $R^2=0.8882$ , en este uso de suelo se genera gran cantidad de hojarasca, depositada sobre la superficie del suelo ayuda a disminuir la velocidad de escurrimiento y aumenta la infiltración del agua. Por último, para el PI se obtuvo una

$R^2=0.4978$  en este uso de suelo se producen mayores tasas de escorrentía y erosión, y la menor tasa de infiltración (Dueñez-Alaníz *et al.*, 2006).

Yáñez *et al.* (2017) afirman que, en suelos compactados, se presentan niveles bajos de infiltración como es el caso de los suelos Alfisoles presentes en pastizales. Asimismo, señalan que estos suelos al humedecerse son muy susceptibles a la erosión por la falta de materia orgánica, por ser la responsable de aumentar la porosidad y generar estabilización de la estructura.

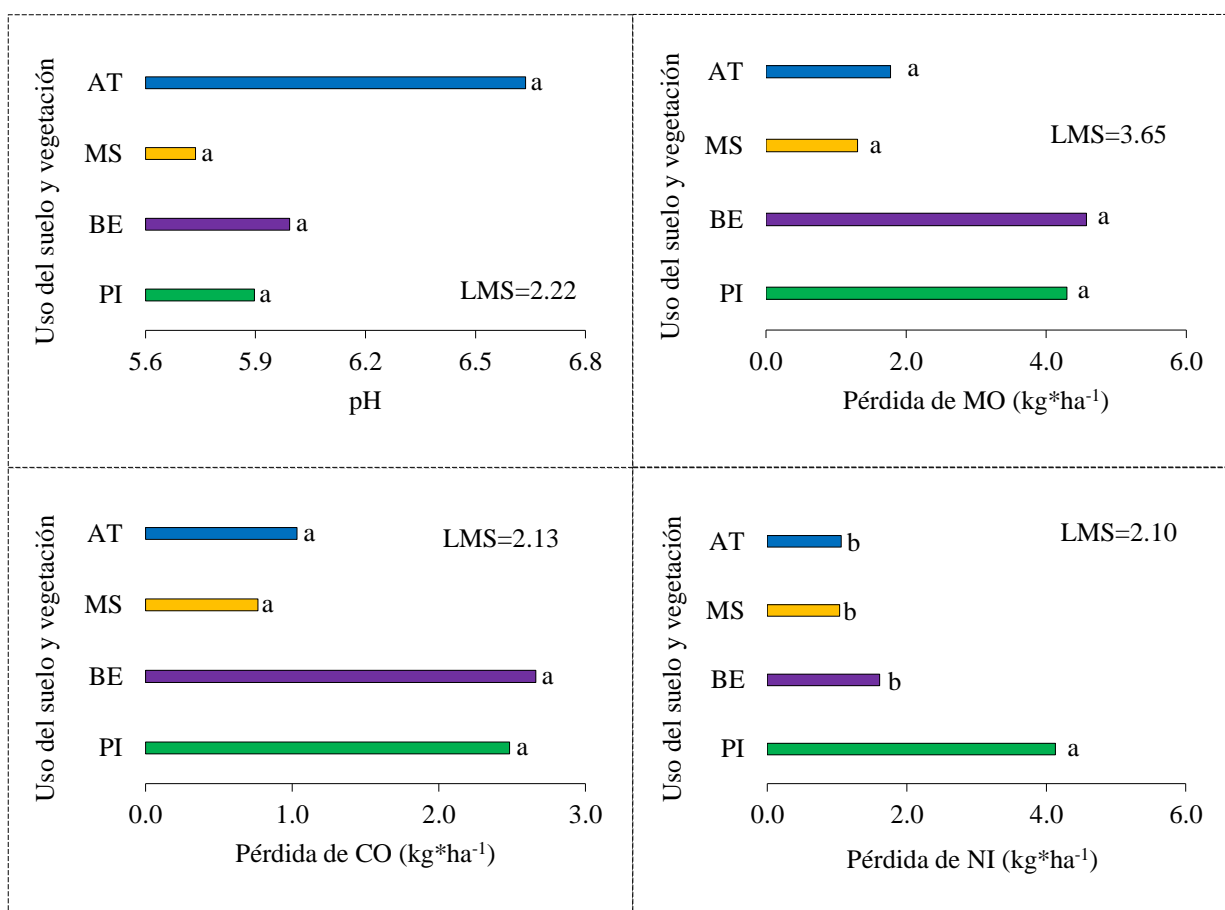
En otro trabajo realizado por Gómez *et al.* (2014) consideraron los tipos de cobertura de suelos agrícolas, pecuarios y forestales, obteniendo que en los suelos forestales existe una infiltración rápida y que los principales factores de la infiltración son tipo de suelo, cobertura vegetal, clase textural, humedad del suelo y porosidad. Mientras que Patle *et al.* (2018) afirman que la cantidad de arena, la densidad de partículas y contenido de carbono orgánico tienen una correlación positiva con la tasa de infiltración, mientras que el limo, arcilla, la densidad aparente y el contenido de humedad tienen una correlación negativa con la tasa de infiltración.

Los resultados encontrados coinciden con García-Hernández *et al.* (2007), mencionan que la presencia de hojarasca favorece la infiltración del agua y que los suelos de los pastizales se compactan por pisoteo del ganado, provocando que el aire disminuya y se incremente la erosión. Asimismo, estos autores citan a Lado *et al.* (2004) donde hacen referencia en que los suelos con pastizales que tienen escasa materia orgánica presentan bajas tasas de infiltración y por consiguiente la estabilidad de los agregados disminuye, lo cual favorece la disminución de la infiltración. Por su parte, Bombino *et al.* (2019), mencionan que la cubierta de suelo por residuos vegetales reduce la tasa de escorrentía en promedio en un 30%.

### **7.3 Pérdida de nutrimentos**

La comparación de medias de las propiedades de suelos para cada uso de suelo y vegetación se pueden observar en la (Figura 20). Con base al análisis estadístico Tukey  $p \leq 0.05$  se muestra que no existió diferencia significativa en el pH, en la pérdida de carbono orgánico y materia orgánica. Mientras que para el BE la pérdida promedio de materia orgánica fue de

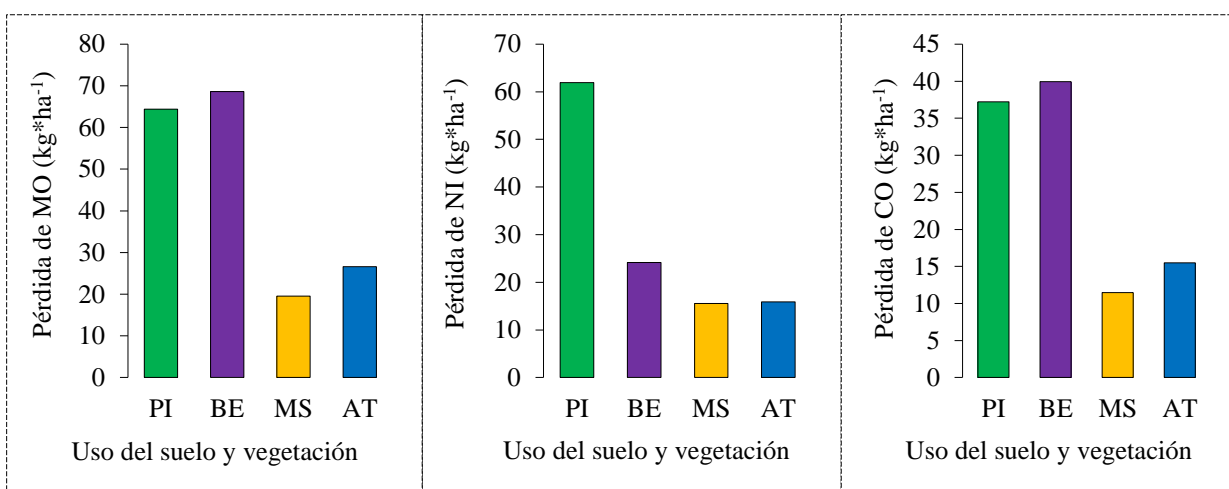
4.57 kg\*ha<sup>-1</sup>, en el PI de 4.30 kg\*ha<sup>-1</sup>, en AT de 1.78 kg\*ha<sup>-1</sup> y para el MS fue donde se perdió la menor cantidad con 1.31 kg\*ha<sup>-1</sup>. Para el caso del carbono orgánico, el mayor promedio se encontró en el BE con 2.66 kg\*ha<sup>-1</sup>, el PI con 2.48 kg\*ha<sup>-1</sup>, la AT con 1.03 kg\*ha<sup>-1</sup> y el MS con 0.77 kg\*ha<sup>-1</sup>. En cambio, en la pérdida de nitrógeno inorgánico existió diferencia significativa, en el PI es donde se pierde más de este nutriente con un promedio de 4.13 kg\*ha<sup>-1</sup>, el BE con 1.61 kg\*ha<sup>-1</sup>, AT con 1.06 kg\*ha<sup>-1</sup> y el MS con 1.04 kg\*ha<sup>-1</sup>.



**Figura 20.** Medias de las propiedades de suelos por uso de suelo y vegetación.

El sitio que presentó mayor pérdida de nutrientes de la suma total de la materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno inorgánico fue el PI con 163.60 kg\*ha<sup>-1</sup> (40.80%), el BE con 132.69 kg\*ha<sup>-1</sup> (33.09%), la AT con 58.03 kg\*ha<sup>-1</sup> (14.47%) y MS con 46.62 kg\*ha<sup>-1</sup> (11.63%). La propiedad del suelo que más se pierde a causa de la erosión hídrica, es la materia orgánica, para el BE 68.59 kg\*ha<sup>-1</sup>, PI con 64.43 kg\*ha<sup>-1</sup>, AT con 26.64 kg\*ha<sup>-1</sup> y MS

con  $19.58 \text{ kg*ha}^{-1}$ , en total se pierden  $179.24 \text{ kg*ha}^{-1}$ . En segundo lugar, se encontró la pérdida de nitrógeno inorgánico, siendo el PI el que más perdió con  $61.93 \text{ kg*ha}^{-1}$ , BE con  $24.17 \text{ kg*ha}^{-1}$ , AT con  $15.89 \text{ kg*ha}^{-1}$  y MS con  $15.55 \text{ kg*ha}^{-1}$ , con un total de  $117.54 \text{ kg*ha}^{-1}$ . Para el caso del carbono orgánico en el uso de suelo y vegetación donde más se pierde es el BE con  $39.93 \text{ kg*ha}^{-1}$ , PI con  $37.24 \text{ kg*ha}^{-1}$ , AT con  $15.50 \text{ kg*ha}^{-1}$  y MS con  $11.49 \text{ kg*ha}^{-1}$ , con pérdidas totales de  $104.16 \text{ kg*ha}^{-1}$  (Figura 21).

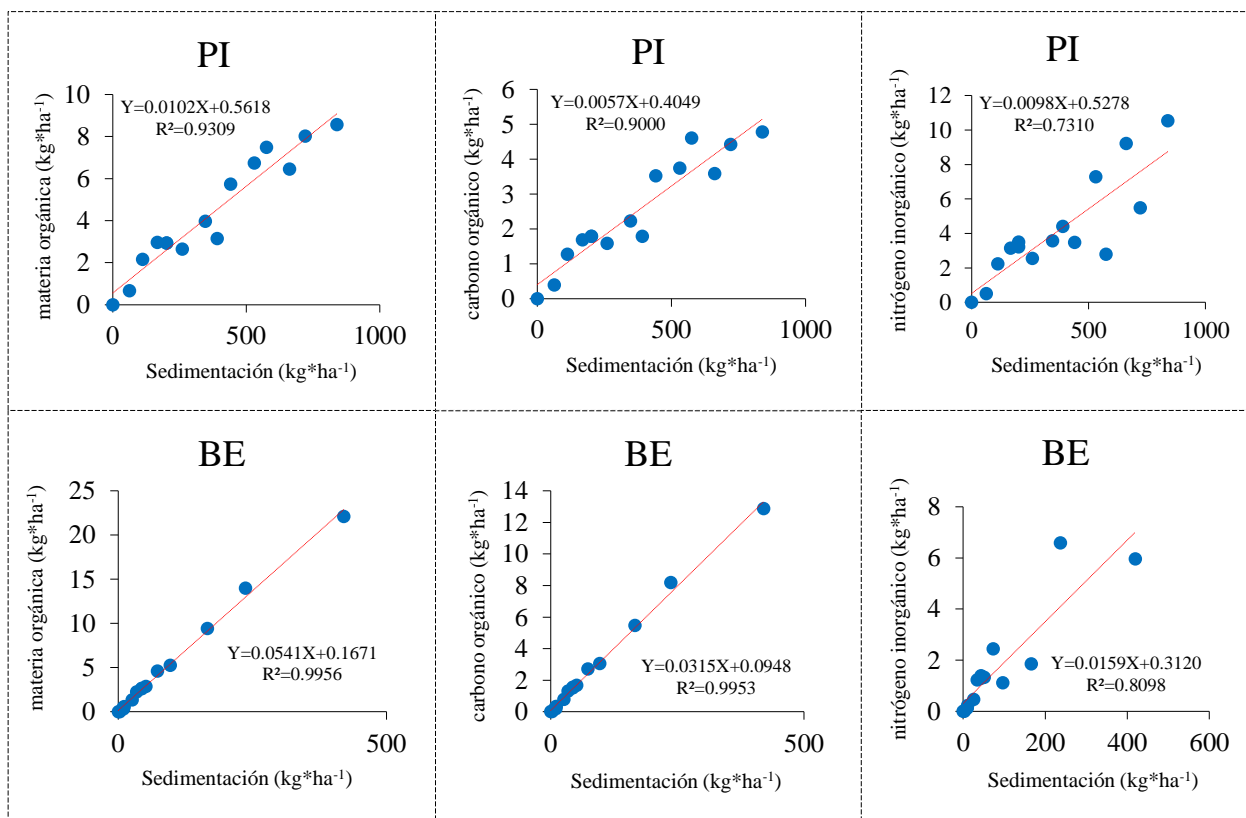


**Figura 21.** Pérdida de nutrientes por uso de suelo y vegetación.

De acuerdo a la unidad de superficie de cada uso de suelo y vegetación se pierde de materia orgánica en el BE  $64.77 \text{ t}$ , PI  $59.74 \text{ t}$ , AT  $43.28 \text{ t}$  y para el MS de  $67.04 \text{ t}$  esto representa el  $47.14\%$  de superficie. En general, dentro de la microcuenca se pierden  $234.83 \text{ t}$  de materia orgánica. Para el caso del carbono orgánico en el BE  $37.70 \text{ t}$ , PI  $34.53 \text{ t}$ , AT  $25.18 \text{ t}$  y para el MS de  $39.34 \text{ t}$ . El valor promedio para la cuenca es de  $136.75 \text{ t}$  de carbono orgánico. La pérdida de nitrógeno inorgánico en el PI se cuantificó de  $57.42 \text{ t}$ , MS de  $53.24 \text{ t}$ , AT con  $25.81 \text{ t}$  y para el BE  $22.82 \text{ t}$ . De este modo en la microcuenca se pierden  $159.29 \text{ t}$  de este nutriente.

