

**Caracterización hidrológica, de erosión y
arrastre de nutrientes en suelos agrícolas bajo
condiciones de simulación de lluvia,
Zamorano, Honduras**

**Isaac Felipe Cedeño Delgado
Iván Alexis Vargas López**

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2011

ZAMORANO
CARRERA DESARROLLO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTE

**Caracterización hidrológica, de erosión y
arrastre de nutrientes en suelos agrícolas bajo
condiciones de simulación de lluvia,
Zamorano, Honduras**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingenieros en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Isaac Felipe Cedeño Delgado
Iván Alexis Vargas López**

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2011

Caracterización hidrológica, de erosión y arrastre de nutrientes en suelos agrícolas bajo condiciones de simulación de lluvia, Zamorano, Honduras

Presentado por:

Isaac Felipe Cedeño Delgado
Iván Alexis Vargas López

Aprobado:

Erika Tenorio, M.Sc.
Asesora principal

Arie Sanders, M.Sc.
Director
Carrera de Desarrollo Socioeconómico
y Ambiente

Gloria Arévalo de Gauggel, M.Sc.
Asesora

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

RESUMEN

Cedeño, I; Vargas, I. 2011. Caracterización hidrológica, de erosión y arrastre de nutrientes en suelos agrícolas bajo condiciones de simulación de lluvia, Zamorano, Honduras. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 25 p.

La agricultura es una de las principales fuentes de contaminantes no puntuales a cuerpos de agua superficiales. El presente estudio se realizó con el fin de evaluar la susceptibilidad de los suelos agrícolas de la Escuela Agrícola Panamericana a los efectos de precipitaciones de alta intensidad y corta duración. El objetivo general del estudio fue comprender la relación existente entre precipitación y escorrentía superficial generada a través de lluvia simulada, y cuantificar el arrastre de nutrientes (fosfatos y nitratos) y sólidos por procesos de erosión hídrica. Se construyó y calibró un simulador de lluvia portátil que permitió replicar la velocidad y energía cinética de la lluvia natural sobre parcelas de 2.29 m². Se simularon eventos de precipitación con una intensidad de 75 mm h⁻¹ y una duración de 15 minutos. Las simulaciones se realizaron durante el mes de agosto de 2011 en 12 unidades experimentales, distribuidas de acuerdo a las familias texturales presentes en el suelo entre ellas: media sobre grava y roca ((M/g)/G)), fina sobre arena (F-/g), fina sobre arena y media (F-/(g-M)) y fina (F-/F+), en un área de uso agrícola con pendiente de 1.75 % a 2 %. Se recolectaron muestras de escorrentía generada a intervalos de tres minutos y se cuantificó el volumen, los sólidos y los nutrientes en cada muestra. De acuerdo a los resultados obtenidos se determinó que el suelo que más escorrentía genera es el de familia textural media sobre grava y roca ((M/g)/G)), al igual que fue el que más nitratos exportó. Adicionalmente el suelo que más sólidos y fosfatos exportó fue la familia textural fina (F-/F+). Se estimó un coeficiente de escorrentía promedio de 0.35 para el área de estudio, una concentración promedio de 20 mg/L de nitratos (NO₃⁻²) y 2.38 mg/L de fosfatos (PO₄⁻³) en agua de escorrentía que significan la pérdida de 0.3 kg/N/ha y 0.024 kg/P₂O₅/ha en promedio para el tipo de evento simulado. Estos resultados muestran que los suelos de Zona 1 son una fuente potencial de contaminación de tipo no puntual, debido a los valores máximos registrados de fosfatos y nitratos en la escorrentía superficial, además de generar pérdidas de suelo y de fertilidad que se traducen en pérdidas económicas y de calidad ambiental.

Palabras clave: Coeficiente de escorrentía, contaminantes no puntuales, erosión hídrica, escorrentía superficial, familias texturales.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| Portadilla | i |
| Página de firmas | ii |
| Resumen | iii |
| Contenido | iv |
| Índice de cuadros, figuras y anexos..... | v |
| | |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2 MATERIALES Y MÉTODOS..... | 3 |
| 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 8 |
| 4 CONCLUSIONES | 17 |
| 5 RECOMENDACIONES | 18 |
| 6 LITERATURA CITADA..... | 19 |
| 7 ANEXOS | 22 |

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

| Cuadros | | Página |
|---------|---|--------|
| 1. | Escorrentía superficial (mm) generada a intervalos de tiempo para una intensidad de lluvia de 75 mm h ⁻¹ para todos los suelos estudiados, Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 8 |
| 2. | Escorrentía superficial (mm) generada según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h ⁻¹ , Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 10 |
| 3. | Coefficiente de escorrentía superficial según familias texturales de suelo en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 11 |
| 4. | Sólidos arrastrados según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h ⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 12 |
| 5. | Fosfatos (PO ₄ ⁻³) arrastrados según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h ⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 13 |
| 6. | Pérdida de fósforo (P ₂ O ₅) según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h ⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 14 |
| 7. | Costo del (P ₂ O ₅) perdido durante una lluvia con una intensidad de 75 mm h ⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 14 |
| 8. | Nitratos (NO ₃ ⁻²) arrastrados según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h ⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 15 |
| 9. | Pérdida de nitrógeno (N) según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h ⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 16 |
| 10. | Costo del (N) perdido durante una lluvia con una intensidad de 75 mm h ⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 16 |

| Figuras | | Página |
|---------|--|--------|
| 1. | Curvas de intensidad, duración y frecuencia de lluvia (IDF) para El Zamorano. | 4 |

| | | |
|----|---|---|
| 2. | Mapa textural de suelo y sitios de simulación según el tipo de suelo Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 5 |
| 3. | Mapa de profundidad efectiva de suelo y sitios de simulación, Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 6 |
| 4. | Escorrentía superficial promedio (mm) generada a intervalos de tiempo por una intensidad de lluvia de 75 mm h^{-1} , según familias texturales, Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 9 |

Anexos

Página

| | | |
|----|---|----|
| 1. | Calibración para boquilla $\frac{1}{2}$ HH- 50WSQ. | 22 |
| 2. | Gráfica de correlación entre presión aplicada e intensidad generada. | 23 |
| 3. | Localización de puntos de muestreo para la recolección de muestras en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. | 23 |
| 4. | Esquema de recolección de datos durante los experimentos de precipitación y escorrentía. | 24 |
| 5. | Esquema del funcionamiento del simulador de lluvia. | 24 |
| 6. | Análisis de humedad, escorrentía generada, arrastre de sólidos y materia orgánica de las muestras recolectadas en campo. | 25 |

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los suelos productivos están siendo sujetos a acelerados procesos de degradación biológica y erosión eólica e hídrica. La agricultura es la causante de gran parte del aporte de sedimentos a los ríos, los lagos, los estuarios y océanos a nivel mundial (FAO 1997). La agricultura es la actividad que más aporta contaminantes no puntuales (FAO 1994). Las actividades agrícolas tales como las fertilizaciones incrementan la carga de químicos y componentes biológicos contaminantes que son transportados por escorrentía superficial hacia las masas de agua.

