



*“Por un Desarrollo
Agrario
Integral y Sostenible”*

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

Trabajo de Tesis

Erodabilidad en suelos Andisoles,
Mollisoles y Vertisoles de la región del
Pacífico de Nicaragua, 2021 – 2022

Autora

Br. Maykeling Lisbeth Treminio Corea

Asesores

MSc. Reynaldo B. Mendoza Corrales

MSc. Miguel A. Garmendia Zapata

Managua, Nicaragua

Septiembre, 2022



*“Por un Desarrollo
Agrario
Integral y Sostenible”*

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

Trabajo de Tesis

Erodabilidad en suelos Andisoles,
Mollisoles y Vertisoles de la región del
Pacífico de Nicaragua, 2021 – 2022

Autora

Br. Maykeling Lisbeth Treminio Corea

Asesores

MSc. Reynaldo B. Mendoza Corrales

MSc. Miguel A. Garmendia Zapata

Presentado a la consideración del honorable Comité
Evaluador como requisito final para optar al grado de
Ingeniera Agrícola

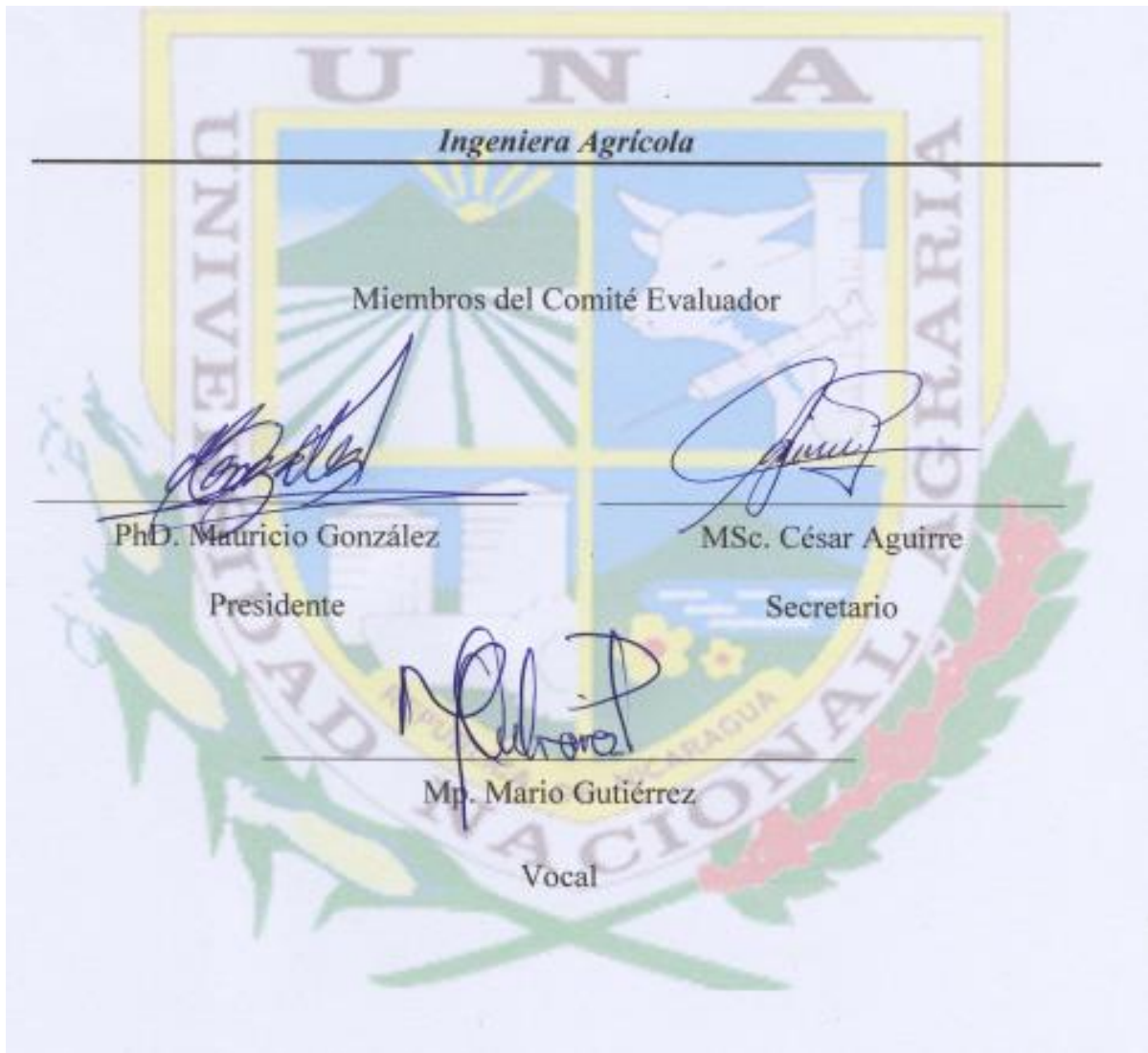
Managua, Nicaragua

Septiembre, 2022



Hoja de aprobación del Comité Evaluador

Este trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable Comité Evaluador designado por el Decanato de la Facultad de Agronomía como requisito parcial para optar al título profesional de:



Lugar y Fecha: Sala magna FAGRO, 26 de septiembre de 2022

DEDICATORIA

A Dios por concederme la sabiduría y la ciencia a través del Espíritu Santo, para culminar mis estudios universitarios.

A mis padres Sr. Juan Ramón Treminio y Sra. Yamilet del Carmen Corea, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por confiar en mis capacidades y enseñarme a ser perseverante.

A mi hermana Marisleysis Guadalupe Treminio Corea, por su cariño y ser un motivo de superación en mi vida.

A mí, por el empeño y la dedicación a lo largo de mi carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su bondad y misericordia.

A mis asesores MSc. Reynaldo Bismarck Mendoza y MSc. Miguel Garmendia Zapata, por confiar en mí durante el desarrollo de la investigación y compartirme los conocimientos teórico – práctico necesarios.

A PhD. Mauricio Alexander González por su apoyo incondicional en el transcurso de la carrera y por confiar en mis capacidades como su Alumna Ayudante.

A la Ing. Katerin Herrera Talavera, Ing. Wilmer Rodríguez e Ing. Luis Tercero, por sus aportes en la investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| SECCIÓN | PÁGINA |
|---|--------|
| DEDICATORIA | i |
| AGRADECIMIENTOS | ii |
| ÍNDICE DE CUADROS | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vi |
| ÍNDICE DE ANEXOS | vii |
| RESUMEN | ix |
| ABSTRACT | x |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1. Objetivo general | 3 |
| 2.2. Objetivos específicos | 3 |
| III. MARCO DE REFERENCIA | 4 |
| 3.1. La erosión hídrica y su modelo de predicción | 4 |
| 3.2. Erodabilidad del suelo | 5 |
| 3.3. Propiedades del suelo relacionadas con la erodabilidad | 7 |
| 3.3.1. Textura | 7 |
| 3.3.2. Materia orgánica | 8 |
| 3.3.3. Estructura | 8 |
| 3.3.4. Estabilidad estructural de los agregados | 9 |
| 3.3.5. Permeabilidad | 9 |
| 3.4. Suelos en estudio del Pacífico de Nicaragua, Taxonomía de suelos | 10 |
| 3.4.1. Órdenes de suelo | 10 |
| 3.4.2. Grandes grupos de suelo | 10 |
| IV. MATERIALES Y MÉTODOS | 12 |
| 4.1. Ubicación del estudio | 12 |
| 4.2. Condiciones edafoclimáticas | 14 |
| 4.2.1. Suelo | 14 |
| 4.2.2. Clima | 14 |
| 4.3. Diseño metodológico | 14 |

| | | |
|--------------|---|----|
| 4.4. | Recolección de datos | 15 |
| 4.5. | VARIABLES EVALUADAS | 15 |
| 4.5.1. | Textura | 15 |
| 4.5.2. | Materia orgánica | 15 |
| 4.5.3. | Estructura | 16 |
| 4.5.4. | Permeabilidad superficial | 16 |
| 4.5.5. | Estabilidad estructural de los agregados | 17 |
| 4.6. | Análisis de datos | 18 |
| V. | RESULTADOS Y DISCUSIONES | 21 |
| 5.1. | Propiedades biofísicas del suelo que influyen en la erodabilidad | 21 |
| 5.2. | Valores estimados de erodabilidad (K) | 25 |
| 5.3. | Comportamiento de la erodabilidad de los suelos | 26 |
| 5.4. | Incidencia de las propiedades biofísicas en la erodabilidad del suelo | 28 |
| 5.5. | Propuesta del modelo de erodabilidad para suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles del Pacífico de Nicaragua | 31 |
| 5.6. | Validación del modelo de Regresión Lineal Múltiple propuesto | 36 |
| VI. | CONCLUSIONES | 38 |
| VII. | RECOMENDACIONES | 39 |
| VIII. | LITERATURA CITADA | 40 |
| IX. | ANEXOS | 44 |

ÍNDICE DE CUADROS

| CUADRO | | PÁGINA |
|---------------|---|---------------|
| 1 | Clasificación de las fracciones del suelo según el departamento de agricultura de los Estados Unidos (Cairo y Fundora, 1994, p. 155) | 8 |
| 2 | Ubicación de los tres órdenes de suelo estudiados | 12 |
| 3 | Códigos de estructuras superficiales (Gisbert et al., 2012) | 16 |
| 4 | Clases de permeabilidad (I) (Gisbert et al., 2012) | 17 |
| 5 | Resultados de materia orgánica, estructura y permeabilidad superficial, Región del Pacífico de Nicaragua, 2021 – 2022 | 21 |
| 6 | Resultados del análisis granulométrico de suelo, Región del Pacífico de Nicaragua, LABSA - UNA, 2021 – 2022 | 23 |
| 7 | Erodabilidad del suelo (Factor K), determinada en suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua, 2021-2022 | 25 |
| 8 | Valores de erodabilidad (K) determinados a partir del modelo propuesto | 36 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| FIGURA | | PÁGINA |
|--------|--|--------|
| 1 | Localización de los puntos muestreados en los municipios de Telica, León, Tipitapa, Granada, Diriá, Masaya y Niquinohomo | 13 |
| 2 | Comparación de la Erodabilidad en función de A. Localización (DIR: Diriá, GRA: Granada, LEO: León, NIN: Nindirí, NIQ: Niquinohomo, TEL: Telica y TIP: Tipitapa), B. Orden de suelo (AND: Andisols, MOL: Mollisols y VER: Vertisols), C: Gran Grupo (DUR: Durustolls, HAPA: Haplustands, HAPE: Haplusterts y USTI: Ustivitrands), D: Uso de suelo (ARRO: Arroz, BO_RA: Bosque ralo, GR_BA: Granos básicos, MANÍ, PAST: Pasto, SAF: Sistemas agroforestales) y E: Estructura del suelo (BLO: Bloque, GR_FI: Granular fina, GR_MG: Granular de media a gruesa y MAS: Masiva) para los suelos de la región Pacífica de Nicaragua, 2021-2022. | 27 |
| 3 | Correlación entre las variables % Limo, % Arena Muy Fina (ArenaMF), % Arcilla, Permeabilidad ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, Permeab), Materia Orgánica (% MO) y Erodabilidad ($\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$, K). En la diagonal, histograma representando la distribución de cada variable; sobre la diagonal se presenta los valores de correlación (significancia representada con los asteriscos); bajo la diagonal gráficos de dispersión para cada par de variable. Suelos de la región Pacífica de Nicaragua, 2021-2022 | 29 |
| 4 | Modelo de Regresión Lineal Múltiple propuesto para determinar la erodabilidad en suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico | 32 |
| 5 | Modelos de regresión lineales de la Erodabilidad (K) con % limo, % arena muy fina, materia orgánica (% MO), permeabilidad superficial ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, Permeab) y estabilidad estructural de los agregados (EEA, %). A. Regresión Lineal Múltiple; B – F. Regresiones Lineales Simples para cada variable independiente por individual. Suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua, 2021-2022 | |

ÍNDICE DE ANEXOS

| ANEXO | | PÁGINA |
|-------|--|--------|
| 1 | Metodología para determinar la textura – tamaño de partícula (%) con el método de Pipeta (código LABSA-FS-P03) | 44 |
| 2 | Metodología para determinar el porcentaje de materia orgánica con el método GLOSOLAN-SOP-02 (GLOSOLAN, 2019). | 46 |
| 3 | Prueba de normalidad, Shapiro – Wilks | 48 |
| 4 | Análisis no paramétrico, Kruskal – Wallis | 49 |
| 5 | Test de comparación múltiple de la erodabilidad con la variable localización | 50 |
| 6 | Test de comparación múltiple de la erodabilidad con la variable Orden de suelo | 51 |
| 7 | Test de comparación múltiple para la variable Gran grupo de suelo | 51 |
| 8 | Test de comparación múltiple para la variable estructura de suelo | 51 |
| 9 | Test de comparación múltiple de la erodabilidad con la variable Estructura del suelo | 52 |
| 10 | Pruebas de correlaciones de Spearman | 52 |
| 11 | Primera aproximación del modelo de regresión para determinar K, a partir de limo, arena muy fina, materia orgánica, permeabilidad y estabilidad estructural de los agregados | 53 |
| 12 | Diagnóstico del modelo de regresión múltiple (RLM) | 54 |
| 13 | Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir del porcentaje de limo | 55 |
| 14 | Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir del porcentaje de arena muy fina | 55 |
| 15 | Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir del porcentaje de materia orgánica | 56 |
| 16 | Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir de la permeabilidad superficial ($mm \cdot h^{-1}$) | 56 |
| 17 | Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir del porcentaje de estabilidad estructural de los agregados | 57 |

| | | |
|----|--|----|
| 18 | Levantamiento de datos en campo | 58 |
| 19 | Pruebas de infiltración para determinar la permeabilidad superficial del suelo | 58 |
| 20 | Análisis de estabilidad estructural de los agregados | 59 |

RESUMEN

Con el propósito de generar valores de erodabilidad (factor K) en suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles localizados en la región del Pacífico de Nicaragua, treinta muestras de suelo fueron tomadas en los municipios León, Telica, Tipitapa, Masaya, Niquinohomo, Diriá y Granada. En los usos de maní, pasto, granos básicos, arroz, bosque ralo y sistemas agroforestales. Las variables estudiadas fueron: en campo permeabilidad superficial y tipo de estructura, en laboratorio granulometría, materia orgánica y estabilidad de los agregados. Los análisis estadísticos se realizaron en RStudio (2022), aplicándose las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilks, el análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis y el Modelo de Regresión Lineal Múltiple $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \varepsilon$. Las variables con mayor incidencia en la erodabilidad son el porcentaje de limo ($r_s = 0.69$, $p \leq 0.001$), porcentaje de arena muy fina ($r_s = 0.42$, $p \leq 0.05$) y la permeabilidad superficial ($r_s = -0.46$, $p \leq 0.05$). El modelo de Regresión Lineal Múltiple propuesto $K = -0.0608 + 0.0076(a) + 0.0123(b) - 0.0261(c) - 0.000056(d) + 0.0011(e)$, encontró que las variables: porcentaje de limo (a), porcentaje de arena muy fina (b), contenido de materia orgánica (c), permeabilidad superficial (d) y estabilidad estructural de los agregados (e), presentan alto y significativo poder predictivo $Pr(> |t|) = 2.06 \times 10^{-10}$, 5.34×10^{-5} , 8×10^{-4} , 12×10^{-2} y 11×10^{-2} respectivamente, para determinar el valor de la erodabilidad (K) para los suelos estudiados.

Palabras claves: Modelo de Regresión Lineal Múltiple, permeabilidad superficial, estabilidad de los agregados, porcentaje de limo y contenido de materia orgánica

ABSTRACT

In order to generate an erodibility soil values (K factor) on Andisols, Mollisols and Vertisols soils located in the Pacific region of Nicaragua. Thirty soil samples were taken in the municipalities of León, Telica, Tipitapa, Masaya, Niquinohomo, Diriá and Granada. In the soil uses of peanuts, grass, basic grains, rice, sparse forest and agroforestry systems. The variables studied were: in the field soil surface permeability and soil type structure, in the laboratory granulometry, soil organic matter and soil aggregates stability. Statistical analyzes were performed in RStudio (2022), applying the Shapiro-Wilks normality tests, the Kruskal-Wallis non-parametric analysis and the Multiple Linear Regression Model $Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \beta_4X_4 + \varepsilon$. The variables with the highest incidence in soil erodibility are the percentage of silt ($r_s = 0.69$, $p \leq 0.001$), percentage of very fine sand ($r_s = 0.42$, $p \leq 0.05$) and soil surface permeability ($r_s = -0.46$, $p \leq 0.05$). The proposed Multiple Linear Regression model $K = -0.0608 + 0.0076(a) + 0.0123(b) - 0.0261(c) - 0.000056(d) + 0.0011(e)$, found that the variables: percentage of silt (a), percentage of very fine sand (b), soil organic matter content (c), surface soil permeability (d) and soil aggregates stability (e), present high and significant predictive power $P Pr(> |t|) = 2.06 \times 10^{-10}, 5.34 \times 10^{-5}, 8 \times 10^4, 12 \times 10^2$ and 11×10^2 respectively, to determine the value of erodibility (K) for the soils studied.