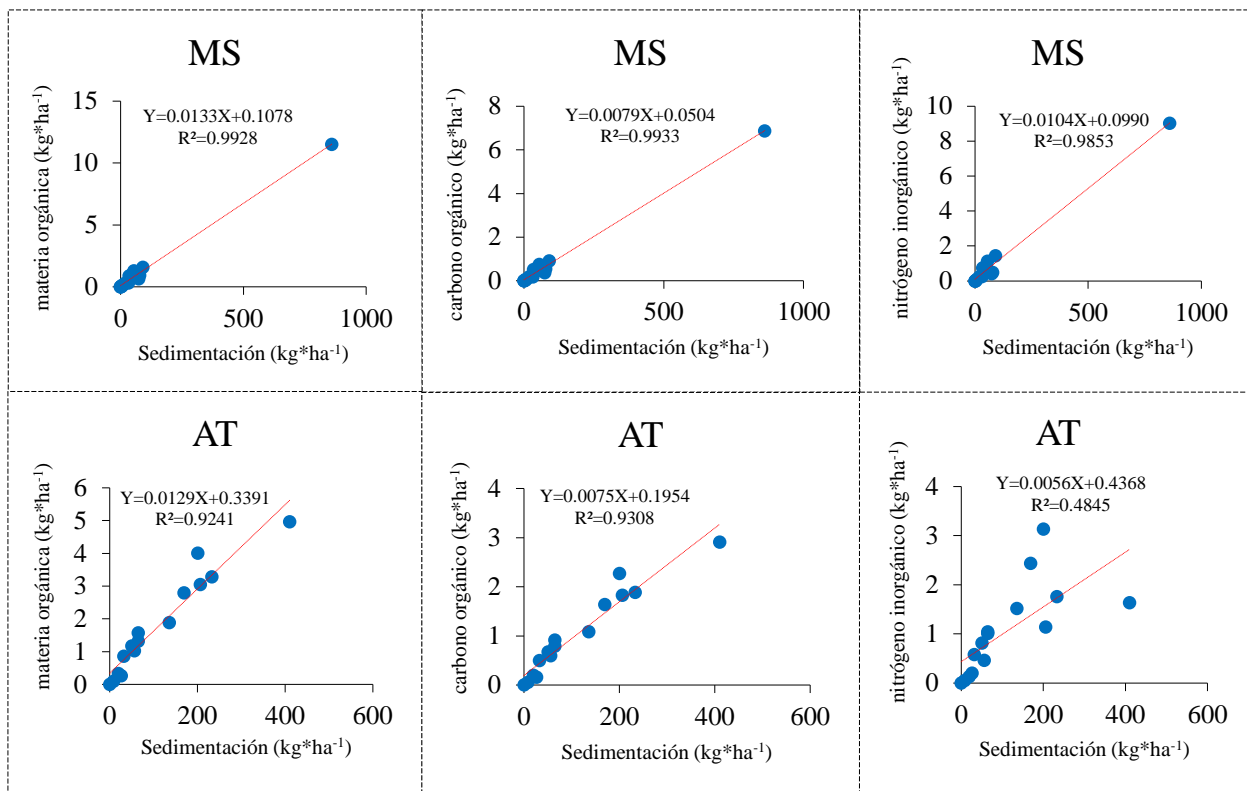
Después de caracterizar los sedimentos para los diferentes usos de suelo, se encontró que fueron enriquecidos con la fracción arcillosa. Asimismo, se obtuvieron elevadas correlaciones entre las propiedades químicas (materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno inorgánico) con la cuantificación de la sedimentación para cada uso de suelo y vegetación. En el PI fue

donde se presentó la correlación más alta entre la materia orgánica y la sedimentación con una  $R^2=0.9309$ , carbono orgánico vs sedimentación con  $R^2=0.9000$  y el nitrógeno inorgánico vs sedimentación con  $R^2=0.7310$ . En el BE una  $R^2=0.9956$  entre la materia orgánica y sedimentación; la pérdida del carbono orgánico vs sedimentación una  $R^2=0.9953$  y en el caso del nitrógeno inorgánico la mayor  $R^2=0.8098$  que para el PI (Figura 22).



**Figura 22.** Correlación entre la sedimentación y las pérdidas de nutrientes en el PI y BE.

En el MS donde se presentó la correlación más alta fue la materia orgánica vs sedimentación con  $R^2=0.9928$ ; carbono orgánico vs sedimentación una  $R^2=0.9933$  y el nitrógeno inorgánico vs sedimentación con  $R^2=0.9853$ . Asimismo, en la AT se obtuvo  $R^2=0.9241$  de la relación entre materia orgánica y sedimentación; mientras que la pérdida entre el carbono orgánico y la sedimentación resultó una  $R^2=0.9308$ ; para el caso de la relación entre el nitrógeno inorgánico y la sedimentación el valor obtenido fue el más bajo, con una  $R^2=0.4845$  más baja, esto debido a que el maíz absorbe grandes cantidades de este nutriente (Sosa-Rodriguez y García-Vivas, 2018) (Figura 23).



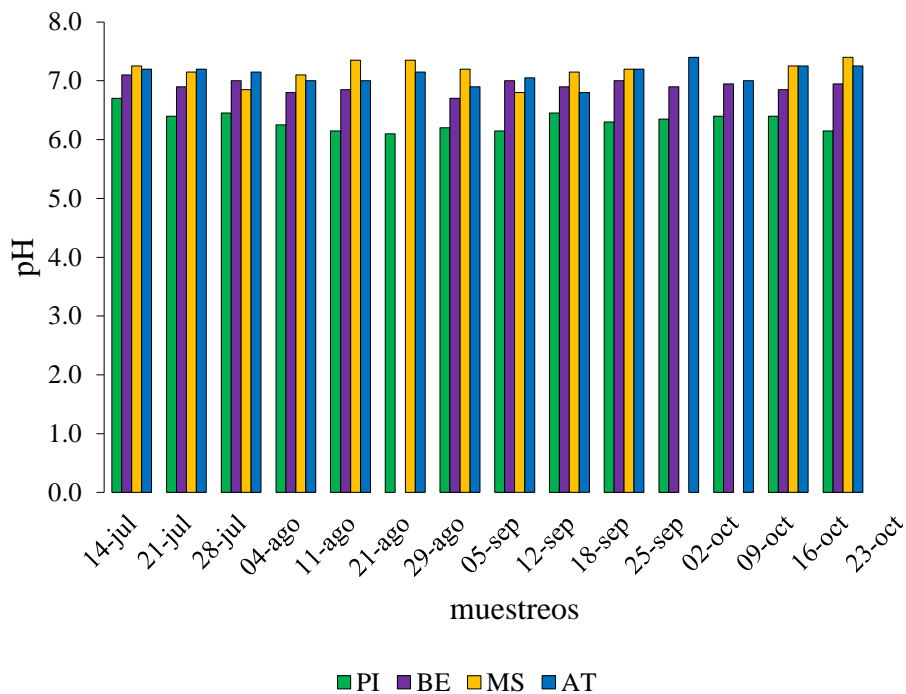
**Figura 23.** Correlación entre la sedimentación y las pérdidas de nutrientes en el MS y AT.

Castelán *et al.* (2017) encontraron que, para sistemas agrícolas con maíz, maíz-calabaza y maíz avena la relación de la pérdida de nutrientes, en función de la producción de sedimentos es lineal, como los resultados obtenidos en este estudio y en consecuencia al incrementarse la producción de sedimentos por efecto de la precipitación se eleva el arrastre de nutrientes. El estudio realizado por Bienes *et al.* (2010) obtuvieron una  $R^2=0.9100$ . Coincidiendo, lo que más se pierde por la erosión hídrica es la materia orgánica, constituyente de foco de contaminación difusa.

### 7.3.1 pH

El pH promedio en PI fue 6.3, BE 6.9, MS 7.2 y en la AT de 7.1. El valor máximo fue de 7.6 y el valor mínimo de 6.0. A medida que aumenta el escurrimiento provoca el lavado de bases, generando que los suelos presenten un pH ácido (Figura 24).





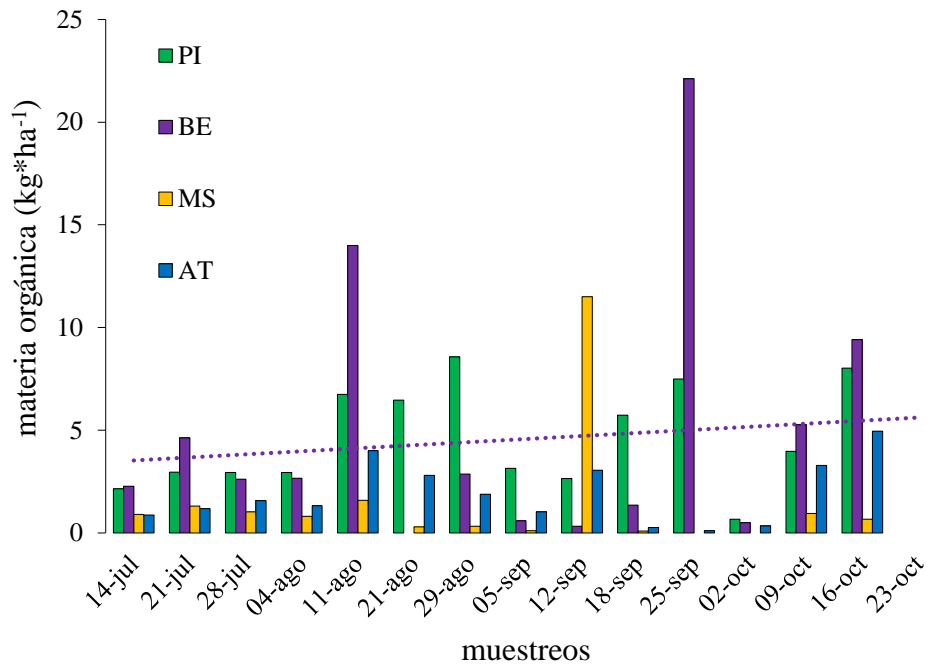
**Figura 24.** pH de los sedimentos en los usos del suelo y vegetación.

Cuando se realiza un manejo inadecuado de los agroecosistemas para la producción de alimentos, se lleva un deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, viéndose reflejado una menor producción en los cultivos. Las pérdidas difusas de nutrientes juegan un papel crítico en el deterioro del medio ambiente acuático, en el estudio realizado por Nadal-Romero (2019) también encontraron modificaciones en el pH del suelo por erosión hídrica, especificando el lavado de concentraciones de cationes como el  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^{+}$  se llega a la acidez del suelo. También, tal como lo señalan Mueller *et al.* (2012) las especies vegetales pueden afectar varios procesos en los ciclos biogeoquímicos que interactúan para influir en constituyentes orgánicos del suelo. Por ejemplo, protones y ácidos orgánicos liberados por plantas o producidos durante la oxidación de la hojarasca, puede bajar el pH del suelo, promover disolución mineral y aumentar la concentración de  $\text{Al}^{+3}$  y  $\text{Fe}^{+2}$ .

### 7.3.2 Materia orgánica

La mayor pérdida en el contenido de materia orgánica se presentó en suelos de BE con valores promedios de 5.8%, en la AT de 1.8%, MS de 1.7% y en el PI 1.4%. De la

cuantificación de los 15 muestreos donde existió mayor pérdida de la materia orgánica fue el 25 de septiembre para el BE con  $22.12 \text{ kg*ha}^{-1}$ , el 29 de agosto para el PI con  $8.58 \text{ kg*ha}^{-1}$ ; el 16 de octubre para la AT con  $4.96 \text{ kg*ha}^{-1}$ ; mientras que en MS el muestreo que más pérdida presentó fue el 12 de septiembre con  $11.50 \text{ kg*ha}^{-1}$  (Figura 25).



**Figura 25.** Pérdida de la materia orgánica en los usos de suelo y vegetación.

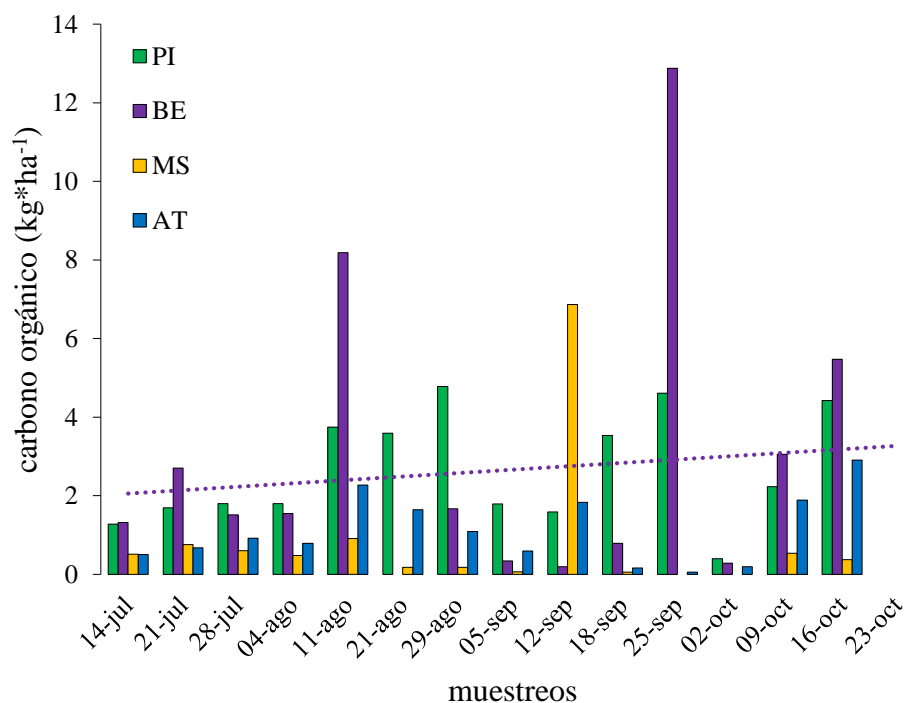
En el caso del PI, la pérdida de la materia orgánica también se debe a la quema de residuos, al sobrepastoreo y a la extracción de leña que realizan agricultores, lo cual genera que el suelo quede sin alguna protección y se genere la compactación del suelo disminuyendo su capacidad de infiltración y por tal motivo se ocasiona mayor escurrimiento superficial y aumenta la pérdida de suelo por erosión hídrica.

De acuerdo con Morgan (2005), el efecto de la erosión es una pérdida de productividad, lo que restringe a los cultivos y los resultados se ven en un aumento en el gasto en fertilizantes para mantener los rendimientos. La pérdida de fertilidad del suelo a través de la erosión conduce finalmente al abandono de la tierra, con consecuencias para la producción de alimentos y la seguridad alimentaria y una disminución sustancial en el valor de la tierra.

Los problemas fuera del sitio surgen de la sedimentación aguas abajo, lo que reduce la capacidad de los ríos y zanjas de drenaje, aumenta el riesgo de inundación, bloquea los canales de riego y acorta la vida de diseño de los embalses. El sedimento también es un contaminante en sí mismo, ya que existen sustancias químicas adsorbidas, aumenta los niveles de nitrógeno y fósforo en cuerpos de agua y da lugar a la eutrofización (Melaku *et al.*, 2018).

### 7.3.3 Carbono orgánico

El mayor contenido de carbono orgánico se presentó en suelos de BE con valores promedios de 3.4%; en la AT de 1.0%; MS de 1.0% y en el PI 0.8%. El comportamiento de los muestreos de la pérdida del carbono orgánico fue similar al de la materia orgánica, donde existió mayor pérdida fue el 25 de septiembre en el BE con  $12.88 \text{ kg*ha}^{-1}$ , para el PI donde se perdió más fue en el muestreo realizado el 29 de agosto con  $4.78 \text{ kg*ha}^{-1}$ ; en la AT el muestreo realizado el 16 de octubre fue donde más se perdió con  $2.91 \text{ kg*ha}^{-1}$ ; mientras que, en el MS el muestreo que más pérdida presentó fue el 12 de septiembre con  $6.87 \text{ kg*ha}^{-1}$  (Figura 26).



**Figura 26.** Pérdida de carbono orgánico en los usos de suelo y vegetación.

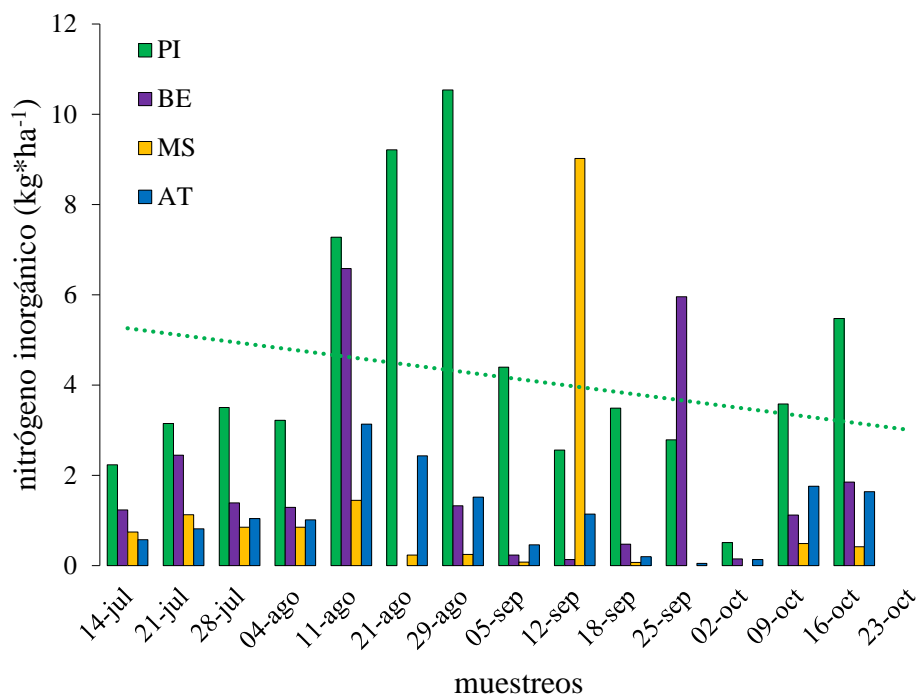
Veum *et al.* (2009) indican que las pérdidas de COS suelen oscilar entre 10 y 100 kg\*ha<sup>-1</sup>\*año<sup>-1</sup>, con un promedio de 4.7 kg\*ha<sup>-1</sup>, también señalan que en los bosques templados se pierden de 3.4 a 417 kg\*ha<sup>-1</sup> y los pastizales pierden solo 1.6 a 5 kg\*ha<sup>-1</sup>. Dalzell *et al.* (2007) estimaron pérdidas de COS en terrenos agrícolas en el rango de 14.1 a 19.5 kg\*ha<sup>-1</sup>, y estos valores son semejantes a los de Royer y David (2005) ya que ellos obtuvieron un rango de 3 a 23 kg\*ha<sup>-1</sup>.