La utilización de estiércoles en prácticas agrícolas es una fuente importante de nutrientes, pero bajo prácticas inadecuadas de manejo puede generar una fuente considerable de contaminación biológica a cuerpos de agua (Thiagarajan *et al.* 2007). El transporte de nutrientes como fósforo y nitrógeno que se originan de la aplicación de fertilizantes para aumentar la producción agrícola, resulta en contaminación de masas de agua generando procesos de eutroficación que afectan la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos y producen efectos a la salud pública por consumo agua contaminada (Huang *et al.* 2008).

La precipitación desprende la estructura superficial del suelo ocasionando procesos erosivos, los cuales juegan un papel importante en la degradación de los recursos hídricos (Brady y Weil 1999). A nivel agrícola la erosión produce efectos adversos, afectando los rendimientos de producción y deteriorando las zonas productivas. Las tierras degradadas por erosión disminuyen su tasa de infiltración, aumentando de esta forma en un 20 % a 30 % las tasas de escorrentía y produciendo escasez de agua incluso en los años lluviosos (Pimentel *et al.* 1987).

La pérdida de fertilidad del suelo debido a la erosión hídrica es el problema ambiental más grande que enfrentan los agricultores en el mundo (Leal *et al.* 2007). En Centroamérica esta situación representa un gran desafío, ya que debido a la pérdida de fertilidad de los suelos producto de la erosión, el incrementar los niveles de producción se ha vuelto un grave problema para el sector agrícola y para el medio ambiente (Sain *et al.* 1994). Los estudios de los procesos de escorrentía muestran que las precipitaciones constituyen el factor más agresivo en el proceso de erosión de los suelos en los trópicos.

El fenómeno de erosión hídrica comienza desde que las gotas de lluvias impactan el suelo, hasta cuando la velocidad de infiltración es menor que la tasa de precipitación y el agua comienza a escurrir. Para la estimación de la erosividad que resulta de las precipitaciones se utilizan diversos métodos matemáticos, los cuales incluyen los promedios mensuales y anuales de la precipitación, por ejemplo: el Índice Modificado de Fournier y el factor R de

erosividad de las precipitaciones propuesto en el modelo de la RUSLE que encierra valores de energía cinética e intensidad de las gotas (Almoza 2008).

El uso de simuladores para estudios de precipitación y sus impactos en el ambiente ha tenido una gran aceptación en el medio científico, porque ha permitido avanzar en el estado de conocimiento sobre las interacciones de precipitación bajo condiciones controladas. Los simuladores de lluvia han sido utilizados con mucho éxito a través de los últimos 75 años, principalmente en investigaciones de infiltración, escorrentía superficial y erosión de suelos (Humphry *et al.* 2002). La utilización de simuladores de lluvia facilita el estudio de los efectos que ejerce la misma sobre las propiedades del suelo y arrastre de nutrientes, ya que permite controlar condiciones que naturalmente son fluctuantes. A nivel mundial por medio del uso de diferentes modelos de simuladores de lluvia se han llevado a cabo diversos estudios en campo tales como: la cuantificación del arrastre de los nutrientes bajo diferentes coberturas y pérdida de suelos por escorrentía superficial después de un evento de lluvia. En relación al estudio del arrastre de nutrientes, se han promovido iniciativas alrededor del mundo tales como The National Phosphorus Project en Estados Unidos, el cual tiene como objetivo desarrollar investigaciones relacionadas al estudio de la pérdida de P del suelo con relación a su manejo, riesgos de erosión y generación de escorrentía a partir del uso de simuladores (Sharpley *et al.* 2002).

La presente investigación busca indagar sobre los procesos que originan las fuentes de contaminación no puntuales, las cuales son las responsables de al menos la mitad de la contaminación de los cuerpos de agua (FAO 1994). Actualmente el problema de la contaminación de los recursos hídricos a causa de fuentes no puntuales es motivo de investigación a nivel mundial, para así comprender los procesos que contaminan los cuerpos de agua a partir de estas fuentes. En México se estudió la infiltración, la escorrentía y la erosión en suelos bajo tratamientos silvícolas en donde se evaluaron procesos hidrológicos a través de simuladores de lluvia portátil. Se encontró que el agua superficial generada, arrastra mayor sedimento y nutrientes del suelo que van a dar a fuentes de aguas (Dueñez *et al.* 2004).

La cuantificación de nutrientes en suelos agrícolas es importante para conocer el efecto neto que resulta del arrastre de suelo, a través de aguas superficiales que se generan por la lluvia que afectan la calidad de cuerpos de agua. El arrastre de nutrientes como el fósforo trae al humano y a la vida acuática problemas que ocasionan la reducción de oxígeno en los cuerpos de aguas (Leal *et al.* 2008).

El presente estudio tiene como objetivos: 1) describir y cuantificar la respuesta hidrológica de los suelos de Zona 1 de la Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano (EAP) ante un evento de precipitación de alta intensidad y corta duración, 2) determinar el arrastre y la pérdida de suelo y nutrientes (fosfatos y nitratos) para una intensidad de lluvia de 75 mm h^{-1} durante 15 minutos utilizando un simulador de lluvia, 3) conocer la variabilidad de pérdida de suelo y nutrientes en diferentes tipos de suelo de uso agrícola para conocer su potencial impacto negativo a cuerpos de agua y 4) cuantificar el costo incurrido por pérdida de fertilidad ante un evento de lluvia de 75 mm h^{-1} durante 15 minutos en los suelos agrícolas de Zona 1 en la Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano (EAP).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la Zona 1 de la Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, ubicada en el Valle del Yeguare, Francisco Morazán a 30 km Sur/ Oeste de Tegucigalpa, Honduras. El sitio se encuentra a 800 msnm, con un clima seco tropical con temperatura promedio de 24 °C y una precipitación media anual de 1,100 mm. La Zona 1 está compuesta por ocho lotes los cuales abarcan un área de 34.94 ha con pendientes de 1.75 % a 2 %, clasificada en la categoría de plano o casi plano (Arévalo y Gauggel 2010). Estos terrenos son dedicados a la producción de melón y sandía durante los primeros meses del año y posteriormente a la producción de maíz y sorgo para forraje de ganado. El estudio se desarrolló posterior a la cosecha del cultivo de maíz. La zona se caracteriza por tener diferentes familias texturales de suelo, estos agrupados en su mayoría en cuatro categorías que son: media sobre gruesa y roca ((M/g)/G), fina sobre arena (F-/g), fina sobre arena y media (F-/(g-M)) y fina (F-/F+) (Esquivel y Mendoza 2011).