Keywords: Multiple Linear Regression Model, surface permeability, soil aggregate stability, silt percentage and soil organic matter content

I. INTRODUCCIÓN

Ellison (1947) define la erosión del suelo como “un proceso de degradación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos, en el caso de la erosión hídrica son la lluvia y el escurrimiento superficial o las inundaciones” (Citado por FAO, s.f., párr. 8).

La erosión de suelos inducida por la lluvia ha sido una preocupación de la comunidad científica y agricultores a nivel global, desde inicios de la agricultura. Planificar sistemas de prácticas de conservación de suelo para reducir la erosión, llevo a invertir en sistemas de parcelas de escurrimiento que permitieran cuantificar las pérdidas de suelo.

En los Estados Unidos en 1946 se establecieron 100,000 parcelas de erosión para entender la relación entre factores y así, desarrollar un primer modelo de predicción “Corn Belt Equation”. Posteriormente, en 1976 el Servicio de Conservación de Suelo de la USDA, publica el modelo de predicción USLE y se propone el modelo de Wischmeier y Smith (1978) para determinar la erodabilidad.

La USLE es un modelo de erosión diseñado para predecir pérdidas promedio de suelo a largo plazo en sistemas de cultivo y manejo específicos. El uso generalizado en el campo ha corroborado su utilidad y validez para este propósito. El modelo se hizo muy popular a nivel mundial y fue validado en diferentes latitudes, incluyendo las áreas tropicales.

El propósito principal de la ecuación de pérdida de suelo es guiar la toma de decisiones metódicas en la planificación de la conservación sobre la base de un sitio. La ecuación permite al planificador predecir la tasa promedio de erosión del suelo en la búsqueda de varias combinaciones de sistemas de cultivo, técnicas de manejo y prácticas de control en cualquier sitio.

En Nicaragua desde el año 1982 se ha evaluado la erosión hídrica a través de parcelas de erosión, para validar el modelo de predicción de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS). También se ha cuantificado la erosión de suelo, a través de métodos sencillos como: mini – simuladores de lluvia, clavos y arandelas, y huellas máximas. Metodologías que tienden a tener

mayores costos y tiempos de implementación (Gámez, 1989; Rivas y Mendoza 1984; Somarriba, 1989; Murillo, 1990; González y Pozo, 2007).

Con el fin de validar el modelo EUPS (Wischmeier & Smith, 1978) en Nicaragua, se establecieron 40 parcelas estándares EUPS, localizadas en Niquinohomo – Diriá (1994 – 1998) y Ticuantepe (1982 – 1984), en suelos Andisoles (Rivas y Mendoza, 1994; Mendoza & Kassel 2002). En el año 2000 fueron establecidas en pequeñas minicuecas, seis colectores automatizados de sedimentos (Rivas, 2004).

Tanto las parcelas EUPS como las parcelas con colectores a nivel de minicuecas, presentaron tasas de erosión en campo menores a los valores de predicción computados a través del modelo de predicción de la EUPS. Este fenómeno se considera está relacionado con el comportamiento del micro relieve en suelos volcánicos, el cual captura escorrentía a mayor longitud del gradiente y por la ocurrencia de altas tasas de infiltración de agua en los suelos derivados de cenizas volcánicas.

Las rápidas tasas de infiltración en estos suelos formados de cenizas volcánicas cuaternarios y sedimentos, están relacionadas al factor K de la EUPS (erodabilidad del suelo). Por ello, el presente estudio adapta la metodología para determinar la permeabilidad superficial e incorpora la estabilidad de los agregados en agua, para proponer un modelo de predicción de la erodabilidad a partir del modelo de Wischmeier y Smith (1978).

La generación de este modelo para determinar el factor K, permitiría en Nicaragua utilizar con mayor precisión el modelo EUPS y a los planificadores del uso de la tierra, reducir costos por monitoreo de erosión en campo.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Generar valores de erodabilidad en suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua, 2021 – 2022.

2.2. Objetivos específicos

1. Evaluar la incidencia del limo, arena muy fina, arcilla, permeabilidad superficial, materia orgánica y estructura en la erodabilidad.
2. Proponer un modelo de erodabilidad a partir del limo, arena muy fina, materia orgánica, permeabilidad superficial y estabilidad estructural de los agregados, para suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua.

III. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se abordan los elementos conceptuales vinculados a la erodabilidad de los suelos (factor K) a partir del modelo de predicción propuesto por Wischmeier & Smith (1978). En el cual se consideran propiedades biofísicas tales como: textura, materia orgánica, estructura y permeabilidad superficial; las cuales se determinan a través de pruebas de campo y en laboratorio.

3.1. La erosión hídrica y su modelo de predicción

Ramírez et al., (2009) destacan que,

La erosión del suelo es uno de los problemas ambientales más serios en el mundo, pues ocasionan reducción en la productividad de los suelos, contaminación de las fuentes de agua y sedimentación de los ríos. Uno de los efectos directos de la erosión es la reducción de la fertilidad natural de los suelos; de allí el interés de cuantificar y predecir las pérdidas del suelo por erosión bajo diferentes sistemas de uso, manejo y conservación (p. 59).

La erosión hídrica es el proceso de desprendimiento, disgregación y transporte de partículas o agregados finos de suelo o de fragmentos de roca por acción del agua, por impacto de las gotas de lluvia (erosión por salpicadura) o por el flujo del agua de escorrentía superficial (Diccionario Multilingüe de la Ciencia del Suelo, párr. 1).

Wischmeier & Smith (1962) formularon la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo,

En su forma actual $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$, donde A representa el valor promedio de las pérdidas de suelos anuales ($tn \cdot ha^{-1}$, año) en función de un índice de erosividad de la lluvia R , la erodabilidad del suelo K , un factor de relieve LS , un factor de cobertura vegetal C y de prácticas de conservación de suelos P .

Sucesivos trabajos y ampliaciones de las series de datos experimentales dieron lugar a la formulación de la USLE en su última versión (Wischmeier & Smith, 1978), a la que

posteriormente se le han hecho modificaciones respecto a la forma de evaluación de algunos de sus parámetros (Citado por González, 1991, p.15).

3.2. Erodabilidad del suelo

Lal y Elliot (1994) señalan que “La erodabilidad del suelo, es una medida de la susceptibilidad de éste a la disgregación o separación de las partículas y al transporte de éstas por agentes erosivos” (Citado por Abarzúa, 2017, p. 3).

Montes (2011) afirma que el factor K indica el grado de susceptibilidad o resiliencia del suelo a la erosión y se concibe como la facilidad con la cual es desprendido por el salpicado de la gota durante un evento de lluvia, el flujo superficial o bien por la acción de ambos fenómenos (Citado por Gutiérrez, 2020, p. 30).

Wischmeier y Smith (1978) plantearon una ecuación de regresión que determina el coeficiente de erodabilidad (K), a través de distintas propiedades del suelo como lo son textura, porcentaje de materia orgánica, estructura y permeabilidad (Citado por Abarzúa, 2017, p. 15).

Como afirman Singh y Khera (2008),

La erodabilidad depende primeramente de las características físicas del suelo, de la naturaleza, cantidad y distribución de sus agregados, y del contenido de materia orgánica que presenta. Sin embargo, estas características físicas dependen, a su vez, del uso que se le dé al suelo, y por tanto dichas propiedades también pueden variar (Citado por Abarzúa, 2017, p.3).

El factor K toma su valor en función de las propiedades físicas del suelo responsables de la formación y estabilidad de la estructura, de la capacidad de almacenamiento y transmisión del agua a través del espacio poroso. Contempla pues aspectos tan importantes como: tamaño de las partículas, expresado en la textura; número y resistencia de agregados, expresado en estructura y contenido de materia orgánica; número, tamaño y disposición del espacio poroso, expresado mediante la permeabilidad (Gisbert et al., 2012).

Gisbert et al. (2012) destacan aspectos que están intrínsecamente relacionados con la erodabilidad,

- Cuanto mayor sea la estabilidad de los agregados mejor se mantendrá la estructura del espacio poroso a lo largo de la precipitación, manteniéndose estable la capacidad de transmitir y almacenar agua.
- Cuanto mayor sea la capacidad del suelo para almacenar agua más se demorará el inicio de la escorrentía, disminuyendo con ello su efecto destructor sobre los agregados.
- Cuanto mayor sea la capacidad del suelo para transmitir el agua, menor será el volumen de escorrentía generado y con ello su capacidad erosiva.
- La capacidad de almacenar y transmitir agua está íntimamente ligada tanto a la textura como a la estructura del suelo, a través de la configuración del espacio poroso.

El valor de la erodabilidad se determina a partir de la siguiente ecuación de regresión modificada de Wischmeier y Smith, 1978 (citada por Gisbert et al., 2012).

$$100 \cdot K = [10^{-4} \cdot 2.71 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - a) + 4.2 \cdot (b - 2) + 3.2 \cdot (c - 3)] \quad (ec. 1)$$

donde

K : erodabilidad del suelo ($t \cdot ha \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$)

M : factor representativo de la textura, el cual se determina con la siguiente ecuación

$$M = (100 - \% \text{ arcilla}) \cdot (\% \text{ limo} + \% \text{ arena muy fina}) \quad (ec. 2)$$

a : porcentaje de materia orgánica de la capa superficial del suelo

b : código correspondiente a la clase de estructura superficial

c : código correspondiente a clase de permeabilidad superficial ($mm \cdot h^{-1}$)

3.3. Propiedades del suelo relacionadas con la erodabilidad

3.3.1. Textura

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019) define la textura del suelo como:

Un indicador del contenido relativo de partículas de diferentes tamaños, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa.

De acuerdo con Enriquez y Cremona (2019),

El análisis de granulometría es un método analítico físico que se realiza sobre muestras de suelo desagregadas y tamizadas por malla de 2 *mm*, para determinar las proporciones relativas de arena, limo y arcilla. El método de la pipeta de Robinson consiste en la separación en medio líquido de las partículas minerales del suelo basada en la ley de Stokes, es decir, en la velocidad de decantación de las partículas de acuerdo a su diámetro (p. 18).

Pellegrini (2019) describe las principales características de las fracciones granulométricas,

- Arena: conforma la fracción esquelética del suelo, con partículas que dejan macross poros entre sí, los que aumentan la permeabilidad y por lo tanto, son pobres almacenadores de agua.
- Limo: es una fracción derivada de la anterior por alteración física. Su tamaño de partículas es inferior, dejando poros también más pequeños donde almacenan agua.
- Arcilla: la fracción de suelo más fina. Por su pequeño tamaño de partícula, tiene valores muy elevados de superficie específica activa; por lo que incide fundamentalmente en la fertilidad de los suelos y almacenamiento de agua.

Cuadro 1. Clasificación de las fracciones del suelo según el departamento de agricultura de los Estados Unidos (Cairo y Fundora, 1994, p. 155)

| Fracciones | Dimensiones (límites en <i>mm</i>) |
|------------------|-------------------------------------|
| Arena muy gruesa | 2.00 – 1.00 |
| Arena gruesa | 1.00 – 0.50 |
| Arena media | 0.50 – 0.25 |
| Arena fina | 0.25 – 0.10 |
| Arena muy fina | 0.10 – 0.05 |
| Limo | 0.05 – 0.002 |
| Arcilla | < 0.002 |

3.3.2. Materia orgánica

Según Céspedes y Millas (2015),

La materia orgánica del suelo está formada por compuestos que provienen de restos de organismos, ya sea de plantas, animales y sus productos de desecho. La naturaleza química de la materia orgánica está constituida por una serie de compuestos de complejidad variable en un continuo estado de transformación, desde los residuos de cultivos y animales recientemente incorporados hasta la compleja estructura del humus alcanzado después de períodos extensos de transformación (párr. 1-2).

Nilo (2019) expresa que, la determinación de carbono orgánico del suelo está basada en el método de Walkley & Black de oxidación húmeda con ácido crómico. El carbono orgánico en el suelo es oxidado con una solución de dicromato de potasio en ácido sulfúrico concentrado. Dicho carbono orgánico es estimado midiendo el dicromato remanente no reducido por titulación con sulfato ferroso (párr. 7).

3.3.3. Estructura

La estructura del suelo desde el punto de vista morfológico, “es el grado, forma o modo en que las partículas integrantes de un suelo, se asocian entre sí, formando en forma natural grupos unidos sin la intervención del hombre” (InfoAgronomo, 2020, párr. 1).

La Organización de las Naciones Unidas (FAO, s.f.) describe la clasificación de las estructuras del suelo de acuerdo a su forma:

- Estructuras granulares y migajosas: son partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos. El agua circula muy fácilmente a través de esos suelos.
- Estructuras en bloques o bloques subangulares: son partículas de suelo que se agrupan en bloques casi cuadrados o angulares con los bordes más o menos pronunciados. Los bloques relativamente grandes indican que el suelo resiste la penetración y el movimiento del agua.
- Estructuras prismáticas y columnares: son partículas de suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, pero definidas. El agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente.
- Estructura laminar: se compone de partículas de suelo agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra. A menudo las láminas se traslapan, lo que dificulta notablemente la circulación del agua.

3.3.4. Estabilidad estructural de los agregados

En el Diccionario Multilingüe de la Ciencia del Suelo (2021), se define la estabilidad de la estructura como: “La resistencia de la estructura del suelo frente a la acción de agentes externos, en especial la del agua, ya sea por impacto directo de las gotas de lluvia, por humectación repentina o por esfuerzo mecánico” (párr. 1).

Los suelos naturalmente varían en la proporción en que son vulnerables a fuerzas destructivas externas. La estabilidad de los agregados es una medida de esa vulnerabilidad, más específicamente expresa la resistencia de los agregados a la ruptura cuando son sometidos a procesos perturbadores potenciales (UNLP, 2019, p. 12).

3.3.5. Permeabilidad

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (s.f.) enuncia que, “la permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la infiltración”.

El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de infiltración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros

guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad (FAO, s.f.).

3.4. Suelos en estudio del Pacífico de Nicaragua, Taxonomía de suelos

3.4.1. Órdenes de suelo

En el Atlas Nacional de Suelos de la República de Nicaragua elaborado por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2021) se describen los órdenes de suelo en estudio:

- **Andisoles (D)**

Suelos de origen volcánico por antonomasia. Se forman de cenizas y vidrios volcánicos, así como a partir de otros materiales piroclásticos, de colores oscuros, siendo altamente porosos, ligeros, permeables, de buena estructura y fáciles de trabajar. Presentan una horizonación típica de suelos jóvenes, con una secuencia A-Bw-C-R (p. 44).

- **Mollisoles (I)**

Son suelos oscuros, enriquecidos por los altos contenidos de materia orgánica, son suelos suaves, bien estructurados, no son duros ni masivos cuando secos. Tienen alta fertilidad natural. Su horizonación común es A-Bt-C-R o pueden encontrarse otras variantes en función del grado de desarrollo del suelo, lo cual está relacionado al grado evolutivo de la génesis del suelo (p. 45).

- **Vertisoles (F)**

Son suelos muy arcillosos; durante las épocas secas se agrietan y durante el período lluvioso se expanden y se encharcan con facilidad por su estructura prismática, son muy pesados para laborarlos aunque desde el punto de vista químico son ricos en nutrientes (Ca, Mg, Na, K), pueden contener cantidades considerables de materia orgánica (p. 46).

3.4.2. Grandes grupos de suelo

En la clasificación taxonómica de los suelos de Nicaragua (INETER, 2019) se describen los grandes grupos de suelo:

- *Haplustands* (DGB)

Son los *Ustands*, suelos volcánicos ricos en alófana (mineral de arcilla amorfo), de texturas medias y moderadamente finas, que se han desarrollado de cenizas que cubren suelos enterrados, de depósitos de cenizas más antiguos, se encuentran en clima seco. Los suelos permanecen secos más de 90 días consecutivos en el año (p. 14).