Lal (2004) y Hancock *et al.* (2019) afirman que la erosión del suelo conduce a la degradación del suelo, pérdida de estructura, nutrientes y COS. De esta manera también Morgan (2005) menciona que la erosión conduce a la descomposición de los agregados del suelo y terrones en partículas primarias de arcilla, limo y arena como es el caso de los suelos Alfisoles y Vertisoles. A través de este proceso, el carbono que se mantiene dentro de las arcillas y el contenido orgánico del suelo se liberan a la atmósfera como CO<sub>2</sub>. Yasar Korkanc y Dorum (2019) citan que a nivel mundial se pierde de COS por erosión hídrica de 4 a 6 millones de toneladas/año y que la presencia en exceso del carbono orgánico en el agua constituye un parámetro importante para la contaminación orgánica.

Si la vegetación nativa es reemplazada por plantas agrícolas, se produce un cambio en el ciclo natural, y la escorrentía y la erosión de los sedimentos transportan nutrientes fácilmente. Las cantidades excesivas de nutrientes y carbono orgánico, que son transportados por el escurrimiento, toman una parte importante en el proceso de eutrofización e hipoxia (Wu *et al.*, 2012; Hale *et al.*, 2016).

#### **7.3.4 Nitrógeno inorgánico**

El mayor contenido de nitrógeno inorgánico se presentó en suelos de BE con valores promedios de 23.60 mg/kg, en el MS 14.20 mg/kg, el PI 12.60 mg/kg y la AT con 11.40 mg/kg. El uso de suelo y vegetación que más pierde nitrógeno inorgánico es el PI; asimismo, el muestreo donde se perdió más de este nutriente fue el 29 de agosto con 10.54 kg\*ha<sup>-1</sup>. Mientras que para el MS el muestreo fue el del 12 de septiembre con 9.02 kg\*ha<sup>-1</sup>; en la AT el 11 de agosto con 3.13 kg\*ha<sup>-1</sup>. Finalmente, para el BE el muestreo que presentó más pérdida fue el 11 de agosto con 6.58 kg\*ha<sup>-1</sup> de nitrógeno inorgánico (Figura 27).



**Figura 27.** Pérdida de nitrógeno inorgánico en los usos de suelo y vegetación.

Los resultados obtenidos en esta investigación, coinciden con Shan *et al.* (2015) ya que también encontraron pérdidas de escorrentía de nitrógeno de 10.43 a 22.68 kg\*ha<sup>-1</sup>. Otra investigación fue la desarrollada por Gomes *et al.* (2019), ellos estimaron la pérdida de productividad agrícola y pérdida de nitrógeno, para los años 2000 y 2012, sus resultados muestran que la tasa anual de pérdida de suelo aumentó de 10.4 (2000) a 12 t\*ha<sup>-1</sup>\*año<sup>-1</sup> (2012), en general la pérdida aumenta en áreas gravemente erosionadas, ya que se pierden de 13.2 y 25.9 veces más nitrógeno.

## 7.4 Perfiles de suelo

De acuerdo a los perfiles de suelo y muestras analizadas en laboratorio (Anexo 10.1), los suelos más susceptibles a la erosión son los Luvisoles (Alfisoles) (carta edafológica E13B18), ya que se encuentran en zonas de pastizales y en pendientes mayores al 5%. En cambio, los Vertisoles se encuentran en partes planas.

En el perfil 1 realizado en el BE, se encontró una profundidad de 0-90 cm, promedios de pH 6.6, materia orgánica 2.8%, densidad aparente de 1.12 g/cm<sup>3</sup>, nitrógeno inorgánico 7 mg/kg. Se determinó que la mayor parte del perfil posee textura arcilla, presentó en promedio 25.43% de arena, 26.98% de limo y 47.59% de arcilla (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Perfil 1 Bosque de Encino (BE)

| Horizonte | Prof. (cm) | pH  | % MO | % CO | Dap (g/cm <sup>3</sup> ) | NI (ppm) | % Arena | % Limo | % Arcilla | Clase textural |
|-----------|------------|-----|------|------|--------------------------|----------|---------|--------|-----------|----------------|
| Oi        | 0-5        | 6.7 | 4.8  | 2.8  | 1.04                     | 13.5     | 25.68   | 26.12  | 48.20     | Arcilla        |
| A         | 5-22       | 6.8 | 2.7  | 1.6  | 1.11                     | 6.1      | 23.30   | 32.45  | 44.25     | Arcilla        |
| B         | 22-50      | 6.5 | 2.2  | 1.3  | 1.15                     | 4.7      | 31.07   | 25.25  | 43.68     | Arcilla        |
| C         | 50-90      | 6.5 | 1.5  | 0.9  | 1.18                     | 3.7      | 21.68   | 24.10  | 54.22     | Arcilla        |

En el perfil 2 realizado en el PI, se encontró una profundidad de 0-80 cm, promedios de pH 6.8, materia orgánica 2.2%, densidad aparente de 1.13 g/cm<sup>3</sup>, nitrógeno inorgánico 5.3 mg/kg. Se determinó que la mayor parte del perfil posee textura franco arcilloso, presentó en promedio 32.40% de arena, 25.38% de limo y 42.22% de arcilla (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Perfil 2 Pastizal Inducido (PI)

| Horizonte | Prof. (cm) | pH  | % MO | % CO | Dap (g/cm <sup>3</sup> ) | NI (ppm) | % Arena | % Limo | % Arcilla | Clase textural   |
|-----------|------------|-----|------|------|--------------------------|----------|---------|--------|-----------|------------------|
| Oi        | 0-10       | 7.0 | 3.4  | 2.0  | 1.06                     | 7.9      | 39.88   | 29.80  | 30.32     | Franco Arcilloso |
| A         | 10-30      | 6.8 | 1.9  | 1.1  | 1.16                     | 4.7      | 39.68   | 24.12  | 36.20     | Franco Arcilloso |
| C         | 30-80      | 6.7 | 1.3  | 0.8  | 1.19                     | 3.3      | 17.65   | 22.24  | 60.11     | Arcilla          |

En el perfil 3 realizado en el BE, se encontró una profundidad de 0-100 cm, promedios de pH 6.7, materia orgánica 3.2%, densidad aparente de 1.08 g/cm<sup>3</sup>, nitrógeno inorgánico 6.2 mg/kg. Se determinó que la mayor parte del perfil posee textura arcilla, presentó en promedio 27.45% de arena, 27.61% de limo y 44.94% de arcilla (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Perfil 3 Bosque de Encino (BE)

| Horizonte | Prof. (cm) | pH  | % MO | % CO | Dap (g/cm <sup>3</sup> ) | NI (ppm) | % Arena | % Limo | % Arcilla | Clase textural |
|-----------|------------|-----|------|------|--------------------------|----------|---------|--------|-----------|----------------|
| Oi        | 0-12       | 6.8 | 3.9  | 2.3  | 1.01                     | 8.4      | 25.28   | 26.30  | 48.42     | Arcilla        |
| A         | 12-55      | 6.7 | 3.1  | 1.8  | 1.09                     | 6.1      | 24.14   | 31.14  | 44.72     | Arcilla        |
| C         | 55-100     | 6.7 | 2.6  | 1.5  | 1.14                     | 4.2      | 32.93   | 25.39  | 41.68     | Arcilla        |

En el perfil 4 realizado en el PI, se encontró una profundidad de 0-112 cm, promedios de pH 6.8, materia orgánica 2.5%, densidad aparente de 1.15 g/cm<sup>3</sup>, nitrógeno inorgánico 3.9 mg/kg. Se determinó que la mayor parte del perfil posee textura arcilla, presentó en promedio 36.59% de arena, 19.48% de limo y 43.93% de arcilla (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Perfil 4 Pastizal Inducido (PI)

| Horizonte | Prof. (cm) | pH  | % MO | % CO | Dap (g/cm <sup>3</sup> ) | NI (ppm) | % Arena | % Limo | % Arcilla | Clase textural   |
|-----------|------------|-----|------|------|--------------------------|----------|---------|--------|-----------|------------------|
| Oi        | 0-11       | 6.9 | 3.2  | 1.9  | 1.08                     | 5.6      | 41.32   | 24.91  | 33.77     | Franco Arcilloso |
| A         | 11-55      | 6.9 | 2.3  | 1.3  | 1.18                     | 3.3      | 35.68   | 18.17  | 46.15     | Arcilla          |
| C         | 55-112     | 6.8 | 2.0  | 1.2  | 1.19                     | 2.8      | 32.78   | 15.38  | 51.84     | Arcilla          |

En el perfil 5 realizado en el MS, se encontró una profundidad de 0-45 cm, promedios de pH 7.0, materia orgánica 1.6%, densidad aparente de 1.22 g/cm<sup>3</sup>, nitrógeno inorgánico 5.6 mg/kg. Se determinó que la mayor parte del perfil posee textura arcilla, presentó en promedio 32.08% de arena, 24.95% de limo y 42.97% de arcilla (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Perfil 5 Matorral Subtropical (MS)

| Horizonte | Prof. (cm) | pH  | % MO | % CO | Dap (g/cm <sup>3</sup> ) | NI (ppm) | % Arena | % Limo | % Arcilla | Clase textural |
|-----------|------------|-----|------|------|--------------------------|----------|---------|--------|-----------|----------------|
| A         | 0-17       | 7.1 | 1.9  | 1.1  | 1.20                     | 7.5      | 32.78   | 23.14  | 44.08     | Arcilla        |
| C         | 17-45      | 7.0 | 1.3  | 0.8  | 1.24                     | 3.7      | 31.38   | 26.77  | 41.85     | Arcilla        |

En el perfil 6 realizado en la AT, se encontró una profundidad de 0-88 cm, promedios de pH 7.1, materia orgánica 2.1%, densidad aparente de 1.31 g/cm<sup>3</sup>, nitrógeno inorgánico 5.1 mg/kg. Se determinó que la mayor parte del perfil posee textura arcilla, presentó en promedio 24.34% de arena, 23.85% de limo y 51.81% de arcilla (Cuadro 9).

**Cuadro 9.** Perfil 6 Agricultura de Temporal (AT)

| Horizonte | Prof. (cm) | pH  | % MO | % CO | Dap (g/cm <sup>3</sup> ) | NI (ppm) | % Arena | % Limo | % Arcilla | Clase textural |
|-----------|------------|-----|------|------|--------------------------|----------|---------|--------|-----------|----------------|
| Ap        | 0-20       | 7.2 | 2.2  | 1.3  | 1.28                     | 6.1      | 17.81   | 27.53  | 54.66     | Arcilla        |
| AC        | 20-88      | 7.0 | 2.0  | 1.2  | 1.34                     | 4.2      | 30.87   | 20.18  | 48.95     | Arcilla        |

En el perfil 7 realizado en la AT, se encontró una profundidad de 0-52 cm, promedios de pH 6.8, materia orgánica 1.6%, densidad aparente de 1.25 g/cm<sup>3</sup>, nitrógeno inorgánico 5.0 mg/kg. Se determinó que la mayor parte del perfil posee textura franco arcilloso, presentó en promedio 37.51% de arena, 25.51% de limo y 36.98% de arcilla (Cuadro 10).

**Cuadro 10.** Perfil 7 Agricultura de Temporal (AT)

| Horizonte | Prof. (cm) | pH  | % MO | % CO | Dap (g/cm <sup>3</sup> ) | NI (ppm) | % Arena | % Limo | % Arcilla | Clase textural   |
|-----------|------------|-----|------|------|--------------------------|----------|---------|--------|-----------|------------------|
| Ap        | 0-33       | 6.9 | 1.7  | 1.0  | 1.20                     | 5.2      | 38.76   | 29.92  | 31.32     | Franco Arcilloso |
| C         | 33-52      | 6.8 | 1.5  | 0.9  | 1.31                     | 4.8      | 36.27   | 21.11  | 42.62     | Arcilla          |

En el perfil 8 realizado en la MS, se encontró una profundidad de 0-55 cm, promedios de pH 6.9, materia orgánica 1.1%, densidad aparente de 1.25 g/cm<sup>3</sup>, nitrógeno inorgánico 4.7 mg/kg. Se determinó que la mayor parte del perfil posee textura arcilla, presentó en promedio 27.30% de arena, 19.89% de limo y 52.81% de arcilla (Cuadro 11).

**Cuadro 11.** Perfil 8 Matorral Subtropical (MS)

| Horizonte | Prof. (cm) | pH  | % MO | % CO | Dap (g/cm <sup>3</sup> ) | NI (ppm) | % Arena | % Limo | % Arcilla | Clase textural |
|-----------|------------|-----|------|------|--------------------------|----------|---------|--------|-----------|----------------|
| A         | 0-15       | 7.0 | 1.3  | 0.8  | 1.23                     | 5.0      | 31.52   | 18.36  | 50.12     | Arcilla        |
| C         | 15-55      | 6.9 | 0.9  | 0.5  | 1.27                     | 4.4      | 23.09   | 21.42  | 55.49     | Arcilla        |



## 7.5 Estimación de la pérdida de suelo

De acuerdo a los resultados obtenidos con la interfaz geoespacial GeoWEPP 2008.2, este modelo integra el WEPP con una plataforma SIG; en este caso, WEPP 2012.8 y ArcGIS 10.2.2 (Figura 28).

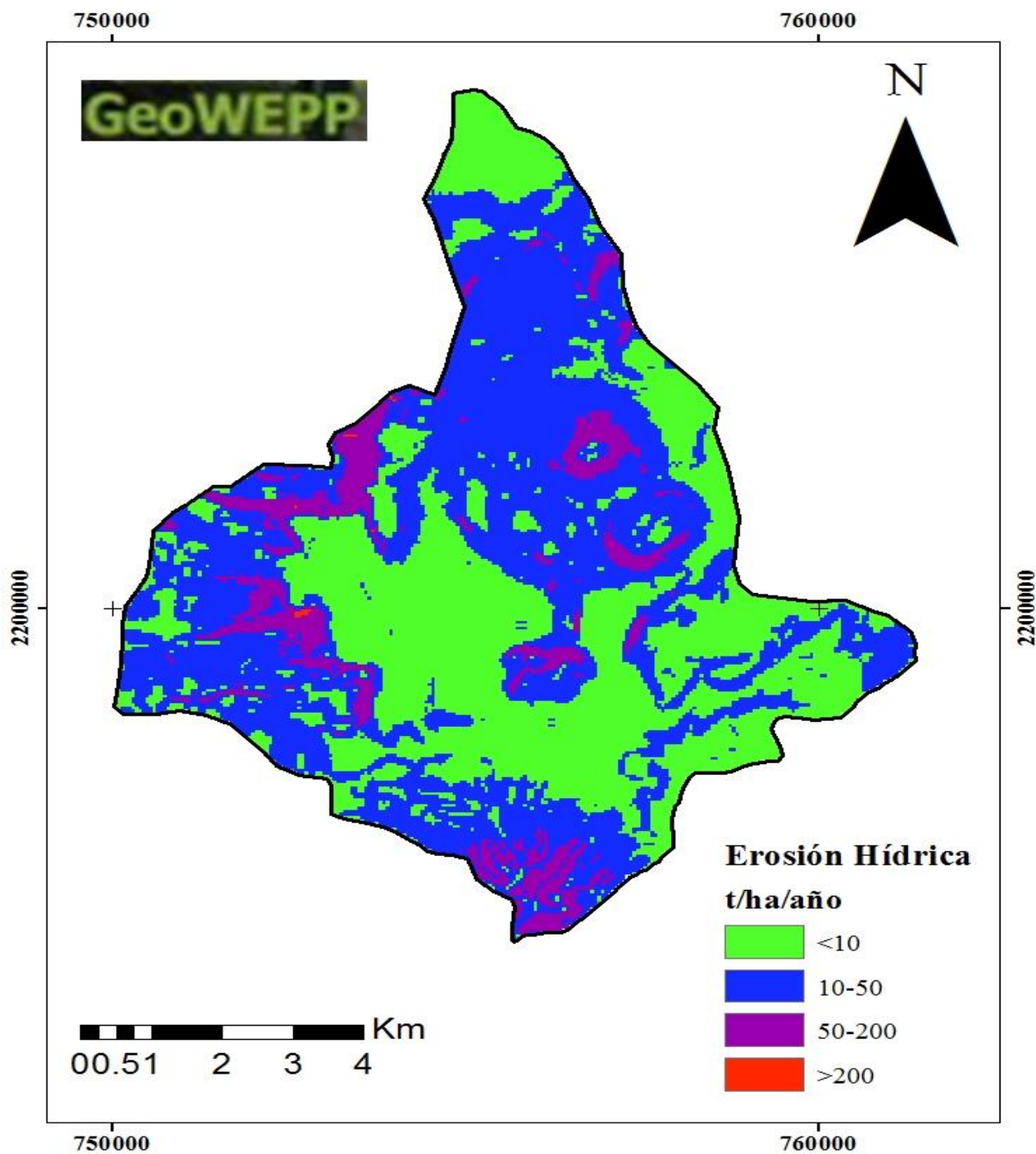


Figura 28. Estimación de la pérdida de suelo con la interfaz del modelo GeoWEPP.