Se construyó un simulador de lluvia modificado a partir del modelo propuesto por Covert y Jordan (2009). El simulador consistió en un trípode de tubería EMT (Electrical Metallic Tubing) de base expandible de 3 m de altura, para replicar de esta forma la velocidad y la energía cinética de la lluvia natural (Covert y Jordan 2009), en cuya parte superior se adaptó una boquilla ½ HH-50WSQ Spraying Systems Co. Para las simulaciones se utilizó agua proveniente de las fuentes de agua potable de la Escuela Agrícola Panamericana y la misma fue transportada en un reservorio de 1 m³ y bombeada por medio de una bomba DUCAR-DS20, a través de una manguera de jardín de 12.7 mm de diámetro. La presión e intensidad aplicada fue ajustada por medio de válvulas y manómetros que permitieron regular el paso del agua, la presión y la intensidad de la precipitación. A diferencia de estudios con lluvia natural, el modelo de simulador de lluvia seleccionado permitió mantener las condiciones de precipitación homogéneas a bajas y medias intensidades constantes a través de diferentes ensayos en varios tipos de suelo.

El simulador fue calibrado mediante varios ensayos, en los cuales se identificó la relación existente entre presión (PSI) e intensidad de lluvia generada (mm h⁻¹). La precipitación generada fue medida mediante el uso de un pluviómetro de balancín en tiempo real marca Davis serie Vantage Pro2, en intervalos de tiempo de tres minutos en promedio a distintos PSI de presión. La selección de la intensidad de lluvia se hizo con base en curvas IDF (Intensidad, Duración y Frecuencia) que fueron generadas por el Fondo Hondureño de Inversión Social (FHIS) en el año 2000. Se definió como lluvia a aplicar una intensidad de 75 mm h⁻¹ durante 15 minutos, la cual con base en las curvas IDF del FHIS tiene una tasa de retorno de dos años y durante el año 2010, según los datos de las estaciones locales de

Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, se registró como evento extremo de lluvia una intensidad similar (Figura 1).

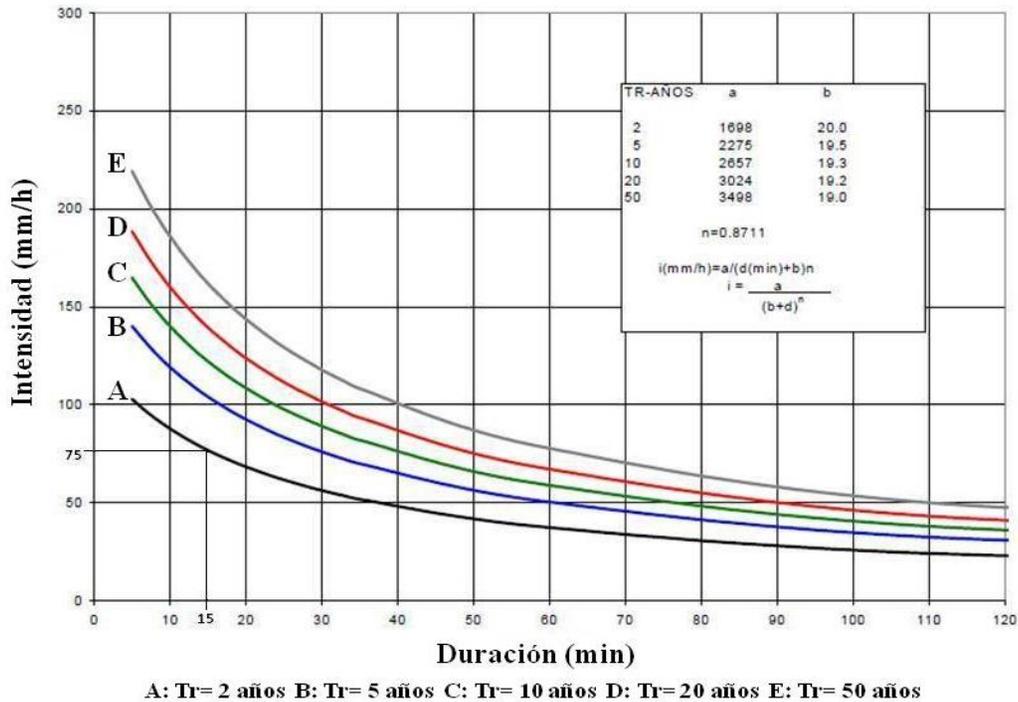


Figura 1. Curvas de intensidad, duración y frecuencia de lluvia (IDF) para El Zamorano. Fuente: Fondo Hondureño de Inversión Social (FHIS 2000).

Las simulaciones se realizaron durante el mes de agosto de 2011, que está dentro del período húmedo del año (mayo a octubre). Para definir el número de simulaciones se consideró el área que abarca cada tipo de suelo y se realizaron 12 simulaciones; dos en el suelo con textura media sobre grava y roca ((M/g)/G), tres en el suelo con textura fina sobre arena (F-/g), tres en el suelo con textura fina sobre arena y media (F-/(g-M)) y cuatro en el suelo con textura fina (F-/F+) (Figura 2). Los tipos de suelo según familia textural encontrados en la Zona 1 corresponden a la siguiente descripción (Arévalo y Gauggel 2010):

- (M/g)/G: son suelos conformados por texturas medias francas (franco, franco limoso y franco arenoso) en los primeros 30 cm, sobre arena, arenas gruesas y arenas francas sobre roca.
- F-/g: son suelos conformados por arcillas livianas (franco arcilloso, franco arcillo-limoso, franco arcillo-arenoso, franco arcilloso con menos de 35 % de arcilla), sobre arena, arenas gruesas y arenas francas.
- F-/(g-M): son suelos conformados por arcillas livianas (franco arcilloso, franco arcillo-limoso, franco arcillo-arenoso, franco arcilloso con menos de 35 % de arcilla), sobre arena, arenas gruesas y arenas francas con texturas medias francas (franco, franco limoso y franco arenoso).

- F-/F+: son suelos conformados por arcillas livianas (franco arcilloso, franco arcillo-limoso, franco arcillo-arenoso, franco arcilloso con menos de 35 % de arcilla), sobre texturas con arcillas pesadas (arcilloso, arcillo-limoso, arcillo-arenoso, franco arcilloso con más de 35 % de arcilla).