- *Ustivitrands* (DFA)

Son los *Vitrands*, suelos derivados de materiales volcánicos, de texturas moderadamente gruesas y gruesas, con altos contenidos de vidrios volcánicos, cenizas y pómez, muchos presentan gravas de escoria volcánica. Se encuentran en clima seco. Los suelos permanecen secos más de 90 días consecutivos en el año (p. 14).

- *Durustolls* (IGA)

Son los *Ustolls*, suelos de desarrollo juvenil, en etapa inicial a intermedia de intemperismo químico, bien drenados, con epipedón móllico y un estrato endurecido fuertemente cementado o talpetate dentro de un metro de profundidad desde la superficie, en clima seco. Los suelos permanecen secos más de 90 días consecutivos en el año (p. 14).

- *Haplusterts* (FEE)

Son los *Usterts*, suelos de arcilla pesada (sonsocuite) de color gris o negro, conformado por arcilla expandible (montmorillonita) de estructura prismática o columnar muy fuerte, en clima seco, que se contrae y forma grietas cuando seco y se expande y encharca al humedecerse. Los agrietamientos en la arcilla permanecen abiertos por 90 o más días acumulativos al año y pueden medir hasta 10 *cm* o más de ancho y llegar a un metro o más de profundidad (p. 12).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Ubicación del estudio

La investigación se desarrolló en los órdenes de suelo Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua; los cuales representan un área de 3,258.07 km^2 , 15,032.65 km^2 y 2,905.17 km^2 , respectivamente (INETER, 2021).

En el cuadro 2 se presentan las coordenadas geográficas representativas de los puntos muestreados en los diferentes sitios y en la figura 1 se presenta el mapa de localización que refleja los 30 puntos muestreados en los municipios de León, Telica, Tipitapa, Masaya, Niquinohomo, Diriá y Granada de la región del Pacífico de Nicaragua.

Cuadro 2. Ubicación de los tres órdenes de suelo estudiados

| Orden de suelo | Departamento | Municipio | X | Y |
|----------------|--------------|-------------|--------|---------|
| Andisols | León | León | 520092 | 1364752 |
| Andisols | León | Telica | 515916 | 1381489 |
| Andisols | Granada | Diriá | 600847 | 1311156 |
| Andisols | Masaya | Niquinohomo | 599558 | 1315238 |
| Mollisols | Masaya | Masaya | 599480 | 1339913 |
| Mollisols | Masaya | Masaya | 598643 | 1337993 |
| Vertisols | Managua | Tipitapa | 597641 | 1349248 |
| Vertisols | Managua | Tipitapa | 612773 | 1350180 |
| Vertisols | Granada | Granada | 620678 | 1347619 |

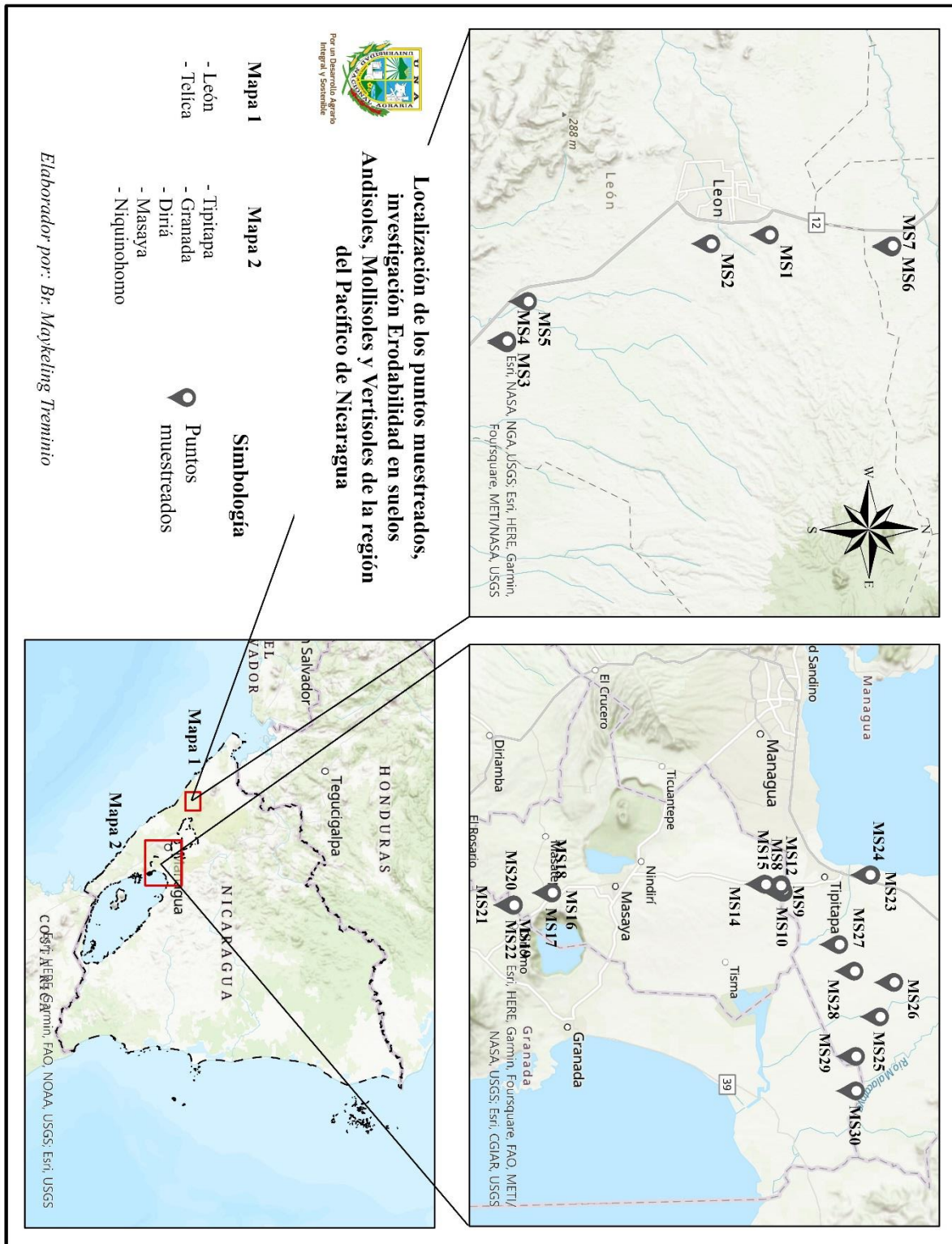


Figura 1. Localización de los puntos muestreados en los municipios de Telica, León, Tipitapa, Granada, Diriá, Masaya y Niquinohomo

4.2. Condiciones edafoclimáticas

4.2.1. Suelo

En el levantamiento de suelos de la región del Pacífico de Nicaragua se describe la génesis y clasificación de suelos (Ministerio de Economía, Industria y Comercio y Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1971).

En la región del Pacífico de Nicaragua, la manera más importante de acumulación de material parental es por expulsión aérea de material volcánico depositado en las tierras y aguas adyacentes. Los materiales expulsados de los volcanes están formados por roca volcánica, escoria y ceniza que varían en sus características físicas, grado de cementación o dureza y hasta cierto punto en sus características químicas (p. II-593).

Los Vertisoles del oeste de Nicaragua son principalmente de arcilla montmorillonita. Son extensivos en depresiones, llanos y en planicies con escurrimiento superficial lento. También se encuentran en pendientes hasta de 15%, donde el suelo se ha formado de basaltos y otras rocas altas en bases y fácilmente meteorizables (pp. II-607 – II-611).

Una gran parte de los Mollisoles del oeste de Nicaragua se han desarrollado de cenizas volcánicas o de rocas con alto contenido de materiales piroclásticos. La meteorización de la ceniza en estos climas tropicales y subtropicales húmedos – secos, parece resultar en el desarrollo de la arcilla montmorillonita (p. II-626).

4.2.2. Clima

En la región del Pacífico la temporada de lluvia es opresiva y nublada, con precipitaciones promedio de 1000 *mm* a más de 1400 *mm*. La temporada seca es bochornosa, ventosa y mayormente despejada y la temperatura varía de 20°C a 34°C y rara vez baja a 18°C (INETER, 2019).

4.3. Diseño metodológico

La investigación se llevó a cabo en suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles, en los grandes grupos *Haplustands*, *Ustivitrands*, *Durustolls* y *Haplusterts* de la región del Pacífico de

Nicaragua, los cuales fueron clasificados de acuerdo con (INETER, 2021) y estudios de erosión hídrica realizados en los municipios de Niquinohomo y Diriá (Mendoza & Cassel, 2022).

En el muestreo de suelo se consideró la selección de 30 puntos de referencia, distribuidos en los municipios León, Telica, Tipitapa, Masaya, Niquinohomo, Diriá y Granada; en los cuales predominan como usos del suelo los cultivos de maní, pastos, granos básicos, arroz, bosques ralos y sistemas agroforestales.

La selección de los puntos de muestreo se realizó bajo los siguientes criterios: existencia de base de datos de investigación en erosión de suelo, actual desarrollo de proyectos de investigación y áreas con problemas de degradación de suelos inducida por la erosión hídrica y eólica. Las muestras se tomaron en un punto representativo de las áreas productivas, haciendo uso del palín a una profundidad de 0 a 10 *cm*.

4.4. Recolección de datos

Se utilizaron formatos de campo para tomar datos de localización, estructura, uso del suelo y los tiempos de las pruebas de infiltración realizadas para determinar la permeabilidad superficial. A la vez, se tomaron muestras de suelo, para posteriormente realizar los análisis de textura pipeta, materia orgánica y estabilidad estructural de los agregados en el laboratorio de Suelos y Agua de la Universidad Nacional Agraria (LABSA – UNA).

4.5. Variables evaluadas

4.5.1. Textura

La textura – tamaño de partícula (%) se determinó con el método de Pipeta (código LABSA-FS-P03) (Anexo 1).

4.5.2. Materia orgánica

El porcentaje de materia orgánica se determinó en el Laboratorio de Suelos y Agua con el método GLOSOLAN-SOP-02 (Anexo 2).

4.5.3. Estructura

La estructura superficial se determinó mediante la observación visual y el tacto, haciendo uso del manual propuesto por la USDA (1999) y categorizando los códigos de la estructura según la USLE.

Para ello, se observa la estructura del suelo hasta una profundidad de aproximadamente 10 *cm*. Se reconoce y anota el tipo y tamaño de la estructura de dicho suelo. Posteriormente, se categoriza la estructura según los códigos establecidos por la USLE (Cuadro 3) para estructuras granulares muy fina, granulares fina, granulares de media a gruesa y bloques, laminares o masivas.

Cuadro 3. Clases de estructuras superficiales (Gisbert et al., 2012).

| Código | Estructura |
|--------|---|
| 1 | Granular muy fina ($\emptyset < 1 \text{ mm}$) |
| 2 | Granular fina ($1 \text{ mm} < \emptyset < 2 \text{ mm}$) |
| 3 | Granular de media a gruesa ($2 \text{ mm} < \emptyset < 10 \text{ mm}$) |
| 4 | Cúbica, laminar o masiva |

4.5.4. Permeabilidad superficial

La permeabilidad superficial ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) se estimó en campo a través del método de infiltración con los anillos sencillos, propuesto por la USDA (1999). Aplicando 3 pulgadas de agua, la primera para la sortividad, la segunda para la infiltración y la tercera para la permeabilidad. En el cuadro 4 se presenta la clasificación de las clases de permeabilidad superficial. A continuación, el procedimiento para determinar la permeabilidad superficial a través de pruebas de infiltración:

1. Limpie el área del muestreo de residuos superficiales. Si el sitio está cubierto con vegetación, corte tan cerca de la superficie como sea posible.
2. Usando la maza y el bloque de madera, clave el anillo de 6" de diámetro con el borde biselado hacia abajo, hasta una profundidad de 3".
3. Cubra el anillo con la envoltura de plástico.
4. Llene la botella plástica hasta la marca de 449 *mL* (1 *pulgada*) con agua y vierta el contenido en el anillo.

5. Remueva la envoltura, inicie a marcar el tiempo en el cronómetro y registre el tiempo de inicio en el formato de campo.
6. Cuando la superficie este brillante, detenga el tiempo en el cronometro y registre el tiempo en minutos y segundos.

Cuadro 4. Clases de permeabilidad (I) (Gisbert et al., 2012).

| Código | Permeabilidad |
|--------|--|
| 1 | Rápida ($125 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < I < 250 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) |
| 2 | De rápida a moderada ($62 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < I < 125 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) |
| 3 | Moderada ($20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < I < 62 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) |
| 4 | De moderada a lenta ($5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < I < 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) |
| 5 | Lenta ($1,2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < I < 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) |
| 6 | Muy lenta ($1,2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < I$) |

4.5.5. Estabilidad estructural de los agregados

El porcentaje de la estabilidad estructural de los agregados (EEA) se determinó en el Laboratorio de Suelos y Agua (LABSA – UNA) con la metodología de Grossman (1987; no publicada), adecuada al manual del equipo de tamizado húmedo (Eijkelkamp, 2018). A continuación, el procedimiento para realizar el análisis en el laboratorio.

1. Seque la muestra de suelo al aire y pase por los tamices de 2 a 1 *mm*.
2. Coloque los tamices en el soporte del equipo y las latas numeradas.
3. Agregue 80 *mL* de agua destilada a las latas, de modo que la muestra se mueva bajo el agua durante el tamizado.
4. Pese 3 *g* de la muestra de suelo de 1 – 2 *mm* y agréguelos a los tamices.
5. Coloque el soporte de tamiz en la posición de trabajo, colocando el soporte del tamiz en el segundo orificio del eje.
6. Compruebe si el interruptor de red está en la posición “of” y coloque el adaptador en un enchufe de pared.
7. Ponga en marcha el motor con el interruptor de red en la posición “3 *min*” y dejar que suba y baje el porta tamices durante 3 *min* (recorrido = 1,3 *cm*, a unas 34 *veces/min*), al final de este tiempo el motor se detendrá automáticamente.
8. Después del tamizado húmedo, agregue el contenido retenido en el tamiz a una tara previamente pesada y lleve al horno durante 24 horas a una temperatura de 105 °C.

9. Pese el contenido una vez que esta esté seca.
10. Agregue 80 mL de Hexametáfosfato de sodio ($NaPO_3$)₆ a las latas y el contenido del suelo al tamiz receptor.
11. Sumerja la muestra de suelo en el agente dispersante durante 30 min y luego ponga en marcha el equipo durante 10 minutos.
12. Después del tamizado húmedo con el agente dispersante, agregue el contenido retenido en el tamiz a la tara antes usada y lleve al horno durante 24 horas a una temperatura de 105 °C.
13. Pese el contenido una vez que esta esté seca.
14. Los 2 – 0,5 mm retenidos en el tamiz después del tratamiento de dispersión se restan del peso retenido y el peso inicial de la muestra en el cálculo del porcentaje de retención.

Nota. Para suelos Vertisoles (arcillas 2:1 montmorillonita), llevar el terrón de la muestra a un 50% de humedad para desagregar de manera manual los grandes agregados y llevarlos a tamaños entre 2 – 4 mm, posteriormente someterlos al análisis de EEA.

4.6. Análisis de datos

Los datos recopilados de las variables de suelo en estudio se digitalizaron en hojas de cálculo de Microsoft Excel, para la determinación de la erodabilidad. Los análisis estadísticos se realizaron en el programa computacional R 4.2.2 (R Core Team, 2022) y su interfaz RStudio 2022.07.1 (RStudio Team, 2022), y se utilizó un nivel de significancia de 0.05 para todas las pruebas de hipótesis. Tales pruebas se describen a continuación:

1. Prueba de normalidad

La prueba de normalidad utilizada fue la de Shapiro – Wilk, para la cual se contrasta la hipótesis nula (H_0) que enuncia que los datos siguen una distribución normal, contra la alternativa (H_1) de no seguir una distribución normal.

2. Estadística descriptiva

Como medida descriptiva se utilizó la mediana, la cual es el valor medio del conjunto de valores ordenados de forma ascendente. Esta se utilizó como medida de resumen para describir los valores centrales de los conjuntos de datos contrastados después de aplicada la prueba no

paramétrica de Kruskal – Wallis. Consecutivamente se utilizaron gráficos de caja para su representación visual.

3. Estadística inferencial

Como prueba inferencial para comparar las medianas de los conjuntos de datos se utilizó Kruskal – Wallis. Esta es considerada una alternativa no paramétrica al Análisis de Varianza (ANDEVA), la cual se aplicó posterior a determinar que los conjuntos de datos no siguen una distribución normal.

La variable numérica es K (erodabilidad) y las variables categóricas son localización, orden, gran grupo, uso y estructura del suelo. Como prueba de múltiple comparación de Dunn, a fin de determinar los niveles de la variable categórica que más están contribuyendo a las diferencias.