Dentro de la microcuenca se ven afectadas 3,083 ha (42.44%) las cuales se clasifican como pérdida de suelo ligera ( $<10 \text{ t*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$ ), para la clase de pérdida de suelo moderada (10-50  $\text{t*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$ ) se estimó una superficie afectada de 3,558 ha (48.48%). Respecto, a la clase de pérdida de suelo alta (50-200  $\text{t*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$ ) se obtuvieron resultados de una superficie afectada de 619 ha (8.52%). Finalmente, para la clase de pérdida de suelo muy alta ( $>200 \text{ t*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$ ) se presentó una superficie afectada de 3 ha (0.56%). Cabe mencionar que se realizó una reclasificación como referencia a los rangos de clasificación de la erosión hídrica que establece la FAO (1980) (Cuadro 12).

**Cuadro 12.** Rangos de clasificación de la erosión hídrica.

| Clases pérdida de suelo | Rangos ( $\text{t*ha}^{-1}\text{*año}^{-1}$ ) | Superficie afectada (ha) | %     |
|-------------------------|---|--------------------------|-------|
| Ligera                  | < 10  | 3,083                    | 42.44 |
| Moderada                | 10-50   | 3,558                    | 48.48 |
| Alta                    | 50-200  | 619                      | 8.52  |
| Muy Alta                | > 200   | 3                        | 0.56  |

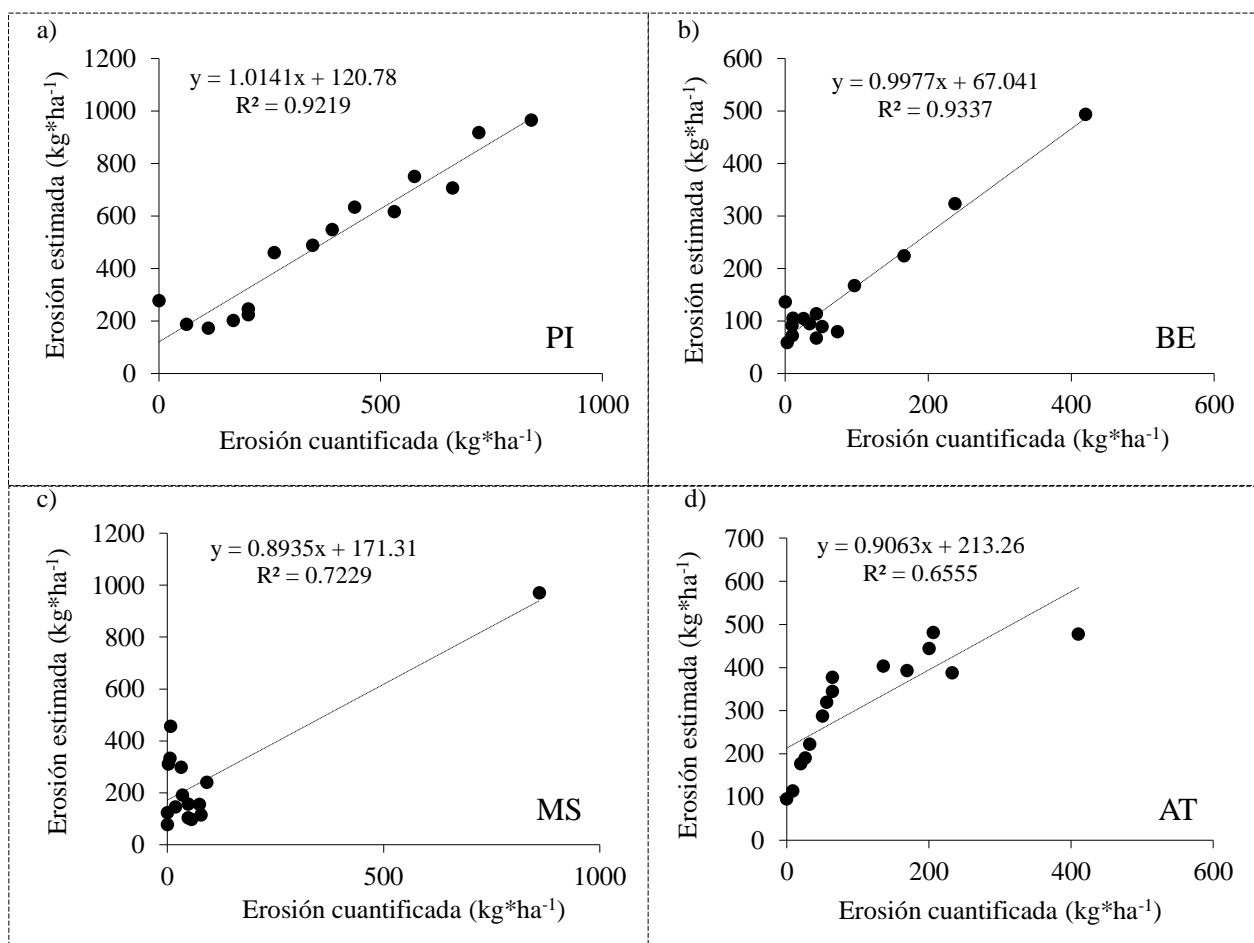
En el PI se estimó una pérdida de suelo de 7,402.10  $\text{kg*ha}^{-1}$  y escurrimiento de 207,074.66  $\text{L*ha}^{-1}$ , en el BE 2,225.04  $\text{kg*ha}^{-1}$  y escurrimiento de 123,863.11  $\text{L*ha}^{-1}$ , en el MS 3,778.14  $\text{kg*ha}^{-1}$  y escurrimiento de 79,345.29  $\text{L*ha}^{-1}$ . Finalmente, para la AT 4,718.08  $\text{kg*ha}^{-1}$  con un escurrimiento de 110,939.17  $\text{L*ha}^{-1}$ . De manera general el modelo sobreestimó la sedimentación y el escurrimiento (Cuadro 13).

**Cuadro 13.** Cuantificación y estimación de la sedimentación y escurrimiento.

| Uso del suelo y vegetación | Sedimentación ( $\text{kg*ha}^{-1}$ ) |            | Eskurrimiento ( $\text{L*ha}^{-1}$ ) |            |
|----------------------------|---------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|
|                            | Cuantificación                        | Estimación | Cuantificación                       | Estimación |
| PI                         | 5512.78                               | 7402.10    | 148360.58                            | 207074.66  |
| BE                         | 1222.24                               | 2225.04    | 101366.02                            | 125836.11  |
| MS                         | 1352.34                               | 3778.14    | 66980.85                             | 79345.29   |
| AT                         | 1676.20                               | 4718.08    | 83831.96                             | 110939.17  |

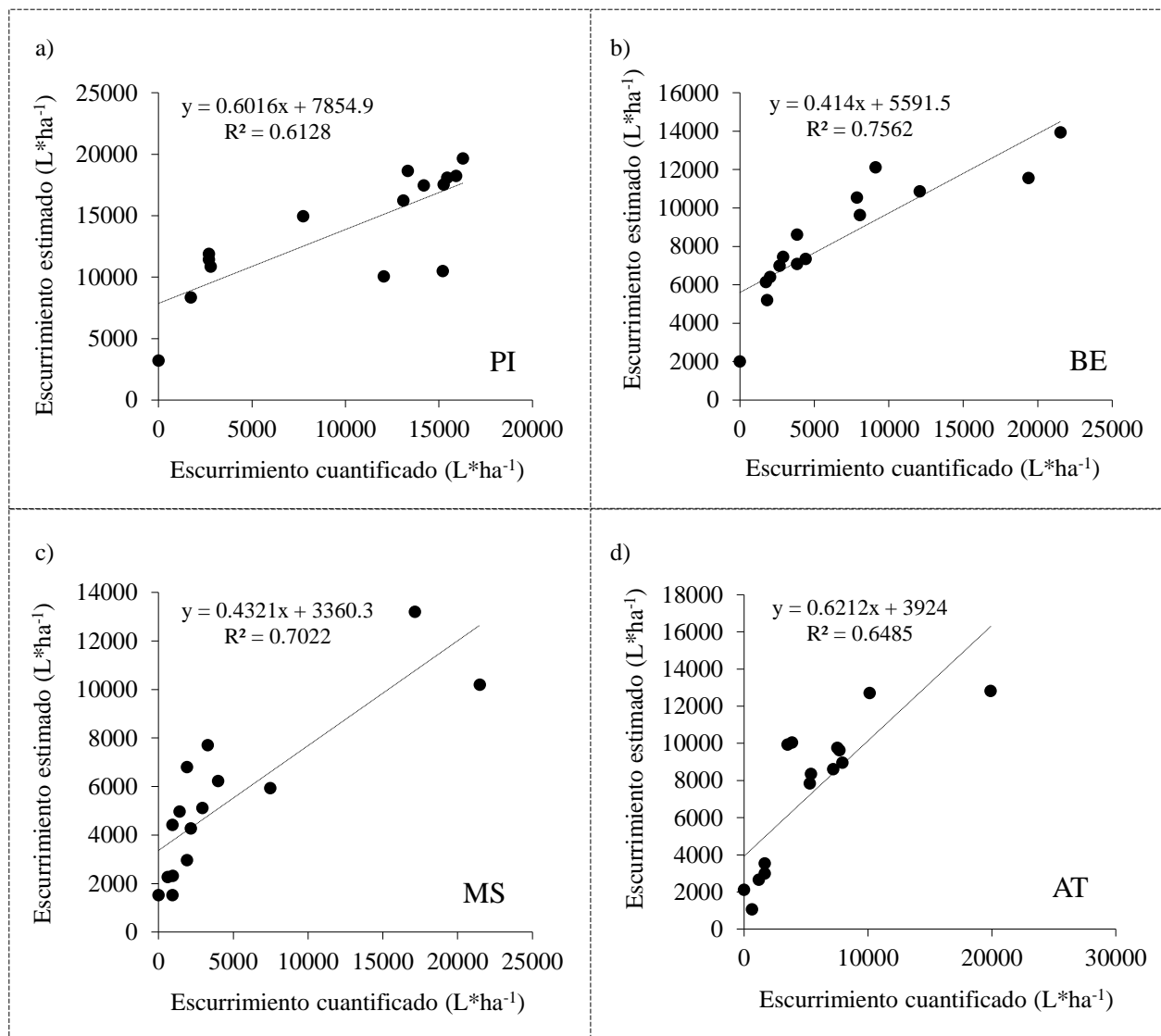
Con los resultados en la estimación de la sedimentación de los cuatro usos de suelo y vegetación, se realizó una comparación entre la cuantificación y la estimación. Obteniéndose mejor correlación en el BE con una  $R^2=0.9337$ , enseguida en el PI con  $R^2=0.9219$ , donde se obtuvieron menores correlaciones fue en el MS con  $R^2=0.7229$  y en la AT con  $R^2=0.6555$  (Figura 29). Jorge *et al.* (2015) realizaron el estudio con WEPP en parcelas de escurrimiento y sedimentación con tratamientos de rotaciones de cultivos y pasturas, logrando obtener  $R^2=0.97$ .

En otro estudio, establecido por Han *et al.* (2016) en sitios con diferentes porcentajes de coberturas vegetales (0, 20, 40 y 60%), realizaron la comparación entre la cuantificación y estimación obteniendo  $R^2$  (0.81, 0.97, 0.91 y 1.00), su trabajo es parecido a los resultados de esta investigación, porque los valores simulados de sedimentación son más altos que el tomado directamente en campo.



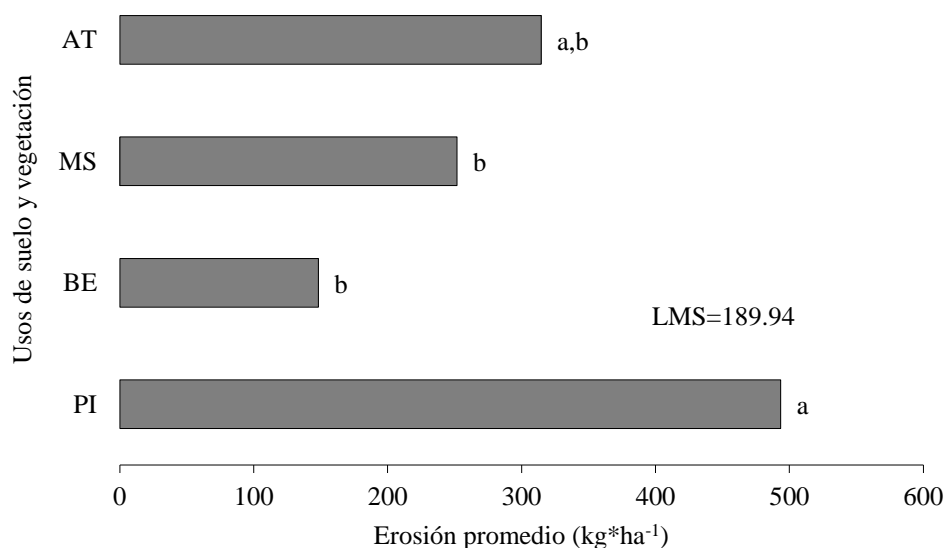
**Figura 29.** Cuantificación de la pérdida de suelo vs estimación mediante WEPP.

El modelo WEPP estimó el escurrimiento de los cuatro usos de suelo y vegetación, se obtuvieron correlaciones más bajas que en el sedimento, la más alta se presentó en el BE con una  $R^2=0.7562$ , en el MS con  $R^2=0.7022$ , donde se obtuvieron menores correlaciones fue en la AT con  $R^2=0.6485$  y en el PI con  $R^2=0.6128$  (Figura 30). El modelo mostró tendencia a sobreestimar, similar a lo encontrado por Gvozdenovich *et al.* (2017) en un estudio realizado en cuatro tratamientos: suelo desnudo, maíz, soja a 70 y a 35 cm entre hileras, reportan  $R^2$  (0.51, 0.67, 0.71 y 0.56). Lo cual coincide con los resultados obtenidos en esta investigación. Estos autores, también mencionan que la mejor estimación se presenta en suelos con cobertura vegetal densa.



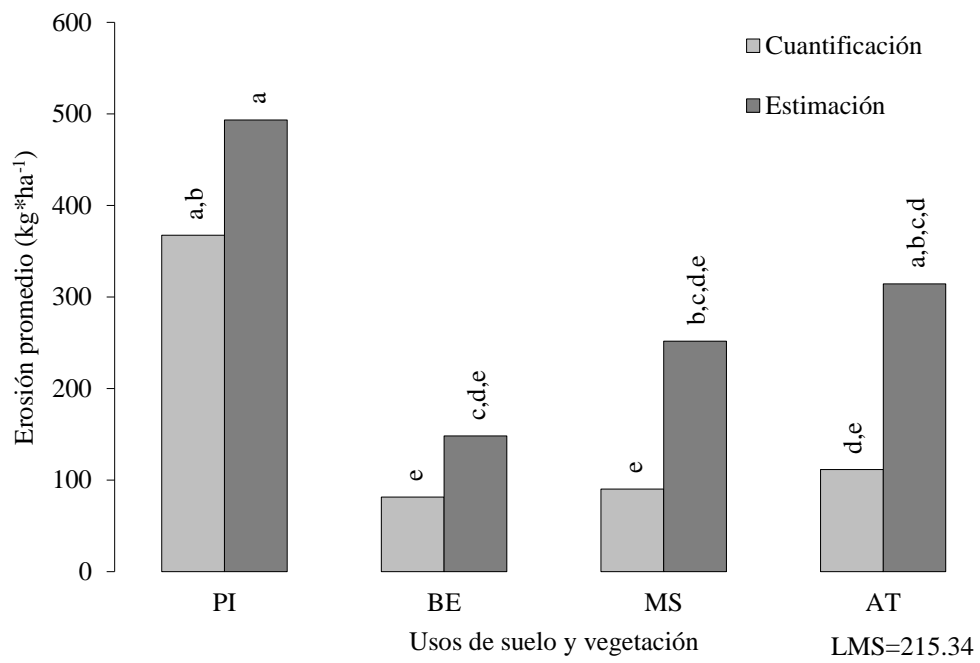
**Figura 30.** Cuantificación del escurrimiento vs estimación mediante WEPP.

Las medias de la estimación de la sedimentación del uso de suelo y vegetación se pueden observar en la (Figura 31). En promedio el PI presentó 493.47 kg\*ha<sup>-1</sup> de sedimentación, en la AT de 314.53 kg\*ha<sup>-1</sup>. Para el caso del MS de 251.87 kg\*ha<sup>-1</sup> y en el BE de 148.33 kg\*ha<sup>-1</sup>. El análisis de varianza mostró diferencia significativa  $p \leq 0.05$  entre los usos de suelos y vegetación, observándose mayores pérdidas en el PI.