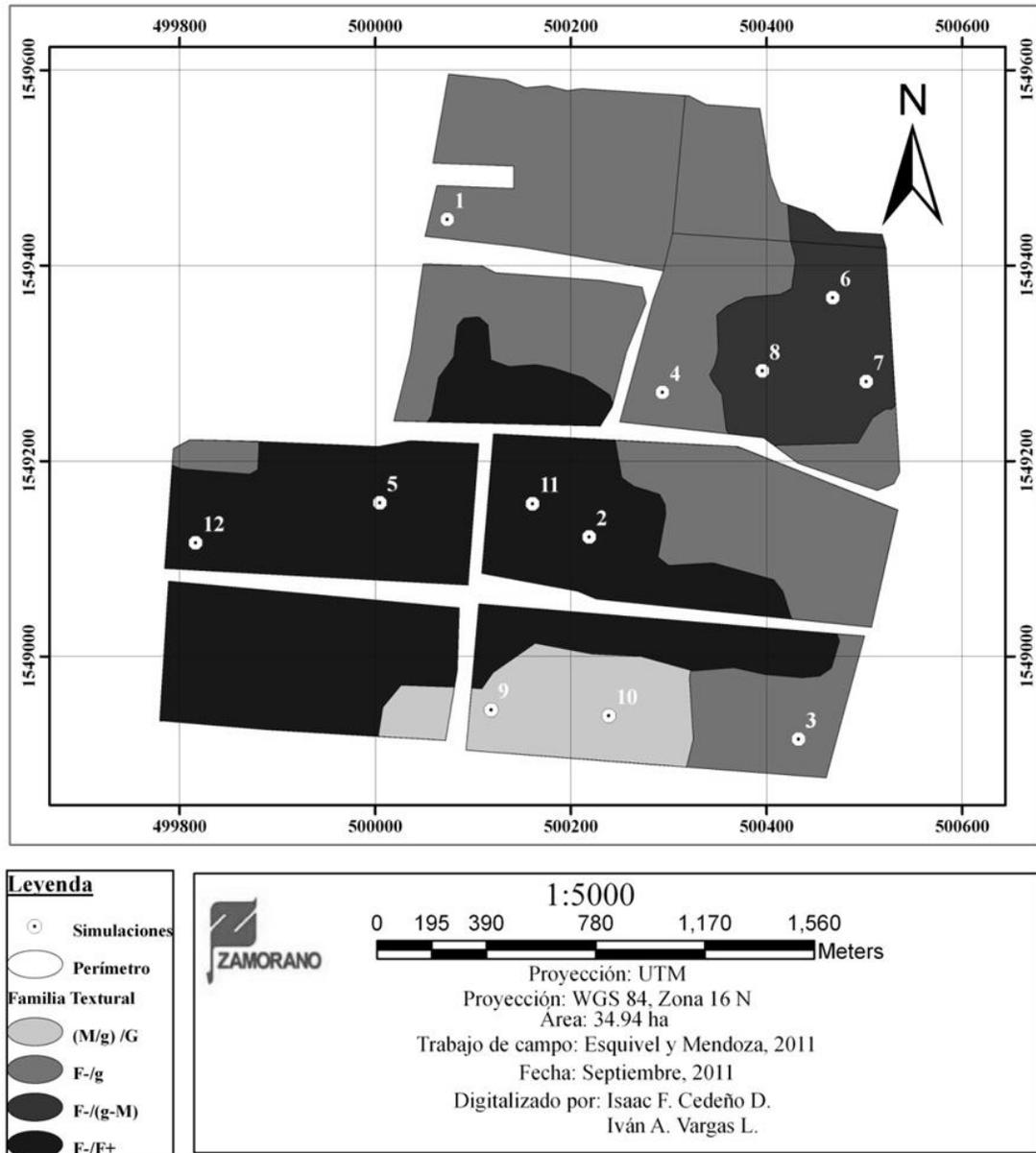


Figura 2. Mapa textural de suelo y sitios de simulación según el tipo de suelo Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

Adicionalmente los suelos de Zona 1 se categorizan por su profundidad en 4 tipos (Esquivel y Mendoza 2011) (Figura 3):

- Muy Superficial: son suelos cuya profundidad es menor a 30 cm.
- Superficial: son suelos cuya profundidad va de 30.1 cm a 60 cm.
- Moderado: son suelos cuya profundidad va de 60.1 cm a 90 cm.
- Profundo: son suelos cuya profundidad es mayor a 90 cm.