4. Relación entre variables

La dirección y fuerza de las correlaciones fueron descritas con el Coeficiente de Correlación de Spearman y la significancia con una prueba de correlaciones bajo la hipótesis nula (H_0) de que “la correlación es significativa”. Se priorizó la interpretación de la variable dependiente (erodabilidad) con las independientes (limo, arena muy fina, arcilla, permeabilidad superficial y materia orgánica), restando énfasis a las correlaciones entre las variables independientes.

Un modelo de Regresión Lineal Múltiple fue creado para predecir los valores de la variable dependiente erodabilidad (factor K), bajo el supuesto de que las variables porcentaje de limo, arena muy fina, materia orgánica, permeabilidad superficial y estabilidad estructural de los agregados aportan a un modelo matemático para predecir K en los suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua.

Modelo de Regresión Lineal Múltiple

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \varepsilon$$

donde,

Y: representa la erodabilidad (factor K, $t \cdot ha \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$)

β_0 : ordenada del origen del plano de regresión

X_1 : porcentaje de limo

X_2 : porcentaje de arena muy fina

X_3 : porcentaje de materia orgánica

X_4 : permeabilidad superficial

X_5 : estabilidad estructural de los agregados

ε : error de la ecuación

Los supuestos del modelo de Regresión Lineal Múltiple fueron confirmados utilizando diferentes tipos de procedimientos, pruebas y representaciones gráficas, con la finalidad de confirmar la capacidad de predicción de dicho modelo. Los supuestos confirmados fueron los siguientes:

- Linealidad: Se refiere a que la relación entre las variables sea lineal.
- Normalidad: Diagnostica si los datos siguen una distribución normal.
- Homocedasticidad: Se refiere a que los errores tengan varianza constante.
- Independencia de los residuales: Explora si los residuales son dependientes (están correlacionados) o son independientes (no están correlacionados).
- Determinación de datos influyentes: Diagnostica los datos atípicos o de alto valor de aplacamiento.

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este acápite se detallan las propiedades biofísicas del suelo de los sitios en estudio, los índices de erodabilidad (K); el comportamiento de K al ser comparado con las variables localizaciones, orden de suelo, gran grupo, uso y estructura del suelo; la incidencia del limo, arena muy fina, arcilla, permeabilidad superficial, y materia orgánica en la erosionabilidad. A la vez, la propuesta del modelo para predecir la erodabilidad en suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua.

5.1. Propiedades biofísicas del suelo que influyen en la erodabilidad

En el cuadro 5 se compilan los órdenes y grandes grupos de suelo estudiados en municipios de la región del Pacífico de Nicaragua. Además, los resultados de porcentajes de materia orgánica, estructura y permeabilidad superficial; las cuales son propiedades del suelo que influyen en la erodabilidad.

Cuadro 5. Resultados de materia orgánica, estructura y permeabilidad superficial, región del Pacífico de Nicaragua, 2021 – 2022

| Código | Municipio | Orden de suelo | Gran grupo | Materia orgánica (%) | Estructura | Permeabilidad superficial ($mm \cdot h^{-1}$) |
|--------|-----------|----------------|---------------------|----------------------|----------------------------|---|
| MS1 | León | Andisoles | <i>Ustivitrands</i> | 0.58 | Granular fina | 729.8 |
| MS2 | León | Andisoles | <i>Ustivitrands</i> | 2.64 | Granular de media a gruesa | 152.7 |
| MS3 | León | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 2.91 | Bloque | 914.9 |
| MS4 | León | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 2.70 | Bloque, laminar | 7.3 |
| MS5 | León | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 0.50 | Granular de media a gruesa | 134.4 |
| MS6 | Telica | Andisoles | <i>Ustivitrands</i> | 0.50 | Granular fina | 383.5 |
| MS7 | Telica | Andisoles | <i>Ustivitrands</i> | 1.23 | Granular fina | 33.9 |
| MS8 | Nindirí | Mollisoles | <i>Durustolls</i> | 2.04 | Bloque | 13.8 |
| MS9 | Nindirí | Mollisoles | <i>Durustolls</i> | 2.56 | Bloque | 42.4 |
| MS10 | Nindirí | Mollisoles | <i>Durustolls</i> | 4.38 | Bloque | 16.2 |
| MS11 | Nindirí | Mollisoles | <i>Durustolls</i> | 4.86 | Bloque | 15.5 |
| MS12 | Nindirí | Mollisoles | <i>Durustolls</i> | 6.25 | Bloque | 13.0 |
| MS13 | Nindirí | Mollisoles | <i>Durustolls</i> | 6.52 | Bloque | 200.8 |
| MS14 | Nindirí | Mollisoles | <i>Durustolls</i> | 4.93 | Bloque | 220.3 |
| MS15 | Nindirí | Mollisoles | <i>Durustolls</i> | 3.55 | Bloque | 180.6 |

Continuación cuadro 5.

| Código | Municipio | Orden de suelo | Gran grupo | Materia orgánica (%) | Estructura | Permeabilidad superficial ($mm \cdot h^{-1}$) |
|--------|-------------|----------------|--------------------|----------------------|----------------------------|---|
| MS16 | Niquinohomo | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 7.12 | Granular de media a gruesa | 1756.8 |
| MS17 | Niquinohomo | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 2.98 | Granular de media a gruesa | 1150.6 |
| MS18 | Niquinohomo | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 3.84 | Granular de media a gruesa | 1296.3 |
| MS19 | Diriá | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 3.87 | Bloque | 39.0 |
| MS20 | Diriá | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 4.01 | Bloque | 64.2 |
| MS21 | Diriá | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 7.19 | Bloque | 60.8 |
| MS22 | Diriá | Andisoles | <i>Haplustands</i> | 5.17 | Bloque | 41.3 |
| MS23 | Tipitapa | Vertisoles | <i>Haplusterts</i> | 3.39 | Masiva (Prismática) | 10.0 |
| MS24 | Tipitapa | Vertisoles | <i>Haplusterts</i> | 5.13 | Masiva (Prismática) | 40.0 |
| MS25 | Tipitapa | Vertisoles | <i>Haplusterts</i> | 3.50 | Masiva (Prismática) | 83.0 |
| MS26 | Tipitapa | Vertisoles | <i>Haplusterts</i> | 3.69 | Masiva (Prismática) | 72.0 |
| MS27 | Tipitapa | Vertisoles | <i>Haplusterts</i> | 2.66 | Masiva (Prismática) | 16.0 |
| MS28 | Tipitapa | Vertisoles | <i>Haplusterts</i> | 4.90 | Masiva (Prismática) | 90.0 |
| MS29 | Granada | Vertisoles | <i>Haplusterts</i> | 3.97 | Masiva (Prismática) | 81.0 |
| MS30 | Granada | Vertisoles | <i>Haplusterts</i> | 2.31 | Masiva (Prismática) | 69.0 |

El cuadro 6 expone los resultados obtenidos del análisis granulométrico realizado a las muestras de suelo, en el cual se presentan los porcentajes de arena muy gruesa, arena gruesa, arena media, arena fina, arena muy fina, limo grueso, limo fino y arcilla.

Cuadro 6. Resultados del análisis granulométrico de suelo, Región del Pacífico de Nicaragua, LABSA - UNA, 2021 – 2022

| Código | Análisis granulométrico | | | | | | | | | | Clase textural |
|--------|-------------------------|----------------|---------------|--------------|------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-----------|-------------------------|
| | % Arena muy gruesa | % Arena gruesa | % Arena media | % Arena fina | % Arena muy fina | % Arena total | % Limo grueso | % Limo fino | % Limo total | % Arcilla | |
| MS1 | 0.45 | 10.63 | 31.40 | 21.37 | 12.24 | 76.1 | 5.6 | 3.55 | 9.16 | 14.74 | Franco Arenoso |
| MS2 | 1.41 | 8.70 | 18.15 | 19.91 | 14.38 | 62.55 | 7.91 | 18.31 | 26.22 | 11.24 | Franco Arenoso |
| MS3 | 2.20 | 9.17 | 11.90 | 12.78 | 12.93 | 48.98 | 7.47 | 20.47 | 27.94 | 23.09 | Franco Arcillo Arenoso |
| MS4 | 2.97 | 7.81 | 7.39 | 11.24 | 12.44 | 41.84 | 0.15 | 27.45 | 27.60 | 30.56 | Franco Arcilloso |
| MS5 | 0.39 | 1.82 | 9.84 | 22.05 | 21.95 | 56.05 | 5.74 | 16.97 | 22.71 | 21.24 | Franco Arcillo Arenoso |
| MS6 | 5.47 | 23.06 | 24.21 | 11.38 | 9.74 | 73.86 | 1.68 | 8.02 | 9.70 | 16.44 | Franco Arenoso |
| MS7 | 4.05 | 11.39 | 25.54 | 13.69 | 11.89 | 66.57 | 4.49 | 11.83 | 16.32 | 17.11 | Franco Arenoso |
| MS8 | 2.36 | 3.11 | 3.41 | 8.13 | 7.93 | 24.93 | 9.97 | 34.09 | 44.06 | 31.01 | Franco Arcilloso |
| MS9 | 2.35 | 2.80 | 3.14 | 4.89 | 5.54 | 18.72 | 5.97 | 34.54 | 40.51 | 40.77 | Arcillo Limoso |
| MS10 | 1.69 | 1.53 | 1.77 | 2.51 | 2.71 | 10.21 | 15.36 | 39.26 | 54.62 | 35.16 | Franco Arcillo Limoso |
| MS11 | 2.67 | 2.87 | 3.83 | 4.71 | 5.53 | 19.61 | 11.70 | 39.72 | 51.42 | 28.96 | Franco Arcillo limoso |
| MS12 | 0.16 | 0.17 | 0.31 | 0.46 | 1.97 | 3.07 | 19.95 | 52.42 | 72.37 | 24.55 | Franco limoso |
| MS13 | 2.11 | 2.97 | 3.85 | 3.57 | 3.67 | 17.17 | 9.38 | 34.56 | 43.94 | 38.88 | Franco Arcilloso Limoso |
| MS14 | 4.02 | 3.6 | 4.56 | 4.67 | 4.21 | 21.06 | 10.52 | 34.08 | 44.6 | 34.33 | Franco Arcilloso |
| MS15 | 2.68 | 3.53 | 3.33 | 4.69 | 4.55 | 18.78 | 10.83 | 36.79 | 47.62 | 33.59 | Franco Arcilloso Limoso |

Continuación cuadro 6.

| Análisis granulométrico | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|----------------|---------------|--------------|------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-----------|------------------|
| Código | % Arena muy gruesa | % Arena gruesa | % Arena media | % Arena fina | % Arena muy fina | % Arena total | % Limo grueso | % Limo fino | % Limo total | % Arcilla | Clase textural |
| MS16 | 4.85 | 3.81 | 3.54 | 4.94 | 3.87 | 21.01 | 13.58 | 36.34 | 49.92 | 29.06 | Franco arcilloso |
| MS17 | 11.13 | 18.64 | 17.62 | 9.51 | 1.17 | 58.07 | 9.24 | 13.97 | 23.21 | 18.71 | Franco arenoso |
| MS18 | 5.03 | 9.49 | 8.64 | 8.34 | 6.49 | 37.99 | 10.80 | 24.02 | 34.82 | 27.18 | Franco |
| MS19 | 1.68 | 4.42 | 5.97 | 6.53 | 4.48 | 23.08 | 6.75 | 30.16 | 36.91 | 40.00 | Arcilloso |
| MS20 | 2.36 | 6.17 | 8.49 | 8.53 | 4.05 | 29.60 | 9.95 | 26.61 | 36.56 | 33.83 | Franco arcilloso |
| MS21 | 1.54 | 3.12 | 5.20 | 6.45 | 4.99 | 21.30 | 11.17 | 35.86 | 47.03 | 31.66 | Franco arcilloso |
| MS22 | 1.55 | 5.95 | 8.43 | 9.32 | 6.10 | 31.55 | 9.83 | 28.37 | 38.20 | 30.45 | Franco arcilloso |
| MS23 | 0.58 | 0.41 | 0.38 | 0.55 | 0.83 | 2.75 | 5.00 | 18.74 | 23.74 | 72.50 | Arcilloso |
| MS24 | 4.72 | 3.34 | 3.10 | 4.48 | 6.76 | 22.40 | 5.05 | 18.95 | 24.00 | 53.60 | Arcilloso |
| MS25 | 2.76 | 1.91 | 2.56 | 1.47 | 1.83 | 10.53 | 3.20 | 15.15 | 18.35 | 71.11 | Arcilloso |
| MS26 | 0.20 | 0.87 | 1.46 | 2.02 | 2.35 | 6.90 | 2.73 | 14.78 | 17.51 | 75.58 | Arcilloso |
| MS27 | 0.36 | 0.34 | 0.83 | 1.51 | 2.19 | 5.23 | 2.15 | 12.11 | 14.26 | 80.50 | Arcilloso |
| MS28 | 0.79 | 0.82 | 0.59 | 1.06 | 2.61 | 5.87 | 8.64 | 25.91 | 34.55 | 59.57 | Arcilloso |
| MS29 | 0.13 | 0.43 | 0.30 | 0.51 | 0.66 | 2.03 | 3.37 | 10.88 | 14.25 | 83.71 | Arcilloso |
| MS30 | 0.16 | 0.59 | 0.74 | 1.53 | 3.90 | 6.92 | 0.06 | 18.68 | 18.74 | 74.33 | Arcilloso |

5.2. Valores estimados de erodabilidad (K)

En el cuadro 7 se muestran los usos de suelo de los puntos muestreados y los valores de erodabilidad determinados con la ecuación de regresión modificada (*ec. 1*) de Wischmeier y Smith (1978), a partir de los parámetros de suelo: granulometría, porcentaje de materia orgánica, estructura y permeabilidad superficial.

Donde, M es el factor representativo de la textura determinado con la (*ec. 2*), a es el porcentaje de materia orgánica, b es el código correspondiente a la clase de estructura (Cuadro 3), c es el código de las clases de permeabilidad superficial (Cuadro 4) y K los valores de erodabilidad en unidades de $t \cdot ha \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$.

Cuadro 7. Erodabilidad del suelo (factor K), determinada en suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua, 2021-2022.

| Código | Uso del suelo | M | a | b | c | K |
|--------|----------------------|-----------|------|---|---|--------|
| MS1 | Maní | 1824.5820 | 0.58 | 2 | 1 | 0.0976 |
| MS2 | Pasto | 3603.6974 | 2.64 | 3 | 1 | 0.2657 |
| MS3 | Bosque ralo | 3143.1570 | 2.91 | 4 | 1 | 0.2591 |
| MS4 | Pasto | 2780.2049 | 2.70 | 4 | 4 | 0.3287 |
| MS5 | Maní | 3517.2314 | 0.50 | 3 | 1 | 0.3218 |
| MS6 | Maní | 1624.5706 | 0.50 | 2 | 1 | 0.0785 |
| MS7 | Maní | 2338.7115 | 1.23 | 2 | 3 | 0.2022 |
| MS8 | Bosque ralo | 3586.4750 | 2.04 | 4 | 4 | 0.4205 |
| MS9 | Pasto | 2727.6078 | 2.56 | 4 | 3 | 0.2952 |
| MS10 | Bosque ralo | 3717.2772 | 4.38 | 4 | 4 | 0.3587 |
| MS11 | Pasto | 4045.7280 | 4.86 | 4 | 4 | 0.3664 |
| MS12 | Sistema agroforestal | 5608.9530 | 6.25 | 4 | 4 | 0.4087 |
| MS13 | Sistema agroforestal | 2909.9232 | 6.52 | 4 | 1 | 0.1520 |
| MS14 | Granos básicos | 3205.3527 | 4.93 | 4 | 1 | 0.2101 |
| MS15 | Granos básicos | 3464.6097 | 3.55 | 4 | 1 | 0.2683 |
| MS16 | Sistema agroforestal | 3815.8626 | 7.12 | 3 | 1 | 0.1381 |
| MS17 | Sistema agroforestal | 1981.8502 | 2.98 | 3 | 1 | 0.1182 |
| MS18 | Sistema agroforestal | 3008.1942 | 3.84 | 3 | 1 | 0.1821 |
| MS19 | Granos básicos | 2483.4000 | 3.87 | 4 | 3 | 0.2475 |
| MS20 | Granos básicos | 2687.1637 | 4.01 | 4 | 2 | 0.2278 |
| MS21 | Pasto | 3555.0468 | 7.19 | 4 | 3 | 0.2296 |
| MS22 | Pasto | 3081.0650 | 5.17 | 4 | 3 | 0.2596 |
| MS23 | Pasto | 675.6750 | 3.39 | 4 | 4 | 0.1553 |

Continuación cuadro 7.

| Código | | M | a | b | c | K |
|--------|-------------|-----------|------|---|---|--------|
| MS24 | Pasto | 1427.2640 | 5.13 | 4 | 3 | 0.1575 |
| MS25 | Arroz | 583.0002 | 3.50 | 4 | 2 | 0.0848 |
| MS26 | Arroz | 484.9812 | 3.69 | 4 | 2 | 0.0780 |
| MS27 | Pasto | 320.7750 | 2.66 | 4 | 4 | 0.1342 |
| MS28 | Bosque ralo | 1502.3788 | 4.90 | 4 | 2 | 0.1325 |
| MS29 | Arroz | 242.8839 | 3.97 | 4 | 2 | 0.0634 |
| MS30 | Arroz | 581.1688 | 2.31 | 4 | 2 | 0.0892 |

5.3. Comportamiento de la erodabilidad en los suelos

La erodabilidad es influenciada por los factores de formación de suelos. El presente estudio evidencia que los valores de erodabilidad ($t \cdot ha \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$) calculado fue significativamente diferente entre los elementos: localización, orden, gran grupo, uso y estructura del suelo (Figura 2).