**Figura 31.** Comparación de medias de la estimación de sedimentación en los usos de suelo y vegetación.

De acuerdo a la comparación de medias entre la cuantificación y estimación, en donde mejor se estimó la sedimentación fue en el PI (Figura 32). Por ello, en estudios más recientes como el de Anache *et al.* (2018) demuestran que el modelo WEPP es eficiente en la estimación de la pérdida de suelo y escorrentía, llegando a mejorar los resultados con la capacidad de predecir tanto temporal como espacial las distribuciones de erosión hídrica del suelo en pequeñas cuencas. A lo que González-Arqueros *et al.* (2017) y Saghafian *et al.* (2014) hacen referencia en la investigación que realizaron, este modelo a menudo sobreestima las tasas de pérdida de suelo y escorrentía. Estos mismos autores justifican que la principal incertidumbre es la entrada de los datos, basada en registros históricos reconstruidos.



**Figura 32.** Erosión anual promedio de la cuantificación y estimación para cada uso de suelo y vegetación.

## VIII. CONCLUSIONES

El uso de suelo y vegetación donde mayor determinación de escurrimiento y sedimentación se presentó fue en el PI. Mientras que, BE, MS y AT resultaron con la menor cuantificación.

El uso de suelo y vegetación con la menor tasa de infiltración se encontró en el PI y los que presentaron la mayor fueron el MS, BE y AT.

Existió una fuerte correlación entre las pérdidas de suelo con los nutrimentos. Siendo el PI donde más nitrógeno inorgánico se perdió. El BE fue el sitio con la mayor pérdida de materia orgánica y por ende de carbono orgánico.

El modelo de base física PPEH estimó adecuadamente la sedimentación y escurrimiento, presentando mayor eficiencia para el PI respecto a BE, MS y AT. Sin embargo, el modelo mostró tendencia a sobreestimar.

Para la sedimentación las correlaciones más altas se presentaron en el BE y PI, las más bajas en el MS y AT. En cambio, para el escurrimiento las mayores fueron en BE y MS, las más bajas en AT y PI.

## IX. LITERATURA CITADA

- Adhikari, K. & Hartemink, E. A. (2016). Linking soils to ecosystem services-A global review. *Geoderma*, 262, 101-111.
- Alatorre, L.C. y Beguería, S. (2009). Los modelos de erosión: una revisión. *C&G*, 23, 29-48.
- Alvarado, N. K., López, P. V. y Castillo, F. J. (2011). Pérdida de suelo por erosión hídrica en diferentes sistemas de producción con papa *Solanum tuberosum* L. *Ciencias Agrícolas*, 28, 64-72.
- Anache, J. A. A., Flanagan, D. C., Srivastava, A., & Wendland, E. C. (2018). Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. *Science of The Total Environment*, 622-623, 140–151.
- Asselman, N.E.M., Middelkoop, H. & Van Dijk, P.M. (2003). The impact of change in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine. *Hydrological Processes*, 17, 3225–3244.
- Ávila, V. C. M. (2013). Pérdida de la fertilidad del suelo por erosión hídrica en la cuenca propia del lago de Chapala, Michoacán. Tesis Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad-Michoacán. 67 p.
- Bahrawi, J. A., Elhag, M., Aldhebiani, A. Y., Galal, H. K., Hegazy, A. K., & Alghailani, E. (2016). Soil Erosion Estimation Using Remote Sensing Techniques in Wadi Yalamlam Basin, Saudi Arabia. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–8.
- Bai, W., Kong, L., & Guo, A. (2013). Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5, 406-411.
- Bedolla, O. C., Cabrera, G. A., Prat, C. y Medina, O. L. E. (2012). Dinámica de la erosión en una cárcava en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán, México. 151-159.
- Bienes, R., Ruiz, M. y Marques, M. J. (2010). Pérdida de suelo, fósforo y materia orgánica por erosión hídrica en parcelas revegetadas con matorral autóctono bajo clima semiárido. *Revista ciencia agrarias*, 58-69.
- Blackburn, W.H., Pierson, F.B. & Seyfriend, M.S. (1990). Spatial and temporal influence of soil frost on infiltration and erosion of sagebrush rangelands. *Water Resources Bulletin*, 26, 1-7.



- Bockheim, J. G. & Gennadiyev, A. N. (2000). The Role of Soil Forming Processes in the Definition of Taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma*, 95, 53-72.
- Bombino, G., Denisi, P., Gómez, J., & Zema, D. (2019). Water Infiltration and Surface Runoff in Steep Clayey Soils of Olive Groves under Different Management Practices. *Water*, 11(2), 240.
- Bolaños, G. M. A., Paz, P. F., Cruz, G. C. O., Argumedo, E. J. A., Romero, B. V. M. y De la Cruz, C. J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34, 271-288.
- Camas, G. R., Turrent, F.A., Cortes, F. J. I., Livera, M. M., González, E. A., Villar, S. B., López, M.J., Espinoza, P.N. y Cadena, I. P. (2012). Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferentes sistemas de manejo en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3, 231-243.
- Castelán, V. R., López, T. L. C., Tamariz, F. J. V., Linares, F. G. y Cruz, M. A. (2017). Erosión y pérdida de nutrientes en diferentes sistemas agrícolas de una microcuenca en la zona periurbana de la ciudad de Puebla, México. *Terra Latinoamericana*, 35, 229-235.
- Castro, M. I. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34, 3-16.
- Cheng, J. J., Yuan, H. Y., Wen, X. H., Yan, F. H., Smith, J. & Smith, P. (2014). Climatic and Edaphic Controls on Soil pH in Alpine Grasslands on the Tibetan Plateau, China: A Quantitative Analysis. *Pedosphere*, 24, 39-44.
- Chinchilla, M., Alvarado, A. y Mata, A. (2011). Factores formadores y distribución de suelos de la Subcuenca del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 35, 33-57.
- Coblinski, J. A., Favaretto, N., Democh, G. G., Jeferson, D., de Moraes, A. & de Paula, S. L. C. (2019). Water, Soil and Nutrients Losses by Runoff at Hillslope Scale in Agricultural and Pasture Production in Southern Brazil. *Journal of Agricultural Science*. 11, 160-170.
- CONAFOR. (2015). Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Cuarta edición. Gerencia de suelos. 285 p.
- CONAGUA. (2018). Atlas Digital del Agua. Sistema Nacional de Información del Agua. México.

- COLPOS (Colegio de Postgraduados) y SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2013). Suelo: Protejamos el suelo que nos da vida. Primera Edición. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 22 p.
- Correa, M. J. C. y Salazar, U. J. C. (2016). Introducción a los modelos mixtos. Universidad Nacional de Colombia. 257 p.
- Dai, W. & Huang, Y. (2006). Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China. *Catena*, 65, 87-94.
- Dalzell, B. J., Filley, T. R., & Harbor, J. M. (2007). The role of hydrology in annual organic carbon loads and terrestrial organic matter export from a midwestern agricultural watershed. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 1448–1462.
- De la Rosa, A. A. A., Herrera, S. M., González, C. O., Benítez, L. L. V., Calzada, P. I. y García, P. L. (2013). Evaluación de la validez del modelo constitutivo Drucker Prager Extendido para la simulación de la respuesta mecánica de un Vertisol de la Región central de Cuba. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22, 27-35.
- Devatha, C.P., Deshpande, V. & Renukprasad, M.S. (2015). Estimation of Soil loss using USLE model for Kulhan Watershed, Chattisgarh- A case study. *Aquatic Procedia*, 4, 1429-1436.
- Dueñez-Alanís, J., Gutiérrez, J., Pérez, L. y Nívar, J. (2006). Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión. *Terra Latinoamericana*, 24, 233-240.
- Estrada, P. S. S. (2016). Cuantificación de la erosión hídrica superficial y pérdida de nutrientes en la degradación de suelos agrícolas, con la aplicación de dos métodos de evaluación directa, parcelas de escorrentía y microparcels de varillas de erosión, en la microcuenca de Urambisa-Ambo-Huánuco. Tesis. Universidad Nacional “Hermilio Valdizán” Huánuco. Facultad de Ciencias Agrarias. 148 p.
- Estrada, F. G. (2008). Calidad química del agua subterránea como factor de degradación de los suelos de la Ciénega de Chapala. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Michoacán. 100 p.
- FAO. (2015). Estado mundial del recurso suelo. Roma, Italia. 79 p.
- FAO. (2017). El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos. Roma, Italia. 47 p.

- Fernández, C., & Vega, J. A. (2016). Evaluation of RUSLE and PESERA models for predicting soil erosion losses in the first year after wildfire in NW Spain. *Geoderma*, 273, 64–72.
- Fischer, C., Roscher, C., Jensen, B., Eisenhauer, N., Baade, J., Attinger, S., Scheu, S., Weisser, W., Schumacher, J. & Hildebrandt A. (2014). How Do Earthworms, Soil Texture and Plant Composition Affect Infiltration along an Experimental Plant Diversity Gradient in Grassland?. *Plos one*, 9, 1-12.
- Gallardo, L. J. F. (2017). Suelos y ambiente. *Soils & Environment*, 50-57.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Quinta Edición. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Ed. Ind. México. 90 p.
- García-Hernández, M. A., García-Hernández, M. A., Castellanos-Vargas, I., Cano-Santana, Z. y Peláez-Rocha, C. M. (2007). Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana*, 26, 21-27.
- Gassman, P.W., Sadeghi, A.M. & Srinivasan, R. (2014). Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *Journal of Environmental Quality*, 43, 1-8.
- Gomes, L., Simões, S., Dalla Nora, E., de Sousa-Neto, E., Forti, M. & Ometto, J. (2019). Agricultural Expansion in the Brazilian Cerrado: Increased Soil and Nutrient Losses and Decreased Agricultural Productivity. *Land*, 8, 12.
- Gomes, P.V., Naves, M.L., Christofaro, B. P. & Quinton J. (2017). Modelling spatially distributed soil losses and sediment yield in the upper Grande River Basin–Brazil. *Catena*, 157, 139-150.
- Gómez, G. C., Munive, C. R., Mallma, C. T., Orihuela, V. C. (2014). Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. *Universidad continental*. 04, 32-43.
- González-Arqueros, M. L., Mendoza, M. E., & Vázquez-Selem, L. (2017). Human impact on natural systems modeled through soil erosion in GeoWEPP: A comparison between pre-Hispanic periods and modern times in the Teotihuacan Valley (Central Mexico). *Catena*, 149, 505–513.
- Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A. & Papritz, A. (2017). Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy*, 69, 224-237.

- Guía de campo para el muestreo y descripción de perfiles de suelos versión 2.0. (2002). National Soil Survey Center. Natural Resource Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. 251 p.
- Gutierrez, A. (2014). Erosión hídrica en el estado de Tlaxcala. Colegio de Postgraduados. Tesis de maestría en Edafología. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 62 p.
- Gvozdenovich, J. J., Pérez, B. M., Novelli, L. E. y Anibal, B. P. (2017). ¿Puede WEPP mejorar la predicción de la erosión de suelos respecto a USLE?. *Ciencia del Suelo*, 35(2), 259-272.
- Han, F., Ren, L., Zhang, X., & Li, Z. (2016). The WEPP Model Application in a Small Watershed in the Loess Plateau. *PLOS ONE*, 11, 1-11.
- Hancock, G. R., Kunkel, V., Wells, T. & Martinez, C. (2019). Soil organic carbon and soil erosion—Understanding change at the large catchment scale. *Geoderma*, 343, 60–71.
- Hale, S.S., Cicchetti, G. & Deacutis, C.F. (2016). Eutrophication and hypoxia diminish ecosystem functions of benthic communities in a New England Estuary. *Front. Mar. Sci*, 3, 249.
- Haslmayr, H. P., Geitner, C., Sutor, G., Knoll, A. & Baumgarten A. (2016). Soil function evaluation in Austria-Development, concepts and examples. *Geoderma*, 264, 379-387.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Tarecuato. Carta Topográfica. E13B18. Aguascalientes, Ags. México.
- Jakeman, A.J., Green, T.R., Beavis, S.G., Zhang, L., Dietrich C.R. & Crapper, P.F. (1999). Modelling upland and in-stream erosion, sediment and phosphorus transport in a large catchment. *Hydrological Processes*, 13, 745–752.
- Jorge, G., Pérez, B. M., Terra, J. y Sawchik, J. (2015). Ajuste del modelo de erosión WEPP para un Argisol Subéutrico y un Brunosol Éutrico en el Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 19, 84-93.
- Karydas, C. G., Panagos, P., & Gitas, I. Z. (2012). A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*, 7(3), 229–250.
- Kirillova, N. P., Vodyanitskii, Y. N. & Sileva, T. M. (2015). Conversion of Soil Color Parameters from the Munsell System to the CIE-L\*a\*b\* System. *Genesis and Geography of Soils*, 48, 527-535.

- Kohnke, H. & Franzmeier, D. P. (1995). *Soil Science Simplified*. Fourth Edition. *Waveland Press, Inc.* IL. 162 p.
- Krasilnikov, P., Jimenez, N. F. J., Reyna, T. T. y García, C. N. E. (2011). Geografía de suelos de México. Facultad de Ciencias, UNAM. *Las prensas de ciencias*. 462 p.
- Lal, R. (2003). Soil degradation in the United States: extent, severity and trends. Lewis Publishers. United States of American. 204 p.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1–22.
- Lehmann, J. & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Perspective*, 1-9.
- Lenzi, M.A. & Luzio, M. (1997). Surface runoff, soil erosion and water quality modelling in the Alpone watershed using AGNPS integrated with a Geographic Information System. *European Journal of Agronomy*, 6, 1-14.
- Lin, H. (2012). *Hydropedology. Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology*. First Edition. *Academic Press*. 800 p.
- Liu, S. L., Guo, X. D., Fu, B. J., Lian, G., & Wang, J. (2007). The effect of environmental variables on soil characteristics at different scales in the transition zone of the Loess Plateau in China. *Soil Use and Management*, 23, 92-99.
- McBratney, A., Field, D.J. & Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A. & Jakeman, A.J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761–799.
- Medina, Méndez J., Volke, H. V. H., González, R. J., Galvis, S. A., Santiago, C. M. J. y Cortés, F. J. I. (2006). Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado de Campeche. *Universidad y Ciencia, Trópico Húmedo*. 22, 175-189.
- Melaku, N. D., Renschler, C. S., Flagler, J., Bayu, W., & Klik, A. (2018). Integrated impact assessment of soil and water conservation structures on runoff and sediment yield through measurements and modeling in the Northern Ethiopian highlands. *Catena*, 169, 140–150.
- Ming, H. P., Li, Y. & Sumner, E. M. (2012). *Handbook of Soil Sciences properties and processes*. Second Edition. *CRC Press*, Boca Raton, FL.

- Morgan, R.P.C. (2005). Soil erosion and conservation. Third Edition. Blackwell Science Ltd, USA, 304 p.
- Morales, A. M. C. (2014). Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud-Haití. Tesis de Posgrado. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 82 p.
- Mueller, K. E., Eissenstat, D. M., Hobbie, S. E., Oleksyn, J., Jagodzinski, A. M., Reich, P. B., Chadwick, O. A. & Chorover, J. (2012). Tree species effects on coupled cycles of carbon, nitrogen, and acidity in mineral soils at a common garden experiment. *Biogeochemistry*, 111, 601–614.
- Munkholm, L. J., Heck, R. J. & Deen B. (2013). Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil & Tillage Research*, 127, 85-91.
- Nadal-Romero, E., Khorchani, M., Lasanta, T. & García-Cruz, J. M. (2019). Runoff and Solute Outputs under Different Land Uses: Long-Term Results from a Mediterranean Mountain Experimental Station. *Water*, 11, 976.
- Nájera, G. O., Bojórquez, S. J. I., Flores, V. F., Murray, N. R. M. y González, G. S. A. (2016). Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. *Cultivos Tropicales*, 37, 45-55.
- Ng, C. W. W., Leung, A. K. & Woon, K. X. (2014). Effects of soil density on grass-induced suction distributions in compacted soil subjected to rainfall. *NRC Research Press*, 51, 311-321.
- Norma Oficial Mexicana. (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre. México, D. F.
- Ortiz, S. C. A. (2010). Edafología. Octava Edición. Universidad Autónoma Chapingo. *Departamento de Suelos*. Chapingo, México. 322 p.
- Pandey, A., Himanshu S.K., Mishra, S.K. & Singh V.P. (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena*, 147, 595-620.
- Pando, M. M., Gutierrez, G. M., Maldonado, H. A., Palacio, P. J. L. y Estrada, C. E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas*, 51, 23-26.