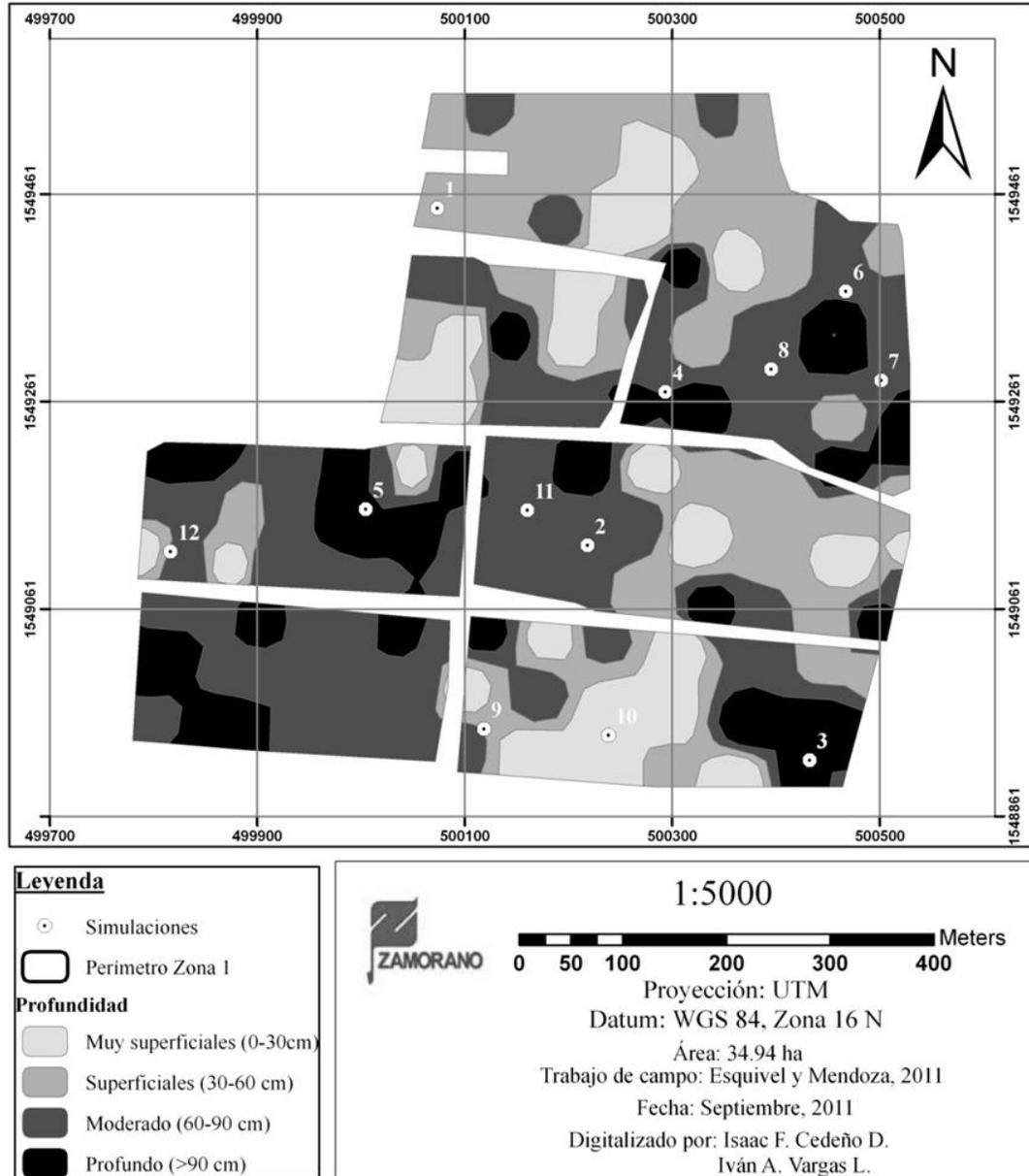


Figura 3. Mapa de profundidad efectiva de suelo y sitios de simulación, Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

Se establecieron parcelas de 2.3 m^2 como área de estudio, delimitadas por marcos de hierro de 0.1 m de ancho en tres de sus lados, los cuales se enterraron 5 cm en el suelo sin alterar el mismo y 5 cm se mantuvieron sobre la superficie. En el lado a favor de la

pendiente se hizo uso de una canaleta de PVC enterrada en el suelo, por medio de la cual se recolectaron las muestras de escorrentía superficial generada a partir de la lluvia simulada.

Para la toma de las muestras durante las simulaciones se utilizó como patrón los trabajos realizados por (Srinivasan *et al.* 2007), con cambios en el período de tiempo de recolección de muestras de agua de 30 a 15 minutos posteriores a la generación de escorrentía superficial, en intervalos de tres minutos por muestra. Las muestras de escorrentía fueron recolectadas en botellas de polietileno tereftalato (PET) de 3.8 L, 1 L y 0.5 L.

En las 12 simulaciones realizadas se midió el volumen generado de escorrentía en intervalos de tres minutos hasta los 15 minutos después de iniciada la lluvia, posteriormente se calculó el coeficiente de escorrentía dividiendo el volumen de escorrentía generada en milímetros (mm) sobre la lámina de precipitación aplicada en milímetros (mm). Además se midió la cantidad de sólidos totales en el agua de escorrentía por cada intervalo y la cantidad de sólidos que se depositaron al final de la simulación dentro de la canaleta. Las muestras resultantes se analizaron mediante métodos gravimétricos (APHA 2540-D), en los cuales se secaron en horno durante 24 horas a 70 °C. Se seleccionaron las muestras de 10 simulaciones acorde a su distribución por familia textural de suelo para analizar fosfatos (PO_4^{-3}), tanto en muestras del agua utilizada para las simulaciones, como en las muestras tomadas en cada intervalo de tres minutos. En las muestras compuestas de la escorrentía de cada simulación se hicieron análisis para nitratos (NO_3^{-2}), nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP). Las muestras para análisis de nutrientes fueron filtradas a través de una membrana de acetato de celulosa de 0.45 μm , refrigeradas a 4 °C y analizadas durante las 24 horas posteriores a su recolección. Los nutrientes fueron analizados mediante un colorímetro HACH DR/890. El análisis de fosfatos (PO_4^{-3}) se realizó mediante el método de ácido ascórbico y los nitratos por el método de reducción de Cadmio (Hach Co. 2000).

Adicionalmente se tomaron muestras de suelo del primer horizonte en sitios aledaños a la parcela de estudio a una distancia no mayor de dos metros del sitio de cada simulación, a las cuales se les cuantificó el porcentaje de humedad previo a la simulación, el porcentaje de materia orgánica, nitratos, nitrógeno total y fósforo total. Los métodos empleados en ambos casos (agua de la muestra compuesta y suelo) fueron similares, la materia orgánica se midió por medio del método Walkley & Black (1934), el fósforo total y los nitratos (NO_3^{-2}) a través de métodos de colorimetría.

La escorrentía generada, la precipitación y transporte de sólidos, de fósforo y nitratos se analizaron por medio de estadística descriptiva. Para comprobar la distribución de los datos se hicieron las pruebas de normalidad Shapiro Wilks y Kolmogorov Smirnov y debido a que las variables no cumplen con una distribución normal e igualdad de varianzas se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparación de medias (Van Hecke 2010). Los análisis se llevaron a cabo a través del uso del programa estadístico SPSS versión 17.0 y el programa estadístico SAS versión 9.1.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según los valores de escorrentía obtenidos en los diferentes intervalos se determinó que existe un aumento de escorrentía en relación al tiempo (Cuadro 1). Con base en el promedio de las 12 simulaciones se determinó que la lámina de escorrentía generada incrementa de forma logarítmica en función del tiempo de precipitación ($R^2=0.98$) y se representa mediante la siguiente ecuación:

$$y = 8.96 \ln(x) + 6.166 \quad [1]$$

donde:

y= lámina de escorrentía (mm).

x= tiempo en minutos.