En los diagramas de caja de la Figura 2 el eje Y representa los índices de erodabilidad ($t \cdot ha \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$). En el gráfico 2A en el eje X se tienen los municipios donde se desarrolló la investigación (Diriá, Granada, León, Nindirí, Niquinohomo, Telica y Tipitapa), en el 2B el eje X corresponde a los órdenes de suelo estudiados (Andisols, Mollisols y Vertisols) y en el 2C en el eje X se encuentran los grandes grupos de suelo (*Durustolls*, *Haplustands*, *Haplusterts* y *Ustivitrands*).

Por otro lado, en el gráfico 2D en el eje de las abscisas se muestran los usos de suelo (arroz, bosque ralo, granos básicos, maní, pastos y sistemas agroforestales) y en el grafico 2E, las estructuras del suelo encontradas en los sitios estudiados (bloque, granular fina, granular de media a gruesa y masiva).

Al comparar la erodabilidad con las localizaciones se encontraron diferencias significativas ($p = 0.0045$), los mayores valores de K corresponden al municipio de Nindirí y los menores al municipio de Tipitapa. En el caso de la erodabilidad con el orden de suelo hay diferencias altamente significativas ($p = 0.0006$) siendo los mayores valores de erodabilidad los del orden Mollisol y los menores los del orden Vertisol.

Al determinar los valores de K por cada gran grupo, se observaron diferencias altamente significativas ($p = 0.001$), presentando el suelo *Durustolls* la mayor erodabilidad y el *Haplusterts* el menor valor de K . Por otro lado, el uso de suelo con la erodabilidad presenta diferencias significativas ($p = 0.0296$), los mayores valores corresponden al uso pasto y los menores al uso cultivo de arroz.

Al contrastar la erodabilidad con la estructura del suelo se evidencia que hay diferencias altamente significativas ($p = 0.0004$), dicha diferencia está dada por los mayores valores de K en suelos con estructuras en bloques y los menores en suelos con estructuras masivas.

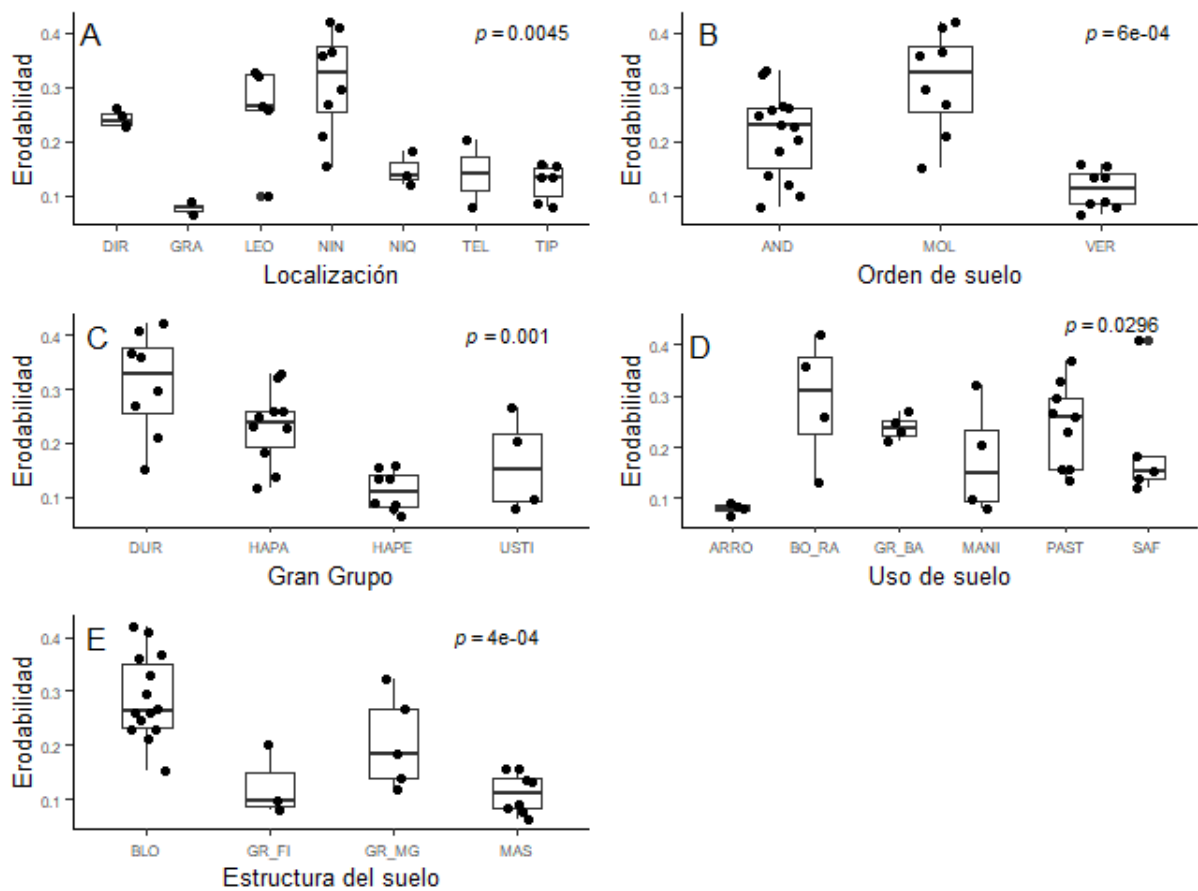


Figura 2. Comparación de la Erodabilidad en función de A. Localización (DIR: Diriá, GRA: Granada, LEO: León, NIN: Nindirí, NIQ: Niquinohomo, TEL: Telica y TIP: Tipitapa), B. Orden de suelo (AND: Andisoles, MOL: Mollisoles y VER: Vertisoles), C: Gran Grupo (DUR: Durustolls, HAPA: Haplustands, HAPE: Haplusterts y USTI: Ustivitrands), D: Uso de suelo (ARRO: Arroz, BO_RA: Bosque ralo, GR_BA: Granos básicos, MANÍ, PAST: Pasto, SAF: Sistemas agroforestales) y E: Estructura del suelo (BLO: Bloque, GR_FI: Granular fina, GR_MG: Granular de media a gruesa y MAS: Masiva) en los suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua, 2021-2022.

Ramírez et al. (2009) menciona que,

El factor K representa el grado de resistencia natural que ofrece el suelo a ser erosionado, al actuar sobre éste los otros factores erosivos. Este factor refleja el hecho que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas, cuando los demás factores que afectan la erosión son los mismos (p. 59).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio, los suelos menos susceptibles a la erosión hídrica son aquellos localizados en las planicies de Tipitapa, con presencia de arcillas pesadas del tipo 2:1 y clasificados taxonómicamente como Vertisols (gran grupo *Haplusterts*), algunos de ellos utilizados para cultivos de arroz o pasturas. Estos suelos presentan estructuras prismáticas (masivas), lo que permite mayor cohesión frente a la energía de la gota de lluvia para ser destruidos y arrastrados por las escorrentías.

Por otro lado, los suelos más erodables son los suelos jóvenes que presentan un horizonte mollico, en el orden Mollisols y gran grupo *Durustolls*, con sistemas de estructuras en bloques, los cuales independiente al uso que se les dé siempre presentan mayor susceptibilidad ya sea en cultivos de pasto, bosque ralo, granos básicos y sistema agroforestal.

5.4. Incidencia de las propiedades biofísicas en la erodabilidad del suelo

En la matriz de correlaciones (figura 3) los histogramas que están sobre la diagonal representan la distribución de los datos de cada una de variables, sobre la diagonal están los Coeficientes de Correlación de Spearman y debajo de la diagonal los gráficos de puntos. Las variables analizadas son limo (%), arena muy fina (ArenaMF, %), arcilla (%), permeabilidad superficial (Permeab, $mm \cdot h^{-1}$), materia orgánica (MO, %) y erodabilidad (K, $t \cdot ha \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$).

En el panel que convergen el porcentaje de limo y la erodabilidad se observa una correlación positiva, esto se confirma con el Coeficiente de Correlación de Spearman; además, el mismo indica que la relación es moderadamente fuerte ($r_s = 0.69$) y altamente significativa ($p \leq 0.001$).

También, en el panel que coinciden el porcentaje de arena muy fina y la erodabilidad se observa una correlación positiva, esto se confirma con el Coeficiente de Correlación de Spearman, el mismo indica que la relación es moderada ($r_s = 0.43$) y significativa ($p \leq 0.05$).

Asimismo, en el panel donde se unen la permeabilidad superficial y la erodabilidad se observa una correlación negativa, confirmado con el Coeficiente de Correlación de Spearman, que indica que la relación es moderada ($r_s = 0.46$) y significativa ($p \leq 0.05$).

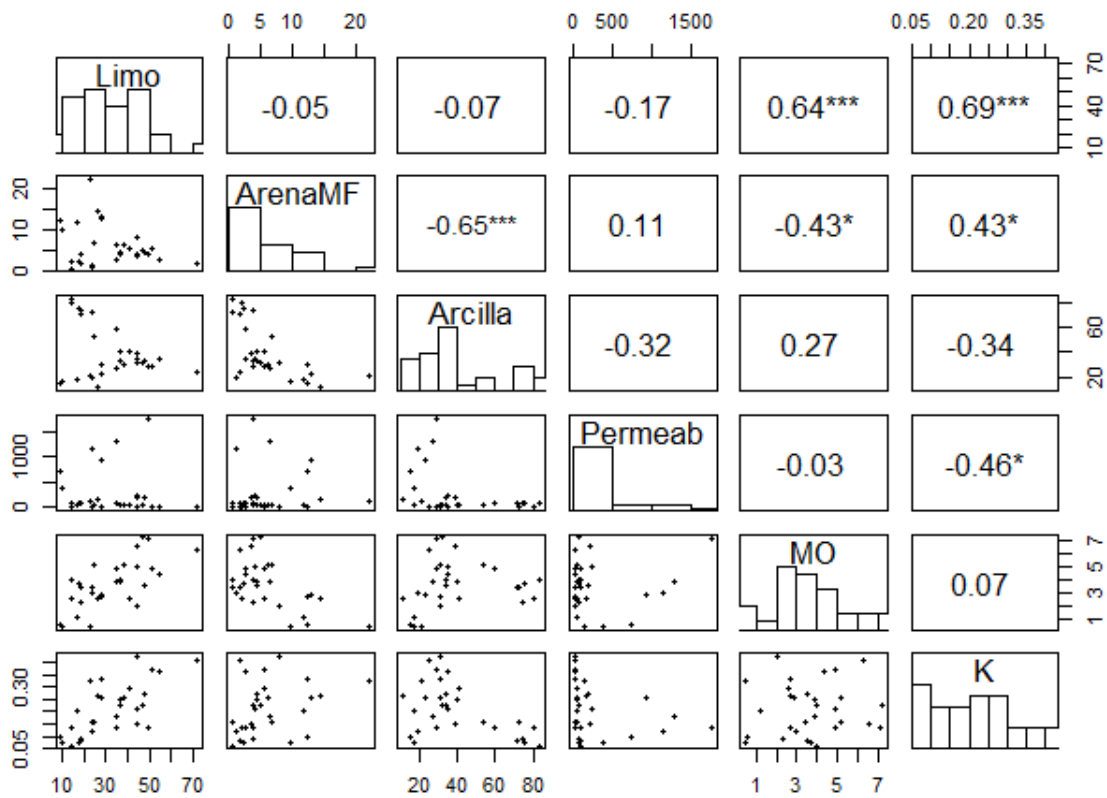


Figura 3. Correlación entre las variables % Limo, % Arena Muy Fina (ArenaMF), % Arcilla, Permeabilidad ($mm \cdot h^{-1}$, Permeab), Materia Orgánica (% MO) y Erodabilidad ($t \cdot ha \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$, K). En la diagonal, histograma representando la distribución de cada variable; sobre la diagonal se presenta los valores de correlación (significancia representada con los asteriscos); bajo la diagonal gráficos de dispersión para cada par de variable. Suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región Pacífica de Nicaragua, 2021-2022.

Con los análisis de correlación de Spearman se encontró que en los suelos de la región del Pacífico de Nicaragua la permeabilidad superficial es influyente en la disminución del valor de la erodabilidad. Dado que a mayor velocidad de movimiento del agua en el suelo el riesgo a la erosión disminuye y por tanto, el valor de K tiende a ser menor.

Por otro lado, el porcentaje de limo y de arena muy fina tienen un valor de correlación alto con respecto al incremento de la erodabilidad. Dichas partículas son livianas y móviles, lo que facilita el arrastre de estas por agentes erosivos; así como también sellan la superficie, reducen el espacio poroso, son poco cohesionables y disminuyen el paso del agua en el suelo.

La susceptibilidad de los suelos frente a la erosión estará marcada por el poder de adhesión de sus partículas constituyentes y por su capacidad de infiltración. Los suelos sensibles a la erosión serán aquellos que tengan sus partículas débilmente unidas y con una permeabilidad muy baja (Cantero, 2021).

En los suelos estudiados la materia orgánica no es influyente en la erodabilidad, esto debido a que la fracción de la materia orgánica que agrega más material orgánico es el humus. En los suelos volcánicos dicha fracción es la más degradada, por lo que las partículas están menos agregadas. Por tanto, estos datos muestran una variabilidad en los contenidos de materia orgánica que no pueden definir un patrón en este estudio.

Corbella y Fernández (s. f.) detallan que,

El término general materia orgánica del suelo comprende todos los componentes orgánicos de un suelo: biomasa viva, raíces muertas y otros vegetales, una mezcla predominante amorfa y coloidal de sustancias orgánicas complejas que ya no pueden identificarse como tejidos, esta última categoría de material orgánico recibe el nombre de humus (p. 5).

Las sustancias húmicas comprenden alrededor del 60 a 80% de la materia orgánica del suelo. Están constituidas por moléculas enormes con estructura y composición más bien variables que específicas. Son sustancias de color oscuro, amorfas y debido a su complejidad, son los materiales orgánicos más resistentes al ataque microbiano (p. 6).

Las partículas de arcillas no son significativas en la erodabilidad, porque la mineralogía de las arcillas en estos suelos es variante. Partimos de arcillas del tipo 2:1 (montmorillonita) a las amorfas del tipo alófanas. La variabilidad de su mineralogía no contribuye a fijar una tendencia que relacione a estas con la erosionabilidad.

De acuerdo con Bornemisza y Pineda (1969) “se muestra una relación inversa entre la mineralización de la materia orgánica y el contenido de alófana” (citado por Sánchez, 1981, p. 172).

Sánchez (1981) enuncia que,

Los Vertisoles, Molisoles y Andisoles tienen familia mineralógicas montmoriloníticas, vermiculitas, cloríticas, ílticas, carbonáticas, silíceas o mezcladas. Tales familias tienen en primer lugar carga permanente con un pequeño grado de carga variable derivada de su contenido de materia orgánica (p. 142).

5.5. Propuesta del modelo de erodabilidad para suelos Andisoles, Molisoles y Vertisoles del Pacífico de Nicaragua

Para predecir las pérdidas de suelo por erosión hídrica comúnmente se han utilizado ecuaciones o modelos, dentro de los cuales está la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS), la cual es la más conocida y permite estimar las pérdidas de suelo por erosión. Algunos factores de la ecuación han tenido algún tipo de modificación de acuerdo al lugar donde se estudien, debido a las condiciones propias del medio (Ramírez et al., 2009).