- Parsons, A. J., Brazier, R. E., Wainwright, J. & Powell, D. M. (2006). Scale relationships in hillslope runoff and erosion. *Earth Surf. Process. Landforms*, 31, 1384-1393.
- Patle, G. T., Sikar, T. T., Rawat, K. S., & Singh, S. K. (2018). Estimation of infiltration rate from soil properties using regression model for cultivated land. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1-13.
- Peigné, J., Vian, J. F., Cannavacciuolo, M., Lefevre, V., Gautronneau, Y. & Boizard, H. (2013). Assessment of soil structure in the transition layer between topsoil and subsoil using the profil cultural method. *Soil & Tillage Research*, 127, 13-25.
- Pires, L.F., Borges, R. J. A., Rosa, J. A., Cooper, M., Heck, R. J., Passoni, S. & Roque, W. L. (2017). Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 165, 66-79.
- Prado, J.V., Rivera, P., Mojarro, B. y Martínez A. (2017). Calibración de los modelos de Pérdidas de suelo USLE y MUSLE en una cuenca forestal de México: Caso el Malacate. *Agrociencia*, 51, 265-284.
- Reza, V. A., Hasanzadeh, H. & Cerdà, A. (2016). Developing an erodibility triangle for soil textures in semi-arid regions, NW Iran. *Catena*, 142, 221-232.
- Rodriguez, J.A., Sepúlveda, I. C., Camargo, G. J. C. y Galvis, Q. H. J. H. (2009). Pérdidas de suelo y nutrientes bajo diferentes coberturas vegetales en la zona Andina de Colombia. *Acta Agronómica*, 58, 160-166.
- Rosas, P. G., Puentes, P. Y. J. y Menjivar, F. J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*, 18, 529-541.
- Royer, T. V. & David, M. B. (2005). Export of dissolved organic carbon from agricultural streams in Illinois, USA. *Aquatic Sciences*, 67, 465-471.
- Saghafian, B., Meghdadi, A. R., & Sima, S. (2014). Application of the WEPP model to determine sources of run-off and sediment in a forested watershed. *Hydrological Processes*, 29, 481-497.
- SEMARNAT. (2008). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2008. Compendio de Estadísticas Ambientales, México.
- Shan, L., He, Y., Chen, J., Huang, Q., Lian, X., & Hang, H. (2015). Nitrogen surface runoff losses from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin. *Agricultural Water Management*, 159, 255-263.

- Shen, Z. Y., Gong, Y. W., Li, Y. H., Hong, Q., Xu, L. & Liu, R.M. (2009). A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural Water Management*, 96, 1435-1442.
- Silva, G. J. T., Cruz, C. G., Ochoa, E. S., Estrada, G. F., Álvarez, B. D. y Nava, V. J. (2017). Pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del lago de Chapala, Michoacán, México. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, 7, 117-128.
- Soil Survey Staff. (2017). *Soil Science Division Staff*. United States Department of Agriculture. 603 p.
- Sosa-Rodrigues, B. A. y García-Vivas, Y. S. (2018). Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz fertilizado de forma orgánica y mineral. *Agronomía Mesoamericana*, 29, 1-13.
- Starkloff, T. & Stolte J. (2014). Applied comparison of the erosion risk models EROSION 3D and LISEM for a small catchment in Norway. *Catena*, 118, 154-167.
- Tan, K. H. (2003). *Humic Matter in Soil and the Environment. Principles and Controversies*. CRC Press, Boca Raton, FL. 386 p.
- Turk, J.K., Chadwick, O. A. & Graham, R. C. (2011). Pedogenic Processes. *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Tarbutck, J. y Lutgens, K. (2006). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Traducción al español Manuel Pozo Rodríguez y José Manuel González Casado. Ediciones Pearson Prentice Hall. Madrid, España. 686 p.
- United States Department of Agriculture (USDA). (2014). *Keys to Soil Taxonomy*. Twelfth Edition. Natural Resources Conservation Service. 360 p.
- Vadas, P. A. & Powell, J. M. (2013). Monitoring nutrient loss in runoff from dairy cattle lots. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 181, 127–133.
- Vanacker, V., Bellin, N., Molina, A., & Kubik, P. W. (2013). Erosion regulation as a function of human disturbances to vegetation cover: a conceptual model. *Landscape Ecology*, 29(2), 293–309.
- Vega, T. L. P. (2008). Evaluación de la erosión hídrica superficial por parcelas experimentales en suelos desnudos de la región de Coquimbo. Universidad de Talca, Chile. 126 p.

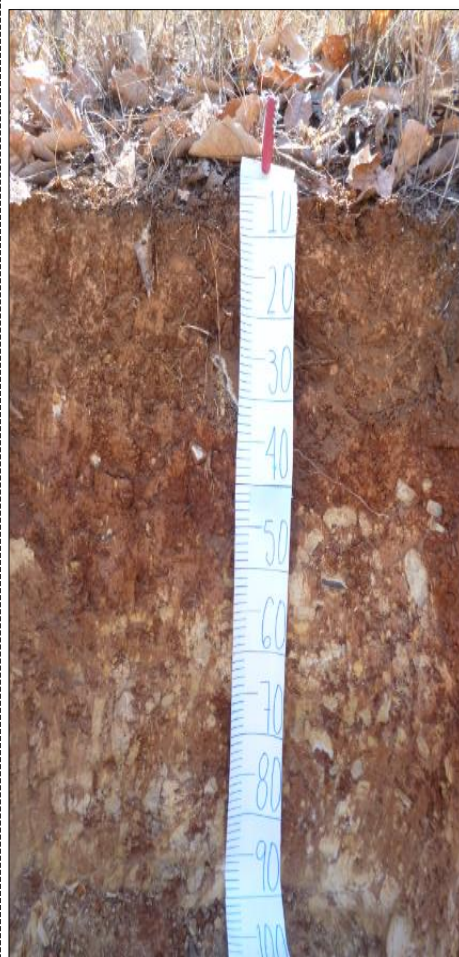


- Veum, K. S., Goyne, K. W., Motavalli, P. P., & Udawatta, R. P. (2009). Runoff and dissolved organic carbon loss from a paired-watershed study of three adjacent agricultural Watersheds. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 130, 115–122.
- Wagner, L. E. (2013). A history of Wind Erosion Prediction Models in the United States Department of Agriculture: The Wind Erosion Prediction System (WEPS). *Aeolian Research*, 10, 9–24.
- Wang, X. C., Li, J., Tahir, M. N., & Hao, M. D. (2011). Validation of the EPIC model using a long-term experimental data on the semi-arid Loess Plateau of China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 976–986.
- Walling, D.E. & Whelan, P.A. (2003). Using  $^{137}\text{Cs}$  measurements to validate the application of the AGNPS and ANSWERS erosion and sediment yield models in two small Devon catchments. *Soil and Tillage Research*, 69, 27-43.
- Webb, N. P., & Strong, C. L. (2011). Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models. *Aeolian Research*, 3(2), 165–179.
- Wheater, H.S., Jakeman, A.J. & Beven, K.J. (1993). Progress and directions in rainfall-runoff modelling. *Environmental Systems*, 101–132.
- WRB. (2014). *World reference base for soil resources*. 192 p.
- Wu, X. Y., Zhang, L. P., & Yu, X. X. (2012). Impacts of surface runoff and sediment on nitrogen and phosphorus loss in red soil region of southern China. *Environmental Earth Sciences*, 67, 1939–1949.
- Yasar Korkanc, S., & Dorum, G. (2019). The nutrient and carbon losses of soils from different land cover systems under simulated rainfall conditions. *Catena*, 172, 203–211.
- Yang, F., Zhang, G. L., Yang, J.L., Li, D. C., Zhao, Y. G., Liu, F., Yang, R. M. & Yang, F. (2014). Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 519, 3086-3093.
- Yang, L., Yang, G., Li, H., & Yuan, S. (2019). Effects of rainfall intensities on sediment loss and phosphorus enrichment ratio from typical land use type in Taihu Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 1-8.
- Yáñez, G. F., Hermoza, E. R. M. y Bazán, T. L. R. (2017). Caracterización de la infiltración de agua en tres sistemas de uso del suelo de la Comunidad Santiago de Carampona, Huarochirí, Lima. *Anales científicos*, 78, 191-199.

## X. ANEXOS

### 10.1 Resultados de la descripción de perfiles de suelo en campo

| <b>LOCALIDAD</b>                  |                         | Aguiles Serdán                            |                |                               |
|-----------------------------------|-------------------------|---|----------------|-------------------------------|
| <b>LOCALIZACIÓN</b>               |                         | X: 757628<br>Y: 2196487                   |                |                               |
| <b>VEGETACIÓN</b>                 |                         | Bosque de Encino                          |                |                               |
| <b>HORIZONTE</b>                  | <b>PROFUNDIDAD (cm)</b> | <b>COLOR</b>                              |                |                               |
|                                   |                         | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b>  |                               |
| Oi                                | 0-5                     | 10YR4/3                                   | 10YR3/3        |                               |
| A                                 | 5-22                    | 5YR4/6                                    | 2.5YR3/6       |                               |
| B                                 | 22-50                   | 10R4/8                                    | 10R3/6         |                               |
| C                                 | 50-90                   | 2.5YR4/8                                  | 10R4/8         |                               |
| <b>CLIMA</b>                      |                         | Templado subhúmedo, con lluvias en verano |                |                               |
| <b>MATERIAL PARENTAL</b>          |                         | Basalto                                   |                |                               |
| <b>FISIOGRAFÍA</b>                |                         | Eje Neovolcánico                          |                |                               |
| <b>TEXTURA</b>                    | <b>ESTRUCTURA</b>       | <b>CONSISTENCIA</b>                       |                |                               |
|                                   |                         | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b>  | <b>SATURADO</b>               |
| Arcilla                           | Granular                | Suelto                                    | Suelto         | No adherente                  |
| Arcilla                           | Bloques subangulares    | Ligeramente duro                          | Muy friable    | Adherente                     |
| Arcilla                           | Bloques angulares       | Muy duro                                  | Muy friable    | Muy adherente                 |
| Arcilla                           | Bloques angulares       | Muy duro                                  | Muy friable    | Muy adherente                 |
| <b>ALTITUD</b>                    |                         | 1878 m                                    |                | <b>FECHA</b><br>02-abril-2019 |
| <b>PENDIENTE</b>                  |                         | 14%                                       |                |                               |
| <b>DESCRITO POR</b>               |                         | Víctor Sánchez                            |                |                               |
| <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> | <b>HCl</b>              | <b>pH</b>                                 | <b>Humedad</b> | <b>Plasticidad</b>            |
| Fuerte                            | Nula                    | 6.7                                       | Seco           | No Plástico                   |
| Ligera                            | Nula                    | 6.8                                       | Seco           | Ligeramente plástico          |
| Baja                              | Nula                    | 6.5                                       | Seco           | Muy plástico                  |
| Baja                              | Nula                    | 6.5                                       | Seco           | Ligeramente plástico          |



Perfil 1. Bosque de Encino (BE)

| <b>LOCALIDAD</b>                  |                         | Aquiles Serdán                            |                |                               |
|-----------------------------------|-------------------------|---|----------------|-------------------------------|
| <b>LOCALIZACIÓN</b>               |                         | X: 756862<br>Y: 2197362                   |                |                               |
| <b>VEGETACIÓN</b>                 |                         | Pastizal Inducido                         |                |                               |
| <b>HORIZONTE</b>                  | <b>PROFUNDIDAD (cm)</b> | <b>COLOR</b>                              |                |                               |
|                                   |                         | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b>  |                               |
| Oi                                | 0-10                    | 5YR4/6                                    | 2.5YR3/6       |                               |
| A                                 | 10-30                   | 5YR4/6                                    | 2.5YR3/6       |                               |
| C                                 | 30-80                   | 2.5YR3/6                                  | 10R3/4         |                               |
| <b>CLIMA</b>                      |                         | Templado subhúmedo, con lluvias en verano |                |                               |
| <b>MATERIAL PARENTAL</b>          |                         | Basalto                                   |                |                               |
| <b>FISIOGRAFÍA</b>                |                         | Eje Neovolcánico                          |                |                               |
| <b>TEXTURA</b>                    | <b>ESTRUCTURA</b>       | <b>CONSISTENCIA</b>                       |                |                               |
|                                   |                         | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b>  | <b>SATURADO</b>               |
| Franco Arcillosa                  | Bloques subangulares    | Ligeramente duro                          | Suelto         | No adherente                  |
| Franco Arcillosa                  | Bloques subangulares    | Duro                                      | Muy friable    | Adherente                     |
| Arcilla                           | Bloques angulares       | Muy duro                                  | Muy friable    | Muy adherente                 |
| <b>ALTITUD</b>                    |                         | 1806 m                                    |                | <b>FECHA</b><br>02-abril-2019 |
| <b>PENDIENTE</b>                  |                         | 3%  |                |                               |
| <b>DESCRITO POR</b>               |                         | Víctor Sánchez                            |                |                               |
| <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> | <b>HCl</b>              | <b>pH</b>                                 | <b>Humedad</b> | <b>Plasticidad</b>            |
| Ligera                            | Nula                    | 7.0                                       | Seco           | Ligeramente plástico          |
| Baja                              | Nula                    | 6.8                                       | Seco           | Ligeramente plástico          |
| Baja                              | Nula                    | 6.7                                       | Seco           | Ligeramente plástico          |



Perfil 2. Pastizal Inducido (PI)

|                                   |                         |   |                |                               |
|-----------------------------------|-------------------------|---|----------------|-------------------------------|
| <b>LOCALIDAD</b>                  |                         | El Tecolote                               |                |                               |
| <b>LOCALIZACIÓN</b>               |                         | X: 754937<br>Y: 2196971                   |                |                               |
| <b>VEGETACIÓN</b>                 |                         | Bosque de Encino                          |                |                               |
| <b>HORIZONTE</b>                  | <b>PROFUNDIDAD (cm)</b> | <b>COLOR</b>                              |                |                               |
|                                   |                         | SECO                                      | HUMEDO         |                               |
| <b>CLIMA</b>                      |                         | Templado subhúmedo, con lluvias en verano |                |                               |
| <b>MATERIAL PARENTAL</b>          |                         | Basalto                                   |                |                               |
| <b>FISIOGRAFÍA</b>                |                         | Eje Neovolcánico                          |                |                               |
| <b>TEXTURA</b>                    | <b>ESTRUCTURA</b>       | <b>CONSISTENCIA</b>                       |                |                               |
|                                   |                         | SECO                                      | HUMEDO         | SATURADO                      |
| Arcilla                           | Granular                | Suelto                                    | Suelto         | Adherente                     |
| Arcilla                           | Bloques subangulares    | Duro                                      | Muy friable    | Muy adherente                 |
| Arcilla                           | Bloques angulares       | Muy duro                                  | Friable        | Muy adherente                 |
| <b>ALTITUD</b>                    |                         | 1893 m                                    |                | <b>FECHA</b><br>15-abril-2019 |
| <b>PENDIENTE</b>                  |                         | 10%                                       |                |                               |
| <b>DESCRITO POR</b>               |                         | Víctor Sánchez                            |                |                               |
| <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> | <b>HCl</b>              | <b>pH</b>                                 | <b>Humedad</b> | <b>Plasticidad</b>            |
| Ligera                            | Nula                    | 6.8                                       | Seco           | Ligeramente plástico          |
| Baja                              | Nula                    | 6.7                                       | Seco           | Muy plástico                  |
| Baja                              | Nula                    | 6.7                                       | Seco           | Muy plástico                  |



Perfil 3. Bosque de Encino (BE)

| <b>LOCALIDAD</b>    |                         | El Tecolote             |               |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|
| <b>LOCALIZACIÓN</b> |                         | X: 754959<br>Y: 2197182 |               |
| <b>VEGETACIÓN</b>   |                         | Pastizal Inducido       |               |
| <b>HORIZONTE</b>    | <b>PROFUNDIDAD (cm)</b> | <b>COLOR</b>            |               |
|                     |                         | <b>SECO</b>             | <b>HUMEDO</b> |
| Oi                  | 0-11                    | 7.5R3/4                 | 10R3/3        |
| A                   | 11-55                   | 2.5YR4/6                | 10R4/8        |
| C                   | 55-112                  | 7.5YR3/8                | 10R4/8        |

| <b>CLIMA</b>             |                      | Templado subhúmedo, con lluvias en verano |               |                 |
|--------------------------|----------------------|---|---------------|-----------------|
| <b>MATERIAL PARENTAL</b> |                      | Basalto                                   |               |                 |
| <b>FISIOGRAFÍA</b>       |                      | Eje Neovolcánico                          |               |                 |
| <b>TEXTURA</b>           | <b>ESTRUCTURA</b>    | <b>CONSISTENCIA</b>                       |               |                 |
|                          |                      | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b> | <b>SATURADO</b> |
| Franco Arcillosa         | Granular             | Suelto                                    | Suelto        | Adherente       |
| Arcilla                  | Bloques subangulares | Ligeramente duro                          | Muy friable   | Adherente       |
| Arcilla                  | Bloques angulares    | Duro                                      | Friable       | Adherente       |

| <b>ALTITUD</b>                    |            | 1861 m         |                | <b>FECHA</b><br>15-abril-2019 |
|-----------------------------------|------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| <b>PENDIENTE</b>                  |            | 7%             |                |                               |
| <b>DESCRITO POR</b>               |            | Víctor Sánchez |                |                               |
| <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> | <b>HCl</b> | <b>pH</b>      | <b>Humedad</b> | <b>Plasticidad</b>            |
| Fuerte                            | Nula       | 6.9            | Seco           | Ligeramente plástico          |
| Baja                              | Nula       | 6.9            | Seco           | Muy plástico                  |
| Baja                              | Nula       | 6.8            | Seco           | Muy plástico                  |