Cuadro 1. Escorrentía superficial (mm) generada a intervalos de tiempo para una intensidad de lluvia de 75 mm h^{-1} para todos los suelos estudiados, Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Intervalo de tiempo (min) | n | Escorrentía (mm) | | | | Varianza | Desv. Típ. |
|---------------------------|----|------------------|--------|--------|------|----------|------------|
| | | Media | Mínimo | Máximo | | | |
| 0-3 | 12 | 0.59 | 0.17 | 1.38 | 0.17 | 0.42 | |
| 3-6 | 12 | 1.21 | 0.44 | 2.17 | 0.33 | 0.57 | |
| 6-9 | 12 | 1.72 | 0.98 | 2.26 | 0.17 | 0.42 | |
| 9-12 | 12 | 1.91 | 0.71 | 3.31 | 0.40 | 0.63 | |
| 12-15 | 12 | 1.95 | 0.77 | 3.36 | 0.51 | 0.72 | |
| Total | 60 | 7.38 | | | | | |

La escorrentía superficial que se genera por intervalos aumenta con respecto al tiempo y acumula una lámina total de 7.38 mm en 15 minutos. Los suelos presentaron una moderada capacidad de infiltración la cual es en promedio de 4.6 cm h^{-1} . Esta lámina es característica de procesos de escorrentía de tipo hortoniano (Pilgrim y Cordery 1993) debido al evento de lluvia de alta intensidad y de corta duración. Acorde a las simulaciones realizadas se presentaron diferencias en el incremento de la escorrentía a través de intervalos de tres minutos en las diferentes familias texturales de suelo (Figura 4).

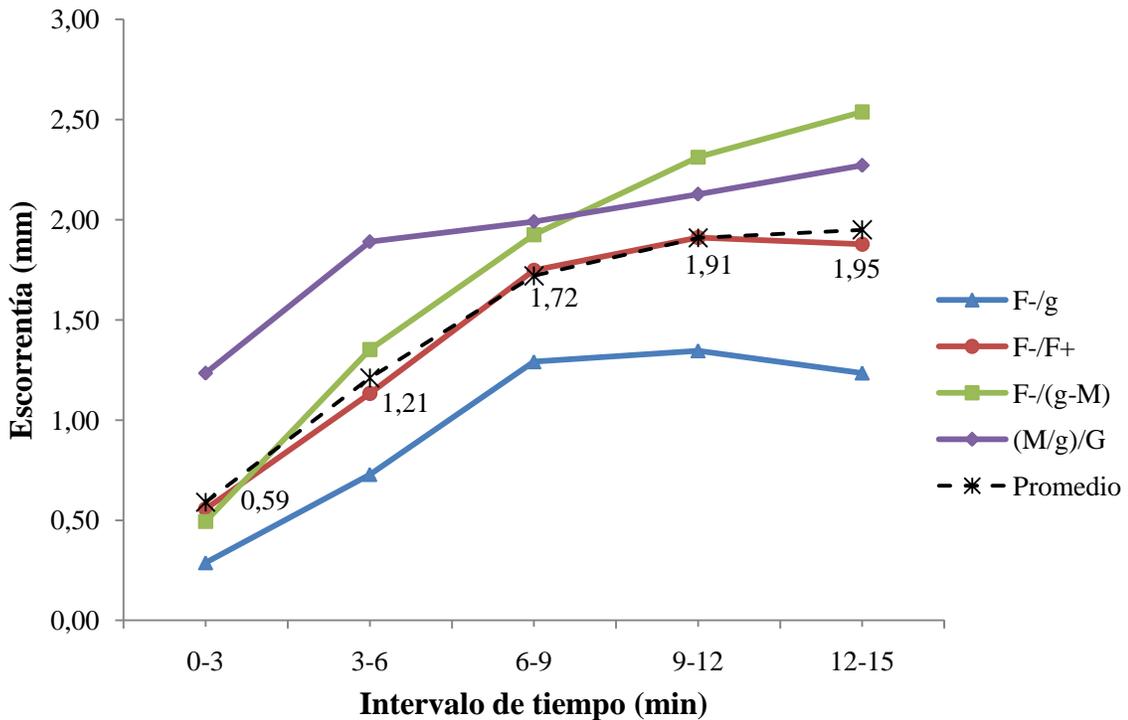


Figura 4. Escorrentía superficial promedio (mm) generada a intervalos de tiempo por una intensidad de lluvia de 75 mm h^{-1} , según familias texturales, Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

En el suelo con familia textural media sobre grava y roca ((M/g)/G) se genera la mayor escorrentía promedio durante los seis primeros minutos, a partir de este punto la curva sigue en aumento pero más lentamente hasta alcanzar un valor que se predice constante. En la textura fina sobre arena y media (F-/g-M) se mantiene a lo largo de los 15 minutos un aumento casi constante de escorrentía generada, llegando a sobrepasar la escorrentía producida por los suelos con familias texturales medias sobre grava y roca ((M/g)/G). La curva de escorrentía promedio para Zona 1 responde a una ecuación logarítmica, indicando que existe un aumento marcado durante los primeros ocho minutos, luego la misma continúa en aumento, sin embargo de menor magnitud (Figura 4).

Los resultados obtenidos podrían ser explicados por las características texturales de los suelos de Zona 1, ya que la textura determina la forma en la que se comporta el agua en el suelo (Plaster 2000). Sin embargo, la escorrentía superficial con respecto a las familias texturales se puede ver influenciada por otras características físicas del suelo como la profundidad efectiva del mismo. La generación total de escorrentía para la Zona 1 después de un evento de precipitación de 75 mm h^{-1} durante 15 minutos se estima será de 460 m^3 (Cuadro 2).

Cuadro 2. Escorrentía superficial (mm) generada según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h⁻¹, Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Clase Hidrológica ^β | Suelo por | | n | Área (ha) | Escorrentía (mm) | | | | | (m ³ / ha) | |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----|-----------|------------------|-------|------|------|------|-----------------------|------------------------|
| | Profundidad Efectiva | Familia Textural [£] | | | Media. Pond. | Media | Mín. | Máx. | Var. | Desv. Típ. | Volumen de escorrentía |
| B | Superficial y Muy Superficial | (M/g)/G | 10 | 2.88 | 0.16 | 1.90 | 1.09 | 2.35 | 0.19 | 0.43 | 19.0 |
| C | Superficial y Profundo | F-/g | 15 | 15.20 | 0.43 | 0.98 | 0.24 | 1.95 | 0.34 | 0.58 | 9.8 |
| C | Moderado | F-/(g-M) | 15 | 4.38 | 0.22 | 1.72 | 0.26 | 3.36 | 0.96 | 0.98 | 17.2 |
| C | Superficial, Moderado y Profundo | F-/F+ | 20 | 12.54 | 0.52 | 1.45 | 1.09 | 2.35 | 0.37 | 0.61 | 14.5 |
| Total | | | | | | | | | | | 460 |

H= 12.27

P= 0.006

^β Clasificación por clase hidrológica: A= Suelos de infiltración rápida y drenaje perfecto, B= Suelos de infiltración moderada y drenaje de bueno a moderado, C= Suelos de infiltración lenta y drenaje imperfecto y D= Suelos de infiltración muy lenta y drenaje pobre a muy pobre (U.S. Soil Conservation Service 1972).