Con el fin de tener una aproximación certera de la erodabilidad en suelos Andisoles, Molisoles y Vertisoles de la región del Pacífico se generó un modelo de Regresión Lineal Múltiple para la determinación de los valores de la erodabilidad (Figura 4).

```

> REG3 <-lm(K ~ ., data = Datos6)
> REG3 %>% summary()

Call:
lm(formula = K ~ ., data = Datos6)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.066463 -0.018270 -0.002312  0.019204  0.058826

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -6.078e-02  4.108e-02  -1.479  0.153872
Limo         7.640e-03  6.739e-04  11.337  2.06e-10 ***
ArenaMF     1.232e-02  2.441e-03   5.049  5.34e-05 ***
MO          -2.610e-02  6.694e-03  -3.899  0.000826 ***
Permeab     -5.580e-05  2.028e-05  -2.752  0.011953 *
EEA          1.074e-03  3.877e-04   2.770  0.011467 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.03592 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9002, Adjusted R-squared:  0.8764
F-statistic: 37.86 on 5 and 21 DF,  p-value: 8.166e-10

```

Figura 4. Modelo de Regresión Lineal Múltiple propuesto para determinar la erodabilidad en suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico

- a. El modelo de regresión generado en esta investigación (Figura 4), demuestra que las cinco variables (porcentaje de limo, porcentaje de arena muy fina, contenido de materia orgánica, estabilidad estructural de los agregados y permeabilidad superficial), son altamente significativas para predecir el valor de la erodabilidad (K) para los suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua. Lo cual se demuestra con un valor de F estadístico de $p - value = 8.166 \times 10^{-10}$.
- b. De acuerdo con el coeficiente de determinación ajustado para este modelo (Figura 4) con 87.64 % de la variabilidad es predicho el valor de la erodabilidad, tomando en cuenta las cinco variables antes mencionada.
- c. Finalmente, en el análisis de los coeficientes del modelo de Regresión Lineal Múltiple son significativos para: porcentaje de limo, porcentaje de arena muy fina, contenido de materia

orgánica y permeabilidad superficial; con valores de probabilidades $Pr(> |t|) = 2.06 \times 10^{-10}, 5.34 \times 10^{-5}, 8 \times 10^4, 12 \times 10^2$ y 11×10^2 , respectivamente. Estos resultados confirman el supuesto bajo el cual se propone el modelo y demuestra que estas variables si contribuyen significativamente a la predicción del valor de la erodabilidad.

- d. La construcción del modelo identifica los diferentes interceptos para cada variable determinados en el análisis estadístico realizado con el lenguaje del software Rstudio (ec. 3), fueron transformados al lenguaje matemático (ec.4) previo a validarlo al calcular las predicciones de K con los datos obtenidos en campo y laboratorio. La simbología de las variables se detalla a continuación.

$$K = -6.08e - 2 + 7.64e - 3(Limo) + 1.23e - 2(ArenaMF) + (-2.61e - 2(MO)) + (-5.6e - 5(Permeab)) + 1.1e - 3(EEA) \quad (ec. 3)$$

Finalmente,

$$K = -0.0608 + 0.0076(a) + 0.0123(b) - 0.0261(c) - 0.000056(d) + 0.0011(e) \quad (ec. 4)$$

donde

K : erodabilidad ($t \cdot ha \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$)

a : porcentaje de limo (%)

b : porcentaje de arena muy fina (%)

c : porcentaje de materia orgánica (%)

d : permeabilidad superficial ($mm \cdot h^{-1}$)

e : estabilidad estructural de los agregados (%)

La figura 5A es la representación gráfica del modelo de Regresión Lineal Múltiple entre la erodabilidad que se generó del Modelo Lineal Múltiple creado (eje x) y la erodabilidad determinada con la ecuación de regresión modificada de Wischmeier & Smith (eje y).

Las figuras 6B – 6F son las representaciones gráficas de los modelos de Regresión Lineal Simple entre la erodabilidad predicha (eje y) y el porcentaje de limo (5B), porcentaje de arena muy fina (5C), porcentaje de materia orgánica (5D) y permeabilidad superficial (5E), porcentaje de estabilidad estructural de los agregados (5F), respectivamente en los ejes x .

En la representación gráfica del modelo de Regresión Lineal Múltiple se aprecia que los puntos están cerca de la línea de regresión, por lo que el modelo cumple con un alto valor de predicción de la erodabilidad (factor K). El modelo es altamente significativo ($p = 8.166 \times 10^{-10}$) y el coeficiente de determinación múltiple ajustado alto ($R^2 = 0.8764$).

En el gráfico 5B se observa un modelo de regresión ajustado entre la variable dependiente erodabilidad (factor K) y la variable independiente porcentaje de limo, lo que representa una buena relación entre las variables ($R^2 = 0.4545$) y un valor predictivo altamente significativo para estimar la erodabilidad a partir del limo ($p = 2.653 \times 10^{-5}$) (Anexo 13).

La erodabilidad no se puede predecir a través del porcentaje de arena muy fina ni del porcentaje de materia orgánica por sí solas (figura 5C y 5D), ya que los coeficientes de determinación son bajos 0.0599 para el porcentaje de arena muy fina y -0.0289 para el porcentaje de materia orgánica; así como también baja significancia ($p = 0.1026$ y 0.6702), respectivamente (Anexo 14 y 15).

Las relaciones de la erodabilidad con la permeabilidad superficial y con el porcentaje de estabilidad estructural de los agregados son bajas ($R^2 = 0.0445$ y 0.0616) y no es significativa ($p = 0.1364$ y 0.0994), respectivamente (Anexo 16 y 17).

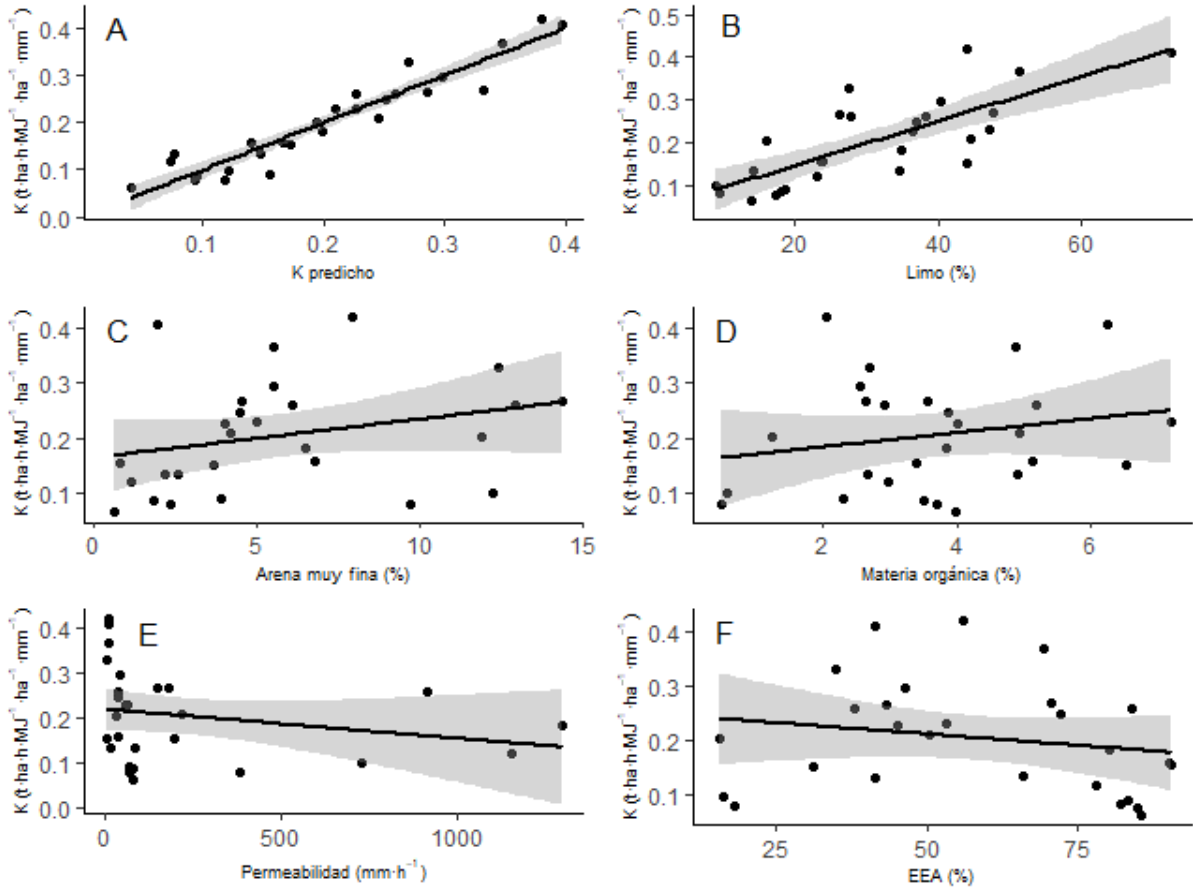


Figura 5. Modelos de regresión lineales de la Erodabilidad (K) con % limo, % arena muy fina, % materia orgánica, permeabilidad superficial ($mm \cdot h^{-1}$) y porcentaje de estabilidad estructural de los agregados (EEA). A. Regresión Lineal Múltiple; B – F. Regresiones Lineales Simples para cada variable independiente por individual. Suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua, 2021-2022.

Los modelos de Regresión Lineal Simple de cada variable indican que solamente el limo tiene el poder predictivo para la erodabilidad; en cambio el porcentaje de arena muy fina, porcentaje de materia orgánica, permeabilidad superficial y estabilidad estructural de los agregados no tienen las características para poder predecir con precisión el factor K. Sin embargo, las cinco variables en el modelo de Regresión Lineal Múltiple son significativas, consistente y con alto poder de determinación de la erodabilidad.

5.6. Validación del modelo de Regresión Lineal Múltiple propuesto

Basado en el modelo generado se calcularon los valores de erodabilidad, a partir de los datos de campo y laboratorio (Cuadro 8). El 50% de los datos alcanzaron valores mayores con el modelo propuesto en comparación con el modelo de Wischmeier y Smith (1978). Dichas diferencias son observadas en los tres órdenes de suelo (Mollisoles, Andisoles y Vertisoles) y podrían estar relacionadas a los márgenes de permeabilidad superficial establecidos en el modelo de Wischmeier, que omiten valores altos de permeabilidad que se dan en suelos volcánicos. Por otro lado, se asume una estabilidad estructural en el modelo de Wischmeier basada en el tipo de estructura y no en su porcentaje de estabilidad estructural de los agregados a como se considera en el modelo propuesto.

Cuadro 8. Valores de erodabilidad (K) determinados a partir del modelo propuesto

| Código | Gran grupo | a (%) | b (%) | c (%) | d ($mm \cdot h^{-1}$) | e (%) | K |
|--------|---------------------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|--------|
| MS1 | <i>Ustivitrands</i> | 9.16 | 12.24 | 0.58 | 729.8 | 16.35 | 0.1213 |
| MS2 | <i>Ustivitrands</i> | 26.22 | 14.38 | 2.64 | 152.7 | 43.19 | 0.2854 |
| MS3 | <i>Haplustands</i> | 27.94 | 12.93 | 2.91 | 914.9 | 37.96 | 0.2251 |
| MS4 | <i>Haplustands</i> | 27.60 | 12.44 | 2.70 | 7.3 | 34.79 | 0.2693 |
| MS5 | <i>Haplustands</i> | 22.71 | 21.95 | 0.50 | 134.4 | 14.88 | 0.3775 |
| MS6 | <i>Ustivitrands</i> | 9.70 | 9.74 | 0.50 | 383.5 | 18.01 | 0.1180 |
| MS7 | <i>Ustivitrands</i> | 16.32 | 11.89 | 1.23 | 33.9 | 15.65 | 0.1927 |
| MS8 | <i>Durustolls</i> | 44.06 | 7.93 | 2.04 | 13.8 | 56.10 | 0.3792 |
| MS9 | <i>Durustolls</i> | 40.51 | 5.54 | 2.56 | 42.4 | 46.28 | 0.2969 |
| MS10 | <i>Durustolls</i> | 54.62 | 2.71 | 4.38 | 16.2 | 16.58 | 0.2907 |
| MS11 | <i>Durustolls</i> | 51.42 | 5.53 | 4.86 | 15.5 | 69.36 | 0.3466 |
| MS12 | <i>Durustolls</i> | 72.37 | 1.97 | 6.25 | 13.0 | 41.48 | 0.3952 |
| MS13 | <i>Durustolls</i> | 43.94 | 3.67 | 6.52 | 200.8 | 31.30 | 0.1713 |
| MS14 | <i>Durustolls</i> | 44.6 | 4.21 | 4.93 | 220.3 | 50.37 | 0.2443 |
| MS15 | <i>Durustolls</i> | 47.62 | 4.55 | 3.55 | 180.6 | 70.66 | 0.3320 |
| MS16 | <i>Haplustands</i> | 49.92 | 3.87 | 7.12 | 1756.8 | 56.55 | 0.1442 |
| MS17 | <i>Haplustands</i> | 23.21 | 1.17 | 2.98 | 1150.6 | 78.00 | 0.0736 |
| MS18 | <i>Haplustands</i> | 34.82 | 6.49 | 3.84 | 3296.3 | 80.07 | 0.0869 |
| MS19 | <i>Haplustands</i> | 36.91 | 4.48 | 3.87 | 39.0 | 72.18 | 0.2510 |
| MS20 | <i>Haplustands</i> | 36.56 | 4.05 | 4.01 | 64.2 | 45.18 | 0.2083 |
| MS21 | <i>Haplustands</i> | 47.03 | 4.99 | 7.19 | 60.8 | 53.34 | 0.2256 |

Continuación cuadro 8

| Código | Gran grupo | a (%) | b (%) | c (%) | d ($mm \cdot h^{-1}$) | e (%) | K |
|--------|--------------------|----------|----------|----------|----------------------------|----------|--------|
| MS22 | <i>Haplustands</i> | 38.20 | 6.10 | 5.17 | 41.3 | 83.80 | 0.2595 |
| MS23 | <i>Haplusterts</i> | 23.74 | 0.83 | 3.39 | 10.0 | 90.44 | 0.1403 |
| MS24 | <i>Haplusterts</i> | 24.00 | 6.76 | 5.13 | 40.0 | 90.12 | 0.1677 |
| MS25 | <i>Haplusterts</i> | 18.35 | 1.83 | 3.50 | 83.0 | 82.09 | 0.0955 |
| MS26 | <i>Haplusterts</i> | 17.51 | 2.35 | 3.69 | 3770.7 | 84.99 | 0.0943 |
| MS27 | <i>Haplusterts</i> | 14.26 | 2.19 | 2.66 | 16.0 | 65.94 | 0.0767 |
| MS28 | <i>Haplusterts</i> | 34.55 | 2.61 | 4.90 | 1824.4 | 41.35 | 0.1464 |
| MS29 | <i>Haplusterts</i> | 14.25 | 0.66 | 3.97 | 81.0 | 85.46 | 0.0415 |
| MS30 | <i>Haplusterts</i> | 18.74 | 3.90 | 2.31 | 69.0 | 83.20 | 0.1570 |

Nota. a: porcentaje de limo, b: porcentaje de arena muy fina, c: porcentaje de materia orgánica, d: permeabilidad superficial ($mm \cdot h^{-1}$) y e: porcentaje de estabilidad estructural de los agregados.

VI. CONCLUSIONES

La erodabilidad en los suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la región del Pacífico de Nicaragua incrementa a medida que aumentan los porcentajes de limo y de arena muy fina. Sin embargo, esta erodabilidad es afectada por la disminución de las tasas de permeabilidad superficial de agua en el suelo. Es decir, a medida que aumenta la permeabilidad disminuye el valor de la erodabilidad.

El modelo de regresión generado $K = -0.0608 + 0.0076(a) + 0.0123(b) - 0.0261(c) - 0.000056(d) + 0.0011(e)$, encontró que las variables, porcentaje de limo (a), porcentaje de arena muy fina (b), contenido de materia orgánica (c), permeabilidad superficial (d) y estabilidad estructural de los agregados (e), presentaron alto y significativo poder predictivo para determinar el valor de la erodabilidad (K) para los suelos Andisoles, Mollisoles y Vertisoles de la Región del Pacífico de Nicaragua.