Perfil 4. Pastizal Inducido (PI)

| <b>LOCALIDAD</b>                  |                         | Los Granados                              |                |                               |
|-----------------------------------|-------------------------|---|----------------|-------------------------------|
| <b>LOCALIZACIÓN</b>               |                         | X: 756312<br>Y: 2202807                   |                |                               |
| <b>VEGETACIÓN</b>                 |                         | Matorral Subtropical                      |                |                               |
| <b>HORIZONTE</b>                  | <b>PROFUNDIDAD (cm)</b> | <b>COLOR</b>                              |                |                               |
|                                   |                         | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b>  |                               |
| A                                 | 0-17                    | 7.5YR3/2                                  | 5YR3/2         |                               |
| C                                 | 17-45                   | 10R3/2                                    | 10R3/2         |                               |
| <b>CLIMA</b>                      |                         | Templado subhúmedo, con lluvias en verano |                |                               |
| <b>MATERIAL PARENTAL</b>          |                         | Basalto                                   |                |                               |
| <b>FISIOGRAFÍA</b>                |                         | Eje Neovolcánico                          |                |                               |
| <b>TEXTURA</b>                    | <b>ESTRUCTURA</b>       | <b>CONSISTENCIA</b>                       |                |                               |
|                                   |                         | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b>  | <b>SATURADO</b>               |
| Arcilla                           | Bloques angulares       | Muy duro                                  | Friable        | Adherente                     |
| Arcilla                           | Bloques angulares       | Muy duro                                  | Firme          | Muy adherente                 |
| <b>ALTITUD</b>                    |                         | 1885 m                                    |                | <b>FECHA</b><br>15-abril-2019 |
| <b>PENDIENTE</b>                  |                         | 5%  |                |                               |
| <b>DESCRITO POR</b>               |                         | Víctor Sánchez                            |                |                               |
| <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> | <b>HCl</b>              | <b>pH</b>                                 | <b>Humedad</b> | <b>Plasticidad</b>            |
| Ligera                            | Nula                    | 7.1                                       | Seco           | Muy plástico                  |
| Baja                              | Nula                    | 7.0                                       | Seco           | Muy plástico                  |



Perfil 5. Matorral Subtropical (MS)

|                                   |                         |   |                |                               |
|-----------------------------------|-------------------------|---|----------------|-------------------------------|
| <b>LOCALIDAD</b>                  |                         | Rincón del Chino                          |                |                               |
| <b>LOCALIZACIÓN</b>               |                         | X: 752979<br>Y: 2200252                   |                |                               |
| <b>VEGETACIÓN</b>                 |                         | Agricultura de Temporal<br>(maíz)         |                |                               |
| <b>HORIZONTE</b>                  | <b>PROFUNDIDAD (cm)</b> | <b>COLOR</b>                              |                |                               |
|                                   |                         | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b>  |                               |
| Ap                                | 0-20                    | 2.5YR4/1                                  | 7.5R2.5/1      |                               |
| AC                                | 20-88                   | 7.5R2.5/1                                 | 10R2.5/1       |                               |
| <b>CLIMA</b>                      |                         | Templado subhúmedo, con lluvias en verano |                |                               |
| <b>MATERIAL PARENTAL</b>          |                         | Basalto                                   |                |                               |
| <b>FISIOGRAFÍA</b>                |                         | Eje Neovolcánico                          |                |                               |
| <b>TEXTURA</b>                    | <b>ESTRUCTURA</b>       | <b>CONSISTENCIA</b>                       |                |                               |
|                                   |                         | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b>  | <b>SATURADO</b>               |
| Arcilla                           | Bloques angulares       | Muy duro                                  | Muy firme      | Muy adherente                 |
| Arcilla                           | Bloques angulares       | Muy duro                                  | Firme          | Muy adherente                 |
| <b>ALTITUD</b>                    |                         | 1778 m                                    |                | <b>FECHA</b><br>16-abril-2019 |
| <b>PENDIENTE</b>                  |                         | <1%                                       |                |                               |
| <b>DESCRITO POR</b>               |                         | Víctor Sánchez                            |                |                               |
| <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> | <b>HCl</b>              | <b>pH</b>                                 | <b>Humedad</b> | <b>Plasticidad</b>            |
| Fuerte                            | Nula                    | 7.2                                       | Seco           | Muy plástico                  |
| Ligera                            | Nula                    | 7.0                                       | Poca           | Muy plástico                  |



Perfil 6. Agricultura de Temporal (AT)

| <b>LOCALIDAD</b>    |                         | Los Granados                      |               |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|
| <b>LOCALIZACIÓN</b> |                         | X: 755030<br>Y: 2203379           |               |
| <b>VEGETACIÓN</b>   |                         | Agricultura de Temporal<br>(maíz) |               |
| <b>HORIZONTE</b>    | <b>PROFUNDIDAD (cm)</b> | <b>COLOR</b>                      |               |
|                     |                         | <b>SECO</b>                       | <b>HUMEDO</b> |
| Ap                  | 0-33                    | 7.5YR3/2                          | 5YR3/2        |
| C                   | 33-52                   | 10R3/3                            | 5YR3/2        |

| <b>CLIMA</b>             |                   | Templado subhúmedo, con lluvias en verano |               |                 |
|--------------------------|-------------------|---|---------------|-----------------|
| <b>MATERIAL PARENTAL</b> |                   | Basalto                                   |               |                 |
| <b>FISIOGRAFÍA</b>       |                   | Eje Neovolcánico                          |               |                 |
| <b>TEXTURA</b>           | <b>ESTRUCTURA</b> | <b>CONSISTENCIA</b>                       |               |                 |
|                          |                   | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b> | <b>SATURADO</b> |
| Franco Arcillosa         | Granular          | Suelto                                    | Friable       | Adherente       |
| Arcilla                  | Bloques angulares | Suave                                     | Friable       | Adherente       |

| <b>ALTITUD</b>                    |            | 1765 m         |                | <b>FECHA</b><br>16-abril-2019 |
|-----------------------------------|------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| <b>PENDIENTE</b>                  |            | 3 %            |                |                               |
| <b>DESCRITO POR</b>               |            | Víctor Sánchez |                |                               |
| <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> | <b>HCl</b> | <b>pH</b>      | <b>Humedad</b> | <b>Plasticidad</b>            |
| Fuerte                            | Nula       | 6.9            | Seco           | Plástico                      |
| Ligera                            | Nula       | 6.8            | Seco           | Plástico                      |



Perfil 7. Agricultura de Temporal (AT)



| <b>LOCALIDAD</b>    |                         | Las Estacas             |               |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|
| <b>LOCALIZACIÓN</b> |                         | X: 756974<br>Y: 2204348 |               |
| <b>VEGETACIÓN</b>   |                         | Matorral Subtropical    |               |
| <b>HORIZONTE</b>    | <b>PROFUNDIDAD (cm)</b> | <b>COLOR</b>            |               |
|                     |                         | <b>SECO</b>             | <b>HUMEDO</b> |
| A                   | 0-15                    | 5YR3/1                  | 10YR2/1       |
| C                   | 15-55                   | 2.5YR3/1                | 10R3/1        |

| <b>CLIMA</b>             |                      | Templado subhúmedo, con lluvias en verano |               |                 |
|--------------------------|----------------------|---|---------------|-----------------|
| <b>MATERIAL PARENTAL</b> |                      | Basalto                                   |               |                 |
| <b>FISIOGRAFÍA</b>       |                      | Eje Neovolcánico                          |               |                 |
| <b>TEXTURA</b>           | <b>ESTRUCTURA</b>    | <b>CONSISTENCIA</b>                       |               |                 |
|                          |                      | <b>SECO</b>                               | <b>HUMEDO</b> | <b>SATURADO</b> |
| Arcilla                  | Bloques subangulares | Duro                                      | Muy firme     | Muy adherente   |
| Arcilla                  | Bloques angulares    | Muy duro                                  | Muy firme     | Muy adherente   |

| <b>ALTITUD</b>                    |            | 1737 m         |                | <b>FECHA</b><br>16-abril-2019 |
|-----------------------------------|------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| <b>PENDIENTE</b>                  |            | <1%            |                |                               |
| <b>DESCRITO POR</b>               |            | Víctor Sánchez |                |                               |
| <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> | <b>HCl</b> | <b>pH</b>      | <b>Humedad</b> | <b>Plasticidad</b>            |
| Ligera                            | Nula       | 7.0            | Seco           | Plástico                      |
| Ligera                            | Nula       | 6.9            | Seco           | Plástico                      |



Perfil 8. Matorral Subtropical (MS)

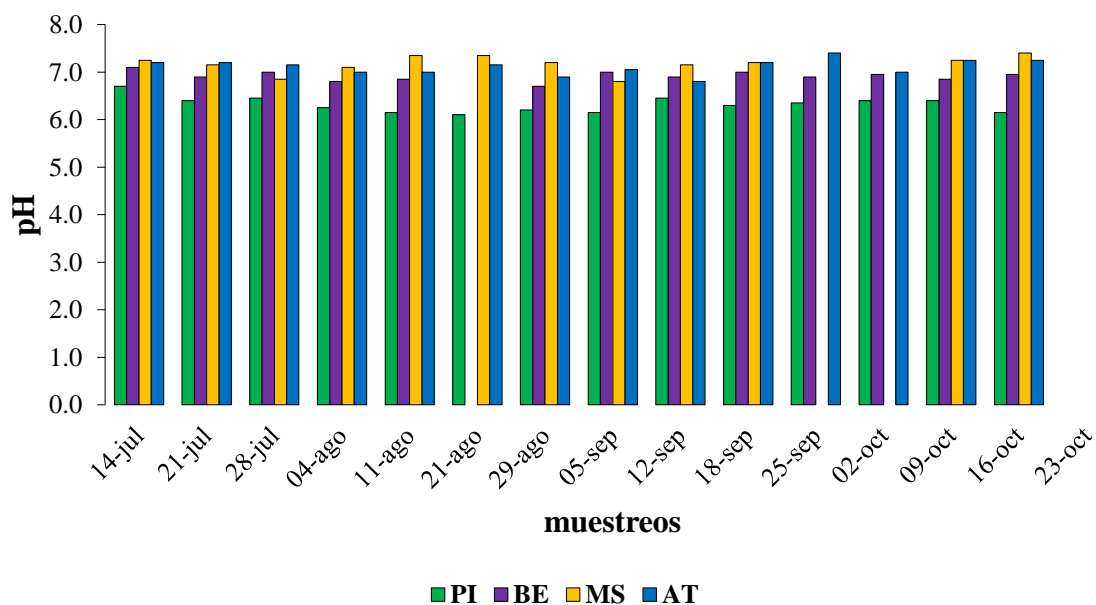
## 10.2 Resultados sedimentos pH

| Sitio | 14/07/2018 | 21/07/2018 | 28/07/2018 | 04/08/2018 | 11/08/2018 | 21/08/2018 | 29/08/2018 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PI1   | 6.6        | 6.3        | 6.3        | 6.2        | 6.0        | 6.0        | 6.1        |
| PI2   | 6.8        | 6.5        | 6.6        | 6.3        | 6.3        | 6.2        | 6.3        |
| BE1   | 7.2        | 7.0        | 7.3        | 6.9        | 6.8        | SS         | 6.8        |
| BE2   | 7.0        | 6.8        | 6.7        | 6.7        | 6.9        | SS         | 6.6        |
| MS1   | 7.4        | 7.1        | 6.9        | 7.3        | 7.6        | 7.3        | SS         |
| MS2   | 7.1        | 7.2        | 6.8        | 6.9        | 7.1        | 7.4        | 7.2        |
| AT1   | 7.6        | 7.4        | 7.3        | 7.2        | 7.1        | 7.2        | 7.0        |
| AT2   | 6.8        | 7.0        | 7.0        | 6.8        | 6.9        | 7.1        | 6.8        |

| Sitio | 05/09/2018 | 12/09/2018 | 18/09/2018 | 25/09/2018 | 02/10/2018 | 09/10/2018 | 16/10/2018 | 23/10/2018 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PI1   | 6.2        | 6.4        | 6.3        | 6.1        | 6.2        | 6.5        | 6.2        | SS         |
| PI2   | 6.1        | 6.5        | SS         | 6.6        | 6.6        | 6.3        | 6.1        | SS         |
| BE1   | SS         | 6.9        | 7.0        | 7.0        | 6.8        | 6.7        | 6.7        | SS         |
| BE2   | 7.0        | SS         | SS         | 6.8        | 7.1        | 7.0        | 7.2        | SS         |
| MS1   | 6.8        | 7.3        | 7.2        | SS         | SS         | 7.3        | SS         | SS         |
| MS2   | SS         | 7.0        | SS         | SS         | SS         | 7.2        | 7.4        | SS         |
| AT1   | 7.2        | SS         | 7.2        | 7.4        | SS         | 7.3        | 7.5        | SS         |
| AT2   | 6.9        | 6.8        | SS         | SS         | 7.0        | 7.2        | 7.0        | SS         |

SS= Sin sedimento

### pH de sedimentos en los usos del suelo y vegetación

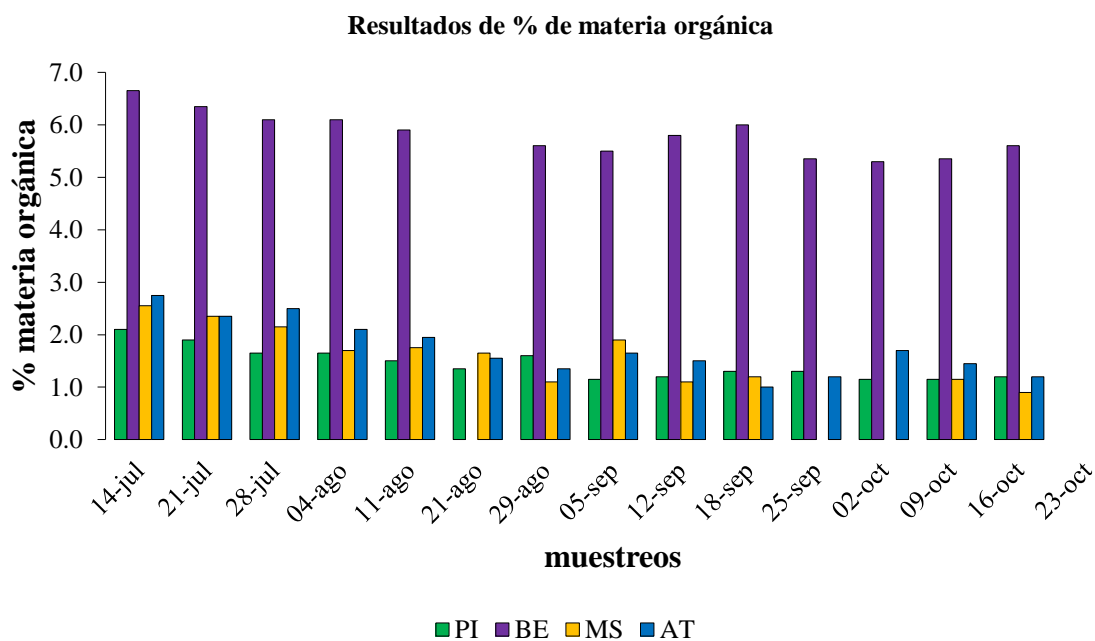


### 10.3 Resultados sedimentos materia orgánica

| % materia orgánica |            |            |            |            |            |            |            |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Sitio              | 14/07/2018 | 21/07/2018 | 28/07/2018 | 04/08/2018 | 11/08/2018 | 21/08/2018 | 29/08/2018 |
| PI1                | 1.7        | 1.6        | 1.3        | 1.3        | 1.1        | 0.9        | 0.9        |
| PI2                | 2.5        | 2.2        | 2.0        | 2.0        | 1.9        | 1.8        | 2.3        |
| BE1                | 6.5        | 6.3        | 6.3        | 6.0        | 5.8        | SS         | 5.5        |
| BE2                | 6.8        | 6.4        | 5.9        | 6.2        | 6.0        | SS         | 5.7        |
| MS1                | 3.3        | 2.9        | 2.7        | 2.1        | 2.4        | 1.8        | SS         |
| MS2                | 1.8        | 1.8        | 1.6        | 1.3        | 1.1        | 1.5        | 1.1        |
| AT1                | 2.9        | 2.4        | 2.6        | 2.2        | 1.8        | 1.4        | 1.3        |
| AT2                | 2.6        | 2.3        | 2.4        | 2.0        | 2.1        | 1.7        | 1.4        |

| Sitio | 05/09/2018 | 12/09/2018 | 18/09/2018 | 25/09/2018 | 02/10/2018 | 09/10/2018 | 16/10/2018 | 23/10/2018 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PI1   | 0.7        | 1.0        | 1.3        | 1.3        | 1.0        | 1.1        | 1.1        | SS         |
| PI2   | 1.6        | 1.4        | SS         | 1.3        | 1.3        | 1.2        | 1.3        | SS         |
| BE1   | SS         | 5.8        | 6.0        | 5.6        | 5.2        | 5.7        | 6.0        | SS         |
| BE2   | 5.5        | SS         | SS         | 5.1        | 5.4        | 5.0        | 5.2        | SS         |
| MS1   | 1.9        | 1.5        | 1.2        | SS         | SS         | 1.4        | SS         | SS         |
| MS2   | SS         | 0.7        | SS         | SS         | SS         | 0.9        | 0.9        | SS         |
| AT1   | 1.4        | SS         | 1.0        | 1.2        | SS         | 1.5        | 1.3        | SS         |
| AT2   | 1.9        | 1.5        | SS         | SS         | 1.7        | 1.4        | 1.1        | SS         |