[£] Textura dominante clasificada según profundidad en cm [(0-30/30-60)]/[(60-90/90-120)].

Según los resultados obtenidos del análisis hidrológico se determinó que en promedio en la Zona 1 el coeficiente de escorrentía es de 0.35 (Cuadro 3). En términos generales los coeficientes de escorrentía dependen del uso del suelo, el tipo de cobertura existente y la pendiente en la zona (Dunne y Leopold 1978, Pilgrim y Cordery 1993).

Cuadro 3. Coeficiente de escorrentía superficial según familias texturales de suelo en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Suelo por | | Familia Textural [£] | n | Área (ha) | Media | Media Pond. | Mín. | Máx. | Var. | Desv típ. |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----|-----------|-------|-------------|------|------|------|-----------|
| Clase Hidro. ^β | Prof. Efectiva | | | | | | | | | |
| B | Superficial y Muy Superficial | (M/g)/G | 10 | 2.88 | 0.51 | 0.04 | 0.29 | 0.63 | 0.01 | 0.12 |
| C | Superficial y Profundo | F-/g | 15 | 15.20 | 0.26 | 0.11 | 0.06 | 0.52 | 0.02 | 0.16 |
| C | Moderado | F-/(g-M) | 15 | 4.38 | 0.46 | 0.06 | 0.07 | 0.90 | 0.07 | 0.26 |
| C | Superficial Moderado y Profundo | F-/F+ | 20 | 12.54 | 0.39 | 0.14 | 0.05 | 0.56 | 0.03 | 0.16 |
| Promedio Ponderado | | | | | | 0.35 | | | | |

^β Clasificación por clase hidrológica: A= Suelos de infiltración rápida y drenaje perfecto, B= Suelos de infiltración moderada y drenaje de bueno a moderado, C= Suelos de infiltración lenta y drenaje imperfecto y D= Suelos de infiltración muy lenta y drenaje pobre a muy pobre (U.S. Soil Conservation Service 1972).

[£] Textura dominante clasificada según profundidad en cm [(0-30/30-60)]/[(60-90/90-120)].

La pérdida de suelo total fue en promedio de 0.35 t/evento y para las 34.94 ha la pérdida de suelo para la precipitación simulada fue de 12.07 t. La familia textural media sobre grava y roca ((M/g)/G) y la fina sobre arena y media (F-/(g-M)) son las más susceptibles a la pérdida de sólidos, ya que por ser conformados en su primer horizonte por texturas medias son más susceptibles a la erosión hídrica (Brady y Weil 1999). La pérdida de estos suelos por escorrentía superficial es de 0.47 t/ha. La familia textural con menor exportación de sólidos fue la fina sobre arena (F-/g) con una pérdida promedio de 0.24 t/ha, ya que las partículas finas de las arcillas son capaces de unirse por su característica de pegajosidad que les permite no ser susceptibles a la erosión hídrica (Brady y Weil 1999) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Sólidos arrastrados según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Clase Hidrológica ^β | Suelo por | | | Área (ha) | Arrastre de sólidos | |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----|-----------|---------------------|--------------|
| | Profundidad Efectiva | Familia Textural ^ε | n | | (t/ha) | (t/área) |
| B | Superficial y Muy Superficial | (M/g)/G | 10 | 2.88 | 0.47 | 1.35 |
| C | Superficial y Profundo | F-/g | 15 | 15.2 | 0.24 | 3.68 |
| C | Moderado | F-/g-M) | 15 | 4.38 | 0.47 | 2.04 |
| C | Superficial, Moderado y Profundo | F-/F+ | 20 | 12.54 | 0.40 | 5.00 |
| Total | | | | | 0.35 | 12.07 |

H= 15.23

P= 0.02

^β Clasificación por clase hidrológica: A= Suelos de infiltración rápida y drenaje perfecto, B= Suelos de infiltración moderada y drenaje de bueno a moderado, C= Suelos de infiltración lenta y drenaje imperfecto y D= Suelos de infiltración muy lenta y drenaje pobre a muy pobre (U.S. Soil Conservation Service 1972).

^ε Textura dominante clasificada según profundidad en cm [(0-30/30-60)]/[(60-90/90-120)].

Según los resultados de arrastre de PO₄⁻³ la familia textural más propensa y que mayor concentración de PO₄⁻³ genera es la fina (F-/F+) con un promedio de 4.3 mg/L y valores máximos de concentración de 8.98 mg/L, mientras que el valor promedio de concentración de PO₄ para Zona 1 es de 2.38 mg/L (Cuadro 5). Los fosfatos origina eutrofización en cuerpos de agua, la cual se define como un incremento en la fertilidad de las aguas naturales que causa un acelerado crecimiento de algas o plantas acuáticas y en este caso el fósforo es considerado el nutriente que determina si más biomasa puede o no producirse en los sistemas acuáticos (Heathcote 1998).

Desde el punto de vista de fertilidad del suelo se identificó un promedio de pérdida de fósforo de la forma P₂O₅ de 0.84 kg para la Zona 1 a causa de una intensidad de lluvia de 75 mm h⁻¹, constante durante 15 minutos. Los valores más altos de pérdida de fósforo se obtuvieron en los suelos de texturas finas (F-/F+) con un valor de 1.76 mg/m², los cuales abarcan el 36 % del área total de Zona 1 (Cuadro 6). Esta pérdida desde el punto de vista económico representa un costo de 0.04 \$/ha si se realiza una aplicación de fosfato diamónico (DAP) y de 0.07 \$/ha si se realiza una aplicación de fertilizante completo (Cuadro 7) (FHIA 2011).

Cuadro 5. Fosfatos (PO_4^{-3}) arrastrados según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h^{-1} en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Suelo por | | | Concentración de PO_4^{-3} (mg/L) | | | | | | | |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--|-----------|-------|-------------|------|------|------|------------|
| Clase Hidro. ^β | Profundidad Efectiva | Familia Textural ^ξ | n | Área (ha) | Media | Media Pond. | Mín. | Máx. | Var. | Desv. Típ. |
| B | Superficial y Muy Superficial | (M/g)/G | 10 | 2.88 | 0.2 | 0.02 | 0.03 | 0.3 | 0.01 | 0.09 |
| C | Superficial y Profundo | F-/g | 15 | 15.2 | 1.1 | 0.48 | 0.47 | 1.94 | 0.17 | 0.41 |
| C | Moderado | F-/g-M) | 10 | 4.38 | 2.8 | 0.35 | 0.1 | 6.63 | 6.29 | 2.51 |
| C | Superficial, Moderado y Profundo | F-/F+ | 15 | 12.54 | 4.3 | 1.54 | 0.51 | 8.98 | 11.2 | 3.34 |
| Total | | | | | | 2.38 | | | | |

H= 22.94

P= 0.00004

^β Clasificación por clase hidrológica: A= Suelos de infiltración rápida y drenaje perfecto, B= Suelos de infiltración moderada y drenaje de bueno a moderado, C= Suelos de infiltración lenta y drenaje imperfecto y D= Suelos de infiltración muy lenta y drenaje pobre a muy pobre (U.S. Soil Conservation Service 1972).