VII. RECOMENDACIONES

1. Realizar modelos de Regresión Lineal Múltiple para predecir la erodabilidad (factor K) en los cuales se consideren:
 - i) Los órdenes Alfisoles y Entisoles de la región del Pacífico de Nicaragua.
 - ii) Las características adhesivas de las arcillas minerales presentes en los suelos de la región del Pacífico de Nicaragua (alófanos, montmorillonitas, etc.).
 - iii) El porcentaje de humus presente, como un elemento influyente en la formación de agregados.
 - iv) El contenido de carbonatos de calcio, principalmente en los suelos Vertisoles por influencia en la agregación del suelo.
2. Dar a conocer los resultados obtenidos a asociaciones de productores de la región del Pacífico, para motivarlos a introducir prácticas de conservación que disminuyan la susceptibilidad de los suelos a la erosión.
3. Agregar los contenidos de Regresión Lineal Múltiple y el uso de algún software estadístico en el módulo de Estadística Aplicada a la Ingeniería Agrícola, cuando se realice alguna reforma curricular a los Programas Modulares Silábicos.

VIII. LITERATURA CITADA

- Abarzúa Muñoz, A. C. (2017). *Evaluación de la erodabilidad de algunos suelos de Chile de uso actual forestal mediante índices basados en propiedades del suelo de fácil medición* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio académico <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151383/Evaluacion-de-la-erodabilidad-de-algunos-suelos-de-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Alboukadel Kassambara (2020). *ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots*. R package version 0.4.0. <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>
- Aravind Hebbali (2020). *olsrr: Tools for Building OLS Regression Models*. R package version 0.5.3. <https://CRAN.R-project.org/package=olsrr>
- Baptiste Auguie (2017). *gridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics*. R package version 2.3. <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>
- Cairo Cairo, P. y Fundora Herrera, O. (1994). *Edafología*. Pueblo y Educación (2. Ed.).
- Cantero Benitez, M. (2021). *Erosión hídrica*. <https://www.studocu.com/co/.document/universidad-pontificia-bolivariana/sistemas-de-gestion/erosion-hidrica/14052684>
- Céspedes, C. y Millas, P. (mayo, 2015). Relevancia de la materia orgánica del suelo. Boletín INIA – Instituto de Investigaciones Agropecuarias no 308. <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/>
- Corbella, R. y Fernandez de Ullivarri, J. (s. f.). *Materia orgánica del suelo*. <https://www.Edafologia.org/app/.download/7953479876/.Materia+Organica+del+Suelo.pdf?t=1563476239> (recuperado 6 de agosto de 2022)
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y Servicio de Conservación de Recursos Naturales (2014). *Claves para la taxonomía de suelos*. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Diccionario Multilingüe de la Ciencia del Suelo (2021). *Calidad, evaluación, degradación y protección de suelos*. <https://cit.iec.cat/DMCSE/default.asp>
- Eijkelkamp Soil & Water. (2018). *Manual Aparato de tamizado húmedo*. <https://sp.eijkelkamp.com/productos/equipos-de-laboratorio/especificaciones-tecnicas-estabilidad-de-los-agregados.html>
- Enriquez, A. y Cremona, V. (2019). *La importancia de analizar el suelo: el análisis de granulometría y el efecto de la ceniza volcánica*. <https://core.ac.uk/download/pdf/335289769.pdf>
- Gámez Morales, W. R. (1989). *Evaluación de índices de erodabilidad a través de pérdidas de suelo, mediante un mini – simulador de lluvia* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/2564/1/.tnp36g187.pdf>

- Gisbert Blanquer, J. M., Ibáñez Asensio, Sara. y Moreno Ramón, H.(2012). *El factor K de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE)*.
<file:///H:/%C3%ADndice%20de%20erodabilidad%20-%20factor%20K/ERODABILIDAD/AD%20%20K%20USLE.pdf>
- GLOSOLAN (2019). Procedimiento operativo estándar para el análisis de carbono orgánico del suelo Walkley – Black. <https://www.fao.org/3/ca7471es/ca7471es.pdf>
- González Espino, C. J. y Pozo Molina, G. J. (2007). *Evaluación de la erosión hídrica en el sistema productivo de café (Coffea arábica L.) de la Finca El Jardín y el efecto del uso y manejo de la tierra en la Quebrada del Río El Cairo, Managua, Nicaragua* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria]. *Repositorio Institucional*.
<https://repositorio.una.edu.ni/1104/1/.tnp36g643.pdf>
- González, M. (1991). *La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo: Pasado, Presente y Futuro*.
http://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_05_02_tcm30-100846.pdf&ved=2ahUKEwjWtKP9pcfxAhWIkmoFHd2cDDoQFjANegQILhAC&usg=AOvVaw14asvUWACxpmeRlzbm3PU
- Grossman R. B. (1987). *Methods Appendix: Agronomically-Related Soil Survey Characterization Procedures*. Soil Scientist, NSSL; Lincoln, NE.
- Gutiérrez Aguilar, I. C. (2020). *Erosión hídrica superficial en la microcuenca del río Mancotal en Jinotega, Nicaragua. 1996-2015* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Ribuni
<http://ribuni.uni.edu.ni/3605/1/Tesis%20isolina%20%2010%20OCTUBRE%20T-2020.pdf>
- H. Wickham. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016.
- Hadley Wickham, Romain François, Lionel Henry and Kirill Müller (2022). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.0.8. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- InfoAgronomo (2020). *¿Qué es la estructura del suelo?* <https://infoagronomo.net/que-es-la-estructura-del-suelo/>
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (2021). *1^{er} atlas nacional de la República de Nicaragua 2021*. INETER – DGOT.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2019). *Descripción breve y nemotecnia de la clasificación taxonómica de los suelos de Nicaragua*.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2019). *Precipitaciones, temperaturas media mínima y máxima anual*.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2021). *Primer atlas Nacional de Suelos de la República de Nicaragua*. Clasificación taxonómica de los suelos.

- John Fox and Sanford Weisberg (2019). *An {R} Companion to Applied Regression*, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage.
<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Kamil Slowikowski (2021). *ggrepel: Automatically Position Non-Overlapping Text Labels with 'ggplot2'*. R package version 0.9.1. <https://CRAN.R-project.org/package=ggrepel>
- Mendoza Corrales, R. B. & Cassel, D. K. (2002). *Hedgerows and Their Effects on Crop Productivity and Soil Loss Induced by Water and Tillage Erosion on Small Runoff Plots in the El Pital Watershed, Nicaragua*
- Ministerio de Economía, Industria y Comercio y Ministerio de Agricultura y Ganadería (1971). *Levantamiento de Suelos de la Región Pacífica de Nicaragua*. Parte 3, Génesis y clasificación de suelos
- Monigamer, D. C. (2001). *Introducción al análisis de regresión lineal*. Grupo Patria Cultural S.A.
- Murillo Malespín, G. U. (1990). *Erodabilidad de cuatro series de suelos determinada por el mini – simulador de lluvia y el nomograma de Wischmeier* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria]. *Repositorio Institucional*.
<https://repositorio.una.edu.ni/1591/1/.tnp36m977.pdf>
- Nilo, G. (octubre, 2019). *Procedimiento operativo estándar para el análisis de carbono orgánico del suelo: Walkley – Black* [GLOSOLAN].
<http://www.fao.org/3/ca7471es/ca7471es.pdf>
- Ogle, D.H., J.C. Doll, P. Wheeler, and A. Dinno. 2022. *FSA: Fisheries Stock Analysis*. R package version 0.9.3, <https://github.com/fishR-Core-Team/FSA>.
- Organización de las Naciones Unidas (FAO, s.f.). *Estructura del suelo*.
https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm#:~:text=La%20estructura%20del%20suelo%20se,mayores%20y%20se%20denominan%20agregados%20
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO, 2019). *Textura del suelo*.
http://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO, s.f.). *Erosión y pérdida de fertilidad del suelo*. <http://www.fao.org/3/t2351s/T2351S06.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO, s.f.). *Permeabilidad del suelo*.
http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

- Pellegrini, A. (2019). *Textura y color del suelo*.
https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42831/mod_resource/content/1/TEMA%203%20-%20TEXTURA%20Y%20COLOR.pdf
- R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- R Core Team (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Version 4.2.1. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez Ortiz, F. A., Hincapié Gómez, E. y Sadeghian Khalajabadi, S. (2009). Erodabilidad de los suelos de la Zona Central Cafetalera del Departamento de Caldas. *Cenicafé*, 60 (1), 58-71. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/157/1/arc060%2801%1958-71.pdf>
- Ramírez-Ortiz, F. A., Hincapié-Gómez, E. y Sadeghian-Khalajabadi, S. (2009). Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetalera del departamento de Caldas. *Cenicafé*, 60(1):58-71.
<http://biblioteca.cenicafe.org/jspui/bitstream/10778/157/1/arc060%2801%2958-71.pdf>
- Revelle, W. (2022) *psych: Procedures for Personality and Psychological Research*, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, <https://CRAN.R-project.org/package=psych> Version = 2.2.5.
- RStudio Team (2022). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>.
- Sánchez, P. A. (1981). *Suelos del trópico: características y manejo*. IICA (1. ed.)
- Universidad Nacional de la Plata (2019). Estructura y estabilidad estructural del suelo. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42966/mod_resource/content/1/TEMA%206%20-%20ESTRUCTURA%20Y%20ESTABILIDAD%20ESTRUCTURAL%2026-3-19.pdf
- USDA (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*.
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf
- Yuan Tang, Masaaki Horikoshi, and Wenxuan Li. "ggfortify: Unified Interface to Visualize Statistical Result of Popular R Packages." *The R Journal* 8.2 (2016): 478-489.

IX. ANEXOS

Anexo 1. Metodología para determinar la textura – tamaño de partícula (%) con el método de Pipeta (código LABSA-FS-P03)

1. Pese 20 g de suelo tamizado ($< 2\text{ mm}$), previamente secado al aire.
2. Traslade la muestra de suelo a un beaker de 600 mL. Realice un blanco y un control.
3. Añada 25 mL de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 30 %, para la destrucción de la materia orgánica.
4. Tape con vidrio de reloj y deje en reposo durante 18 horas.
5. Si se produce efervescencia brusca, enfríe; sino caliente suavemente sobre una placa caliente. Repita el tratamiento con sucesivas porciones de H_2O_2 , hasta que el calentamiento no produzca reacción.
6. Agregue 50 mL de hexametáfosfato de sodio ($NaPO_3$)₆ y deje en reposo durante 8 horas.
7. Agite durante la noche.
8. Pase la suspensión por un tamiz de 53 μm , para separar la arena.
9. En un beaker debidamente tarado e identificado agregue la arena y póngalo en el horno a una temperatura de 105 °C durante 48 horas.
10. Saque la muestra del horno, colóquela en un desecador y enfríe a temperatura ambiente.
11. Pese el beaker + arena y anótelo.
12. La suspensión restante colóquela en una probeta de 1000 mL y afore.
13. Agite la suspensión con el émbolo durante 50 segundos.
14. Introduzca la pipeta de Robinson hasta la mitad de la probeta y tome 10 mL de la suspensión, colóquelo en otro beaker (previamente pesado). Enjuague la pipeta.
15. Deje la suspensión en reposo durante 5 y $\frac{1}{2}$ horas.
16. Introduzca la pipeta en la suspensión a una profundidad de acuerdo a la temperatura y tome 10 mL de la suspensión, colóquelo en otro beaker (previamente pesado). Enjuague la pipeta.
17. Coloque los dos beakers con sus contenidos en el horno a 105°C hasta obtener un peso constante.
18. Saque las muestras del horno, colóquelas en un desecador y enfríe a temperatura ambiente.
19. Pese la muestra y anótelo (beaker + contenido).

20. La arena total se pasa por el juego de tamices para separar arena muy gruesa (1,00 mm), arena gruesa (0,50 mm), arena media (0,25 mm), arena fina (0,125 mm) y arena muy fina (0,063 mm).

Cálculos

$$\text{Peso del suelo} = (2 + 3) - 5$$

$$\% \text{ arena} = \left(\frac{2}{\text{peso del suelo}} \right) \times 100$$

$$\% \text{ limo} = \left(\frac{3 - 4}{\text{peso del suelo}} \right)$$

$$\% \text{ arcilla} = \left(\frac{4 - 5}{\text{peso del suelo}} \right)$$

donde,

2: peso de la arena

3: peso de la arcilla + limo + sal (corregido)

4: peso de la arcilla corregida

5: peso de la sal corregida

Anexo 2. Metodología para determinar el porcentaje de materia orgánica con el método GLOSOLAN-SOP-02 (GLOSOLAN, 2019).

4. Pese 0.5 g de muestra de suelo tamizado (< 0.5 mm) previamente seco.
5. Vierta cada muestra pesada en un matraz Erlenmeyer de 500 mL.
6. Tome con una pipeta un volumen exacto de 10 mL de la solución de $K_2Cr_2O_7$ 1.00 N y se transfiere al Erlenmeyer, homogenice.
7. Tome con una pipeta un volumen exacto de 20 mL de H_2SO_4 concentrado y se transfiere rápidamente dirigiendo el ácido hacia la mezcla del suelo con el dicromato, agite inmediatamente de forma vigorosa y deje reposar durante 30 min en una campana de gases.
8. Conjuntamente con las muestras se prepara un blanco con 10 mL de $K_2Cr_2O_7$ y 20 mL H_2SO_4 concentrado, y se procede de la misma forma que lo indicado para las muestras.
 1. Pasado el tiempo establecido, añada 200 mL de agua destilada al Erlenmeyer.
 2. En una bureta vierta la solución de Sal de Mohr que se utilizará como agente titulante.
 3. Adicione 3 – 4 gotas de indicador de o-fenantrolina-ferrosa al matraz Erlenmeyer (homogenice).
 4. Proceda a la titulación gota a gota. Cuando el punto final se aproxima, la solución toma un color verdusco y luego cambia a verde oscuro. En este punto, agregar el sulfato ferroso gota a gota hasta que el color cambia de agudamente azul a rojo. Un color marrón se observa cuando se pone contra una luz.

Cálculos para la determinación de materia orgánica del suelo

$$M = \frac{10}{V_{blanco}}$$

$$C_{orgánico}, \% = \frac{[V_{blanco} - V_{muestra}] \times 0.003 \times M_{Fe^{2+}} \times 100 \times f}{P_{muestra}}$$

$$\% MO = C_{orgánico}, \% \times 1.724$$

donde,

M : concentración de solución estandarizada de sulfato de hierro heptahidratado

V_{blanco} : volumen gastado en el blanco del sulfato de hierro heptahidratado

$V_{muestra}$: volumen gastado en la muestra del sulfato de hierro heptahidratado

$P_{muestra}$: peso de la muestra de suelo

1.724: factor de conversión 100/58

0.003: carbono oxidado

$$0.003 = \frac{12 \text{ g C}}{\text{mol}} \times \frac{1 \text{ mol } K_2Cr_2O_7}{6 \text{ moles } Fe_2SO_4} \times \frac{3 \text{ moles C}}{2 \text{ moles } K_2Cr_2O_7} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}}$$

Nota: Se requiere un factor de corrección de oxidación de 1.3 debido a que, en promedio, solo alrededor de 77% del carbono orgánico es recuperado por este método. Sin embargo, debería considerarse que el valor de este factor es muy variable, dado que está condicionado por el tipo de suelo y por la naturaleza de la materia orgánica.