SS= Sin sedimento

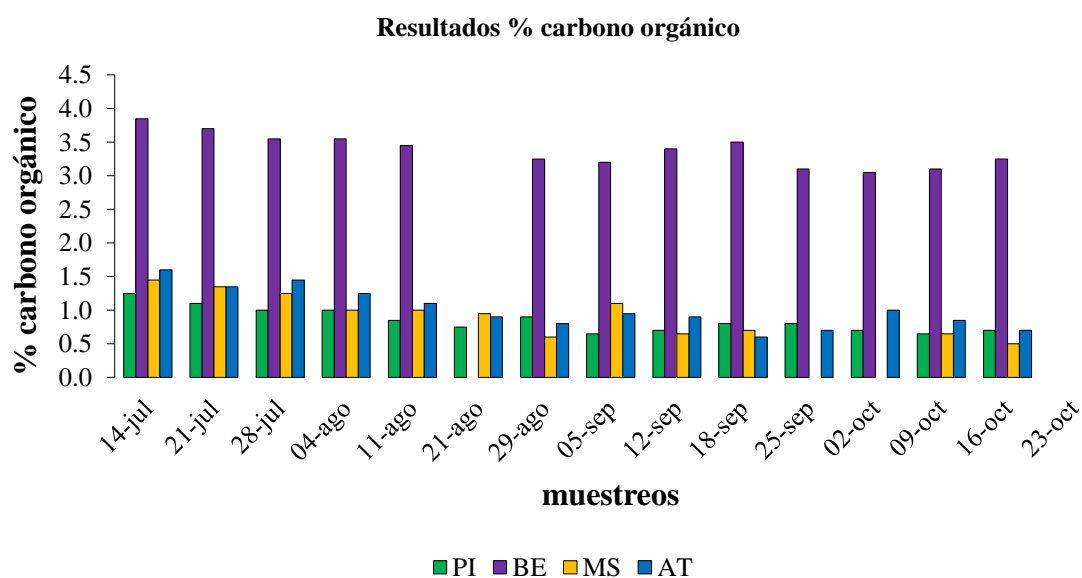


## 10.4 Resultados sedimentos carbono orgánico

| % carbono orgánico |            |            |            |            |            |            |            |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Sitio              | 14/07/2018 | 21/07/2018 | 28/07/2018 | 04/08/2018 | 11/08/2018 | 21/08/2018 | 29/08/2018 |
| PI1                | 1.0        | 0.9        | 0.8        | 0.8        | 0.6        | 0.5        | 0.5        |
| PI2                | 1.5        | 1.3        | 1.2        | 1.2        | 1.1        | 1.0        | 1.3        |
| BE1                | 3.8        | 3.7        | 3.7        | 3.5        | 3.4        | SS         | 3.2        |
| BE2                | 3.9        | 3.7        | 3.4        | 3.6        | 3.5        | SS         | 3.3        |
| MS1                | 1.9        | 1.7        | 1.6        | 1.2        | 1.4        | 1.0        | SS         |
| MS2                | 1.0        | 1.0        | 0.9        | 0.8        | 0.6        | 0.9        | 0.6        |
| AT1                | 1.7        | 1.4        | 1.5        | 1.3        | 1.0        | 0.8        | 0.8        |
| AT2                | 1.5        | 1.3        | 1.4        | 1.2        | 1.2        | 1.0        | 0.8        |

| Sitio | 05/09/2018 | 12/09/2018 | 18/09/2018 | 25/09/2018 | 02/10/2018 | 09/10/2018 | 16/10/2018 | 23/10/2018 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PI1   | 0.4        | 0.6        | 0.8        | 0.8        | 0.6        | 0.6        | 0.6        | SS         |
| PI2   | 0.9        | 0.8        | SS         | 0.8        | 0.8        | 0.7        | 0.8        | SS         |
| BE1   | SS         | 3.4        | 3.5        | 3.2        | 3.0        | 3.3        | 3.5        | SS         |
| BE2   | 3.2        | SS         | SS         | 3.0        | 3.1        | 2.9        | 3.0        | SS         |
| MS1   | 1.1        | 0.9        | 0.7        | SS         | SS         | 0.8        | SS         | SS         |
| MS2   | SS         | 0.4        | SS         | SS         | SS         | 0.5        | 0.5        | SS         |
| AT1   | 0.8        | SS         | 0.6        | 0.7        | SS         | 0.9        | 0.8        | SS         |
| AT2   | 1.1        | 0.9        | SS         | SS         | 1.0        | 0.8        | 0.6        | SS         |

SS= Sin sedimento

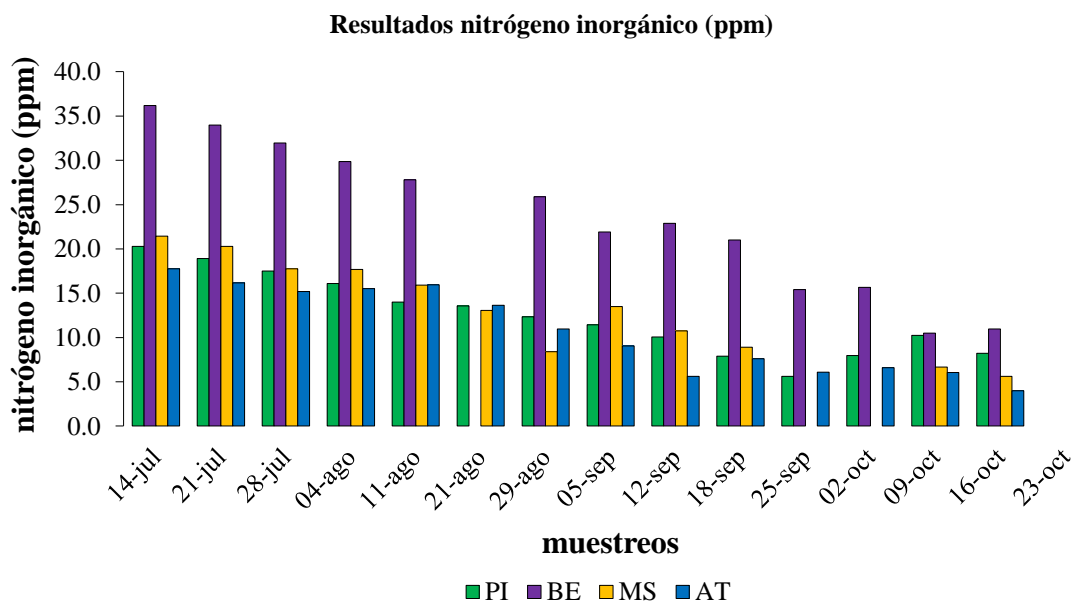


## 10.5 Resultados sedimentos nitrógeno inorgánico

| nitrógeno inorgánico (ppm) |            |            |            |            |            |            |            |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Sitio                      | 14/07/2018 | 21/07/2018 | 28/07/2018 | 04/08/2018 | 11/08/2018 | 21/08/2018 | 29/08/2018 |
| PI1                        | 19.6       | 18.7       | 17.3       | 15.9       | 13.5       | 14.0       | 12.6       |
| PI2                        | 21.0       | 19.1       | 17.7       | 16.3       | 14.5       | 13.1       | 12.1       |
| BE1                        | 34.1       | 32.7       | 31.7       | 30.3       | 28.5       | SS         | 25.2       |
| BE2                        | 38.3       | 35.3       | 32.2       | 29.4       | 27.1       | SS         | 26.6       |
| MS1                        | 23.8       | 22.9       | 19.6       | 20.5       | 18.7       | 15.4       | SS         |
| MS2                        | 19.1       | 17.7       | 15.9       | 14.9       | 13.1       | 10.7       | 8.4        |
| AT1                        | 17.3       | 15.9       | 13.5       | 15.2       | 16.9       | 12.6       | 10.7       |
| AT2                        | 18.2       | 16.4       | 16.9       | 15.8       | 15.0       | 14.7       | 11.2       |

| Sitio | 05/09/2018 | 12/09/2018 | 18/09/2018 | 25/09/2018 | 02/10/2018 | 09/10/2018 | 16/10/2018 | 23/10/2018 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PI1   | 11.2       | 9.8        | 7.9        | 4.7        | 8.4        | 10.7       | 7.5        | SS         |
| PI2   | 11.7       | 10.3       | SS         | 6.5        | 7.5        | 9.8        | 8.9        | SS         |
| BE1   | SS         | 22.9       | 21.0       | 19.1       | 17.3       | 14.0       | 12.1       | SS         |
| BE2   | 21.9       | SS         | SS         | 11.7       | 14.0       | 7.0        | 9.8        | SS         |
| MS1   | 13.5       | 10.3       | 8.9        | SS         | SS         | 5.6        | SS         | SS         |
| MS2   | SS         | 11.2       | SS         | SS         | SS         | 7.7        | 5.6        | SS         |
| AT1   | 10.2       | SS         | 7.6        | 6.1        | SS         | 4.2        | 3.8        | SS         |
| AT2   | 7.9        | 5.6        | SS         | SS         | 6.6        | 7.9        | 4.2        | SS         |

SS= Sin sedimento



## 10.6 Resultados de estimación de la erosión hídrica

Periodo 2005-2018

| Variables  | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC  |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Pp (mm)    | 21.3  | 7.1   | 5.9   | 9.2   | 35.4  | 178.5 | 226   | 212.2 | 151.8 | 68.9  | 17.8  | 11.4 |
| Tmax. (°C) | 17.9  | 19.2  | 21.6  | 23.6  | 24.2  | 21.5  | 19.1  | 19.3  | 19.3  | 19.8  | 19.5  | 17.7 |
| Tmed. (°C) | 8.5   | 9.6   | 11.8  | 13.7  | 15.1  | 14.4  | 13.0  | 13.0  | 13.0  | 12.2  | 10.6  | 8.9  |
| Tmín. (°C) | -0.8  | 0     | 2.0   | 3.9   | 5.9   | 7.4   | 6.9   | 6.7   | 6.6   | 4.6   | 1.7   | 0    |
| Evap. (mm) | 106.3 | 130.6 | 190.2 | 205.1 | 194.4 | 143.0 | 111.4 | 110.0 | 103.4 | 111.5 | 102.9 | 92.6 |

| Perfil | Horizonte | Prof. (cm) | M.O (%) | % Arena | % Limo | % Arcilla |
|--------|-----------|------------|---------|---------|--------|-----------|
| 1      | Oi        | 0-5        | 4.8     | 25.68   | 26.12  | 48.20     |
|        | A         | 5-22       | 2.7     | 23.30   | 32.45  | 44.25     |
|        | B         | 22-50      | 2.2     | 31.07   | 25.25  | 43.68     |
|        | C         | 50-90      | 1.5     | 21.68   | 24.10  | 54.22     |
| 2      | Oi        | 0-10       | 3.4     | 39.88   | 29.80  | 30.32     |
|        | A         | 10-30      | 1.9     | 39.68   | 24.12  | 36.20     |
|        | C         | 30-80      | 1.3     | 17.65   | 22.24  | 60.11     |
| 3      | Oi        | 0-12       | 3.9     | 25.28   | 26.30  | 48.42     |
|        | A         | 12-55      | 3.1     | 24.14   | 31.14  | 44.72     |
|        | C         | 55-100     | 2.6     | 32.93   | 25.39  | 41.68     |
| 4      | Oi        | 0-11       | 3.2     | 41.32   | 24.91  | 33.77     |
|        | A         | 11-55      | 2.3     | 35.68   | 18.17  | 46.15     |
|        | C         | 55-112     | 2.0     | 32.78   | 15.38  | 51.84     |
| 5      | A         | 0-17       | 1.9     | 32.78   | 23.14  | 44.08     |
|        | C         | 17-45      | 1.3     | 31.38   | 26.77  | 41.85     |
| 6      | Ap        | 0-20       | 2.2     | 17.81   | 27.53  | 54.66     |
|        | AC        | 20-88      | 2.0     | 30.87   | 20.18  | 48.95     |
| 7      | Ap        | 0-33       | 1.7     | 38.76   | 29.92  | 31.32     |
|        | C         | 33-52      | 1.5     | 36.27   | 21.11  | 42.62     |
| 8      | A         | 0-15       | 1.3     | 31.52   | 18.36  | 50.12     |
|        | C         | 15-55      | 0.9     | 23.09   | 21.42  | 55.49     |

| Mes        | Sedimento (kg*ha <sup>-1</sup> ) |            | Escorrimiento (L*ha <sup>-1</sup> ) |            |
|------------|----------------------------------|------------|-------------------------------------|------------|
|            | Cuantificación                   | Estimación | Cuantificación                      | Estimación |
| julio      | 914.86                           | 2164.35    | 23460.28                            | 76239.85   |
| agosto     | 3326.00                          | 5507.07    | 93623.42                            | 149302.9   |
| septiembre | 3306.48                          | 6348.68    | 130590.00                           | 160651.75  |
| octubre    | 2216.22                          | 4102.90    | 152865.71                           | 137000.73  |
| Anual      | 9763.56                          | 18123.00   | 400539.41                           | 523195.23  |

| Hillslopes |            | Sedimento (kg*ha <sup>-1</sup> ) |        |        |        | Escorrimiento (L*ha <sup>-1</sup> ) |          |          |          |
|------------|------------|----------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| WEPP       | Fecha      | PI                               | BE     | MS     | AT     | PI                                  | BE       | MS       | AT       |
| 1          | (14/07/18) | 172.87                           | 95.13  | 191.45 | 222.45 | 8349.67                             | 6133.12  | 4412.42  | 1062.46  |
| 2          | (21/07/18) | 202.43                           | 79.58  | 97.67  | 287.56 | 10856.10                            | 7456.22  | 4966.14  | 2653.27  |
| 3          | (28/07/18) | 245.78                           | 67.47  | 157.06 | 344.90 | 11421.71                            | 8604.78  | 6796.85  | 3527.11  |
| 4          | (04/08/18) | 223.67                           | 114.02 | 103.55 | 377.33 | 11893.58                            | 7080.22  | 2954.44  | 2987.36  |
| 5          | (11/08/18) | 617.22                           | 323.55 | 240.22 | 444.59 | 14954.42                            | 12114.95 | 5105.33  | 7842.19  |
| 6          | (21/08/18) | 707.77                           | 59.23  | 145.66 | 392.83 | 18642.29                            | 10542.38 | 6219.52  | 9630.04  |
| 7          | (29/08/18) | 965.49                           | 89.79  | 298.77 | 403.38 | 19653.46                            | 7339.55  | 2309.79  | 10033.38 |
| 8          | (05/09/18) | 548.66                           | 105.14 | 333.14 | 319.88 | 18085.77                            | 6395.74  | 7696.23  | 9926.59  |
| 9          | (12/09/18) | 460.85                           | 72.19  | 970.54 | 481.56 | 16223.94                            | 5190.82  | 13199.92 | 8339.84  |
| 10         | (18/09/18) | 633.69                           | 104.58 | 456.99 | 190.40 | 17470.90                            | 6994.18  | 1520.21  | 8952.18  |
| 11         | (25/09/18) | 751.56                           | 493.80 | 311.40 | 114.30 | 18226.56                            | 11564.29 | 2257.59  | 8606.99  |
| 12         | (02/10/18) | 187.60                           | 92.12  | 123.60 | 177.35 | 17532.54                            | 10863.78 | 4267.55  | 9750.55  |
| 13         | (09/10/18) | 488.56                           | 167.58 | 114.77 | 388.14 | 10059.75                            | 9627.38  | 5932.19  | 12697.77 |
| 14         | (16/10/18) | 918.24                           | 224.36 | 155.94 | 477.43 | 10489.14                            | 13932.56 | 10188.78 | 12814.61 |
| 15         | (23/10/18) | 277.61                           | 136.46 | 77.24  | 95.90  | 3214.83                             | 1996.14  | 1518.33  | 2114.83  |