Anexo 3. Prueba de normalidad, Shapiro – Wilks

```
> shapiro.test(Datos1$Limo) # Es normal
      Shapiro-wilk normality test
data:  Datos1$Limo
W = 0.96023, p-value = 0.3139
> shapiro.test(Datos1$ArenamF) # No es normal
      Shapiro-wilk normality test
data:  Datos1$ArenamF
W = 0.85718, p-value = 0.0008797
> shapiro.test(Datos1$Arcilla) # No es normal
      Shapiro-wilk normality test
data:  Datos1$Arcilla
W = 0.87249, p-value = 0.001905
> shapiro.test(Datos1$Permeab) # No es normal
      Shapiro-wilk normality test
data:  Datos1$Permeab
W = 0.61441, p-value = 1.099e-07
> shapiro.test(Datos1$MO) # Es normal
      Shapiro-wilk normality test
data:  Datos1$MO
W = 0.96842, p-value = 0.497
> shapiro.test(Datos1$K) # Es normal
      Shapiro-wilk normality test
data:  Datos1$K
W = 0.94924, p-value = 0.1613
```

Anexo 4. Análisis no paramétrico, Kruskal – Wallis

```
> kruskal.test(Datos1$K ~ Datos1$Local)
      kruskal-wallis rank sum test
data:  Datos1$K by Datos1$Local
kruskal-wallis chi-squared = 18.806, df = 6, p-value =
0.004504

> kruskal.test(Datos1$K ~ Datos1$Orden)
      kruskal-wallis rank sum test
data:  Datos1$K by Datos1$Orden
kruskal-wallis chi-squared = 14.782, df = 2, p-value =
0.0006167

> kruskal.test(Datos1$K ~ Datos1$Gran_Grup)
      kruskal-wallis rank sum test
data:  Datos1$K by Datos1$Gran_Grup
kruskal-wallis chi-squared = 16.245, df = 3, p-value =
0.00101

> kruskal.test(Datos1$K ~ Datos1$Uso)
      kruskal-wallis rank sum test
data:  Datos1$K by Datos1$Uso
kruskal-wallis chi-squared = 12.403, df = 5, p-value =
0.02966

> kruskal.test(Datos1$K ~ Datos1$Estruct)
      kruskal-wallis rank sum test
data:  Datos1$K by Datos1$Estruct
kruskal-wallis chi-squared = 18.115, df = 3, p-value =
0.0004165
```

Anexo 5. Test de comparación múltiple de la erodabilidad con la variable localización

```
> dunnTest(K ~ Local, method = "bonferroni", data = Datos1)
Dunn (1964) Kruskal-wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Bonferroni method.
```

| | Comparison | Z | P.unadj | P.adj |
|----|------------------------|------------|-------------|------------|
| 1 | Diriá - Granada | 2.0658514 | 0.038842515 | 0.81569281 |
| 2 | Diriá - León | -0.1778002 | 0.858879908 | 1.00000000 |
| 3 | Granada - León | -2.2809166 | 0.022553381 | 0.47362100 |
| 4 | Diriá - Nindirí | -0.8811039 | 0.378261586 | 1.00000000 |
| 5 | Granada - Nindirí | -2.9455270 | 0.003224051 | 0.06770506 |
| 6 | León - Nindirí | -0.7372405 | 0.460976101 | 1.00000000 |
| 7 | Diriá - Niquinohomo | 1.2517883 | 0.210647024 | 1.00000000 |
| 8 | Granada - Niquinohomo | -0.9125175 | 0.361496366 | 1.00000000 |
| 9 | León - Niquinohomo | 1.4724714 | 0.140893623 | 1.00000000 |
| 10 | Nindirí - Niquinohomo | 2.2091961 | 0.027161004 | 0.57038108 |
| 11 | Diriá - Telica | 1.2788604 | 0.200946227 | 1.00000000 |
| 12 | Granada - Telica | -0.6815542 | 0.495520883 | 1.00000000 |
| 13 | León - Telica | 1.4663035 | 0.142565610 | 1.00000000 |
| 14 | Nindirí - Telica | 2.0834215 | 0.037212820 | 0.78146922 |
| 15 | Niquinohomo - Telica | 0.1659123 | 0.868225990 | 1.00000000 |
| 16 | Diriá - Tipitapa | 1.8917478 | 0.058524593 | 1.00000000 |
| 17 | Granada - Tipitapa | -0.6956083 | 0.486674140 | 1.00000000 |
| 18 | León - Tipitapa | 2.2135811 | 0.026857608 | 0.56400976 |
| 19 | Nindirí - Tipitapa | 3.2601490 | 0.001113537 | 0.02338428 |
| 20 | Niquinohomo - Tipitapa | 0.3748357 | 0.707782672 | 1.00000000 |
| 21 | Telica - Tipitapa | 0.1391217 | 0.889354006 | 1.00000000 |

Anexo 6. Test de comparación múltiple de la erodabilidad con la variable Orden de suelo

```
> dunnTest(K ~ Orden, method = "bonferroni", data = Datos1)
Dunn (1964) kruskal-wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Bonferroni method.
```

| | Comparison | Z | P.unadj | P.adj |
|---|-------------------------|-----------|--------------|--------------|
| 1 | Andisoles - Mollisoles | -1.940549 | 0.0523129858 | 0.1569389574 |
| 2 | Andisoles - vertisoles | 2.352458 | 0.0186497868 | 0.0559493603 |
| 3 | Mollisoles - vertisoles | 3.805344 | 0.0001416071 | 0.0004248212 |

Anexo 7. Test de comparación múltiple para la variable Gran grupo de suelo

```
> dunnTest(K ~ Gran_Grup, method = "bonferroni", data = Datos1)
Dunn (1964) kruskal-wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Bonferroni method.
```

| | Comparison | Z | P.unadj | P.adj |
|---|----------------------------|------------|--------------|--------------|
| 1 | Durustolls - Haplustands | 1.3889477 | 0.1648486636 | 0.9890919818 |
| 2 | Durustolls - Haplusterts | 3.8053443 | 0.0001416071 | 0.0008496425 |
| 3 | Haplustands - Haplusterts | 2.6222374 | 0.0087354556 | 0.0524127334 |
| 4 | Durustolls - Ustivitrands | 2.2259467 | 0.0260177518 | 0.1561065108 |
| 5 | Haplustands - Ustivitrands | 1.1904381 | 0.2338742478 | 1.0000000000 |
| 6 | Haplusterts - Ustivitrands | -0.8811039 | 0.3782615855 | 1.0000000000 |

Anexo 8. Test de comparación múltiple de la erodabilidad con la variable Uso del suelo

```
> dunnTest(K ~ Uso, method = "bonferroni", data = Datos1)
Dunn (1964) kruskal-wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Bonferroni method.
```

| | Comparison | Z | P.unadj | P.adj |
|----|-------------------------|-------------|-------------|------------|
| 1 | Arroz - Bosque_ralo | -2.93175055 | 0.003370574 | 0.05055860 |
| 2 | Arroz - G_básicos | -2.53014089 | 0.011401673 | 0.17102510 |
| 3 | Bosque_ralo - G_básicos | 0.40160966 | 0.687971316 | 1.00000000 |
| 4 | Arroz - Maní | -1.48595576 | 0.137290824 | 1.00000000 |
| 5 | Bosque_ralo - Maní | 1.44579479 | 0.148234767 | 1.00000000 |
| 6 | G_básicos - Maní | 1.04418513 | 0.296399746 | 1.00000000 |
| 7 | Arroz - Pasto | -3.06647246 | 0.002166008 | 0.03249011 |
| 8 | Bosque_ralo - Pasto | 0.38330906 | 0.701490624 | 1.00000000 |
| 9 | G_básicos - Pasto | -0.08926375 | 0.928872300 | 1.00000000 |
| 10 | Maní - Pasto | -1.31795306 | 0.187519361 | 1.00000000 |
| 11 | Arroz - SAF | -1.89653523 | 0.057889306 | 0.86833959 |
| 12 | Bosque_ralo - SAF | 1.19380119 | 0.232555745 | 1.00000000 |
| 13 | G_básicos - SAF | 0.77046744 | 0.441022664 | 1.00000000 |
| 14 | Maní - SAF | -0.33020033 | 0.741248597 | 1.00000000 |
| 15 | Pasto - SAF | 1.02279198 | 0.306406212 | 1.00000000 |

Anexo 9. Test de comparación múltiple de la erodabilidad con la variable Estructura del suelo

```
> dunnTest(K ~ Estruct, method = "bonferroni", data = Datos1)
Dunn (1964) Kruskal-wallis multiple comparison
p-values adjusted with the Bonferroni method.

      Comparison      Z      P.unadj
1 Bloque - Granular_fina  2.5123927 0.0119915564
2 Bloque - Granular_media_gruesa  1.4109822 0.1582498672
3 Granular_fina - Granular_media_gruesa -1.1821249 0.2371561330
4 Bloque - Masiva  3.9268660 0.0000860599
5 Granular_fina - Masiva  0.2097338 0.8338754382
6 Granular_media_gruesa - Masiva  1.7633996 0.0778331165
P.adj
1 0.0719493383
2 0.9494992029
3 1.0000000000
4 0.0005163594
5 1.0000000000
6 0.4669986992
```

Anexo 10. Pruebas de correlaciones de Spearman

```
> shapiro.test(Datos1$Limo) # Es normal
Shapiro-wilk normality test
data: Datos1$Limo
W = 0.96023, p-value = 0.3139

> shapiro.test(Datos1$ArenaMF) # No es normal
Shapiro-wilk normality test
data: Datos1$ArenaMF
W = 0.85718, p-value = 0.0008797

> shapiro.test(Datos1$Arcilla) # No es normal
Shapiro-wilk normality test
data: Datos1$Arcilla
W = 0.87249, p-value = 0.001905

> shapiro.test(Datos1$Permeab) # No es normal
Shapiro-wilk normality test
data: Datos1$Permeab
W = 0.61441, p-value = 1.099e-07

> shapiro.test(Datos1$MO) # Es normal
Shapiro-wilk normality test
data: Datos1$MO
W = 0.96842, p-value = 0.497

> shapiro.test(Datos1$K) # Es normal
Shapiro-wilk normality test
data: Datos1$K
W = 0.94924, p-value = 0.1613
```

Anexo 11. Primera aproximación del modelo de regresión para determinar K, a partir de limo, arena muy fina, materia orgánica, permeabilidad y estabilidad estructural de los agregados

```
> REG2 <-lm(K ~ ., data = Datos5)
> REG2 %>% summary()

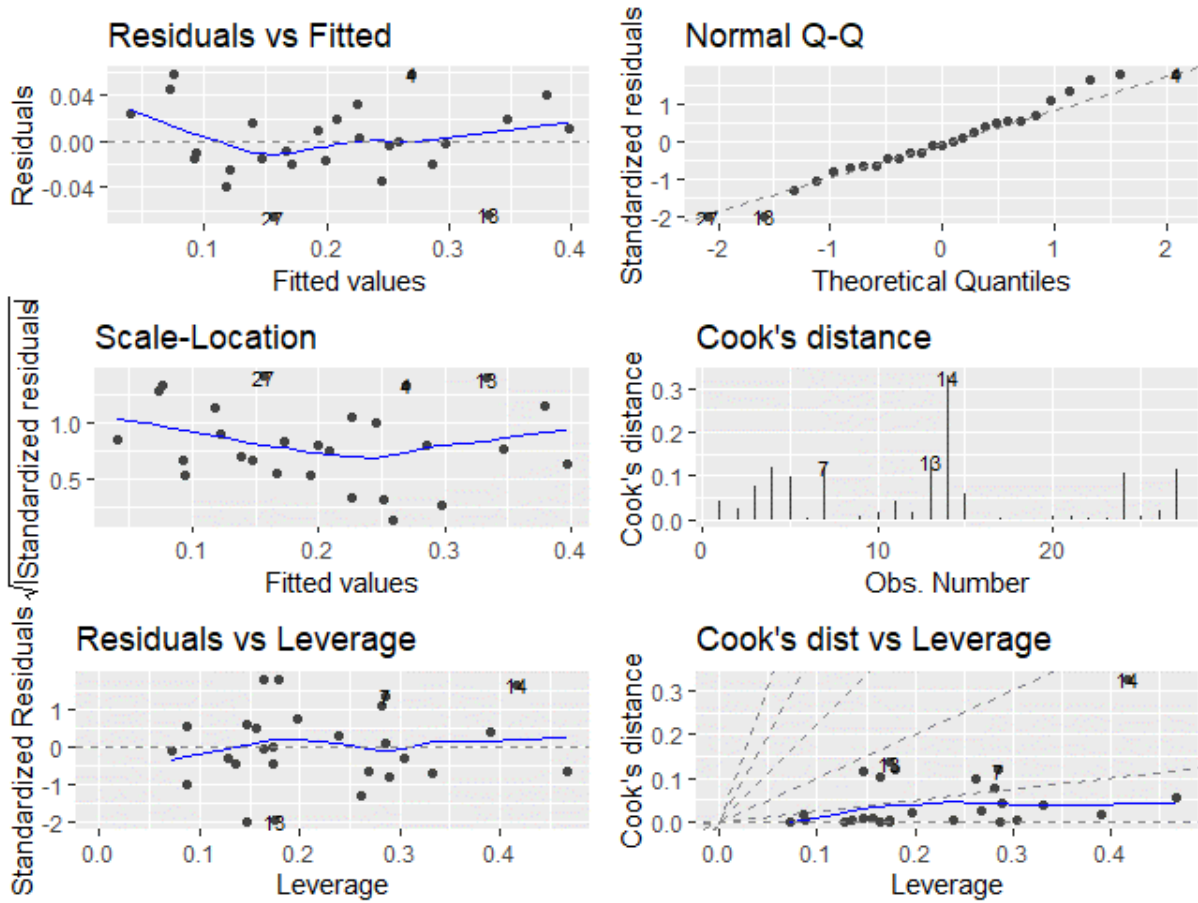
Call:
lm(formula = K ~ ., data = Datos5)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.066538 -0.018292 -0.003239  0.018297  0.068474

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -2.882e-02  3.772e-02  -0.764  0.452387
Limo         7.793e-03  6.674e-04  11.676  2.20e-11 ***
ArenaMF     9.730e-03  1.981e-03   4.912  5.19e-05 ***
MO          -2.763e-02  6.393e-03  -4.322  0.000233 ***
Permeab     -5.715e-05  1.550e-05  -3.688  0.001155 **
EEA          8.029e-04  3.570e-04   2.249  0.033968 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.0364 on 24 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8981, Adjusted R-squared:  0.8769
F-statistic: 42.31 on 5 and 24 DF,  p-value: 3.913e-11
```

Anexo 12. Diagnóstico del modelo de regresión múltiple (RLM)



Anexo 13. Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir del porcentaje de limo

```
> REG2.1 <-lm(K ~ Limo, data = Datos5)
> REG2.1 %>% summary()
Call:
lm(formula = K ~ Limo, data = Datos5)
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.155037 -0.056104 -0.009514  0.045442  0.155920
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 0.0597092   0.0332526   1.796  0.0834 .
Limo         0.0046761   0.0009322   5.016 2.65e-05 ***
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 0.07661 on 28 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4733, Adjusted R-squared:  0.4545
F-statistic: 25.16 on 1 and 28 DF,  p-value: 2.653e-05
```

Anexo 14. Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir del porcentaje de arena muy fina

```
> REG2.2 <-lm(K ~ ArenaMF, data = Datos5)
> REG2.2 %>% summary()
Call:
lm(formula = K ~ ArenaMF, data = Datos5)
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.15574 -0.05818 -0.01004  0.04834  0.22441
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 0.171566   0.029736   5.770 3.41e-06 ***
ArenaMF     0.006437   0.003814   1.688  0.103
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 0.1006 on 28 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.09232, Adjusted R-squared:  0.0599
F-statistic: 2.848 on 1 and 28 DF,  p-value: 0.1026
```

Anexo 15. Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir del porcentaje de materia orgánica

```

> REG2.3 <-lm(K ~ MO, data = Datos5)
> REG2.3 %>% summary()
Call:
lm(formula = K ~ MO, data = Datos5)
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.149065 -0.087869 -0.002357  0.059030  0.217006
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.193954   0.044094   4.399 0.000143 ***
MO           0.004664   0.010836   0.430 0.670218
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 0.1052 on 28 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.006572,    Adjusted R-squared:  -0.02891
F-statistic: 0.1852 on 1 and 28 DF,  p-value: 0.6702

```

Anexo 16. Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir de la permeabilidad superficial ($mm \cdot h^{-1}$)

```

> REG2.4 <-lm(K ~ Permeab, data = Datos5)
> REG2.4 %>% summary()
Call:
lm(formula = K ~ Permeab, data = Datos5)
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.159544 -0.080488  0.004514  0.065286  0.193159
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.282e-01  2.164e-02  10.547 2.93e-11 ***
Permeab     -6.499e-05  4.239e-05  -1.533   0.136
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 0.1014 on 28 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.07746, Adjusted R-squared:  0.04451
F-statistic: 2.351 on 1 and 28 DF,  p-value: 0.1364

```

Anexo 17. Modelo de Regresión Lineal Simple para predecir K (erodabilidad) a partir del porcentaje de estabilidad estructural de los agregados

```
> REG2.5 <-lm(K ~ EEA, data = Datos5)
> REG2.5 %>% summary()
Call:
lm(formula = K ~ EEA, data = Datos5)
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.179747 -0.082481 -0.002144  0.069535  0.210599
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.2811609  0.0450522   6.241  9.6e-07 ***
EEA          -0.0012707  0.0007456  -1.704  0.0994 .
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 0.1005 on 28 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.09398, Adjusted R-squared:  0.06162
F-statistic: 2.904 on 1 and 28 DF,  p-value: 0.09941
```

Anexo 18. Levantamiento de datos en campo



Anexo 19. Pruebas de infiltración para determinar la permeabilidad superficial del suelo



Anexo 20. Análisis de estabilidad estructural de los agregados