^ξ Textura dominante clasificada según profundidad en cm [(0-30/30-60)]/[(60-90/90-120)].

Cuadro 6. Pérdida de fósforo (P_2O_5) según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h^{-1} en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Suelo por | | | | Pérdida de P_2O_5 | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----|---------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Clase Hidrológica ^β | Profundidad Efectiva | Familia Textural ^ε | n | Área (ha) | Media (mg/m ²) | Media Pond. (mg/m ²) | Media Pond. (kg/ha) |
| B | Superficial y Muy Superficial | (M/g)/G | 10 | 2.88 | 0.25 | 0.02 | 0.0002 |
| C | Superficial y Profundo | F-/g | 15 | 15.20 | 0.68 | 0.30 | 0.0030 |
| C | Moderado | F-/g-M) | 10 | 4.38 | 2.54 | 0.32 | 0.0032 |
| C | Superficial, Moderado y Profundo | F-/F+ | 15 | 12.54 | 2.54 | 1.76 | 0.0176 |
| Total (kg/Zona 1) | | | | | | | 0.84 |

H= 22.94

P= 0.00004

^β Clasificación por clase hidrológica: A= Suelos de infiltración rápida y drenaje perfecto, B= Suelos de infiltración moderada y drenaje de bueno a moderado, C= Suelos de infiltración lenta y drenaje imperfecto y D= Suelos de infiltración muy lenta y drenaje pobre a muy pobre (U.S. Soil Conservation Service 1972).

^ε Textura dominante clasificada según profundidad en cm [(0-30/30-60)]/[(60-90/90-120)].

Cuadro 7. Costo del (P_2O_5) perdido durante una lluvia con una intensidad de 75 mm h^{-1} en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Fertilizante | Concentración (%) | | | Precio ⁰ \$/kg | Costo de Pérdida \$/ha | Tendencia de precio en Honduras |
|--------------|-------------------|----------|--------|---------------------------|------------------------|---------------------------------|
| | N | P_2O_5 | K_2O | | | |
| DAP Fert. | 18 | 46 | 0 | 0.81 | 0.04 | Aumento |
| Completo | 12 | 24 | 12 | 0.67 | 0.07 | Disminución |

Fuente de datos: ⁰ Fondo Hondureño de Investigación Agrícola (FHIA 2011).

Según los resultados obtenidos se identificó que el suelo de familia textural media sobre grava y roca ((M/g)/G) es el más susceptible a aportar concentraciones altas de NO_3^{-2} a las corrientes de agua superficial con un promedio de 1.8 mg/L, mientras que el valor máximo reportado corresponde a la familia textural fina sobre arena (F-/g) con una concentración promedio de 8.6 mg/L. La concentración promedio para toda Zona 1 es de 20 mg/L (Cuadro 8).

Cuadro 8. Nitratos (NO_3^{-2}) arrastrados según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h^{-1} en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Suelo por | | | Concentración de NO_3^{-2} (mg/L) | | | | | | | |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--|-----------|-------|-------------|------|------|--------|-----------|
| Clase Hidro. ^β | Profundidad Efectiva | Familia Textural ^ε | n | Área (ha) | Media | Media Pond. | Mín. | Máx. | Var. | Desv Típ. |
| B | Superficial y Muy Superficial | (M/g)/G | 2 | 2.88 | 22.3 | 1.8 | 22.3 | 22.3 | 0.00 | 0.00 |
| C | Superficial y Profundo | F-/g | 3 | 15.20 | 19.8 | 8.6 | 9.9 | 34.1 | 160.29 | 12.66 |
| C | Moderado | F-/g-M) | 2 | 4.38 | 12.7 | 1.6 | 11.8 | 13.6 | 1.73 | 1.32 |
| C | Superficial, Moderado y Profundo | F-/F+ | 3 | 12.54 | 21.3 | 7.6 | 11.2 | 29.8 | 88.54 | 9.41 |
| Total | | | | | | 20 | | | | |

H= 1.33

P= 0.7207

^β Clasificación por clase hidrológica: A= Suelos de infiltración rápida y drenaje perfecto, B= Suelos de infiltración moderada y drenaje de bueno a moderado, C= Suelos de infiltración lenta y drenaje imperfecto y D= Suelos de infiltración muy lenta y drenaje pobre a muy pobre (U.S. Soil Conservation Service 1972).

^ε Textura dominante clasificada según profundidad en cm [(0-30/30-60)]/[(60-90/90-120)].

Los efectos de los nitratos en la salud humana se dan a través del agua de consumo e incluso algunos alimentos que presentan elevadas cargas de NO_3^{-2} . El efecto más conocido sobre la salud humana es el síndrome del bebé azul y posibles efectos carcinogénicos. En los procesos de eutrofización la concentración de nitratos puede generar el crecimiento de algas, el aumento de la turbiedad del agua y la reducción del oxígeno disuelto (O_2). La situación respecto a la contaminación generada por compuestos nitrogenados es de carácter delicado, ya que los niveles de NO_3^{-2} necesarios para producir eutrofización en cuerpos de agua se encuentran por debajo de los valores asociados a la contaminación de agua de consumo (Pierzinsky 2000). Desde el punto de vista de la fertilidad del suelo se identificó un promedio de pérdida de N de 10.40 kg para la Zona 1 como resultado del evento simulado. Los valores promedios de pérdida más altos fueron determinados por los suelos de texturas finas (F-/F+) con valores promedio de 11.8 mg/m^2 (Cuadro 9). Esta pérdida desde el punto de vista económico representa un costo de $0.44 \text{ \$/ha}$ si se aplica urea y $0.48 \text{ \$/ha}$ si se realiza una aplicación de nitrato de amonio, sin considerar el costo económico y ambiental del suelo perdido (Cuadro 10) (FHIA 2011).

Cuadro 9. Pérdida de nitrógeno (N) según familias texturales de suelo para una intensidad de lluvia de 75 mm h⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Suelo por | | | n | Área por familia textural (ha) | Pérdida de N | | |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Clase Hidrológica ^β | Profundidad Efectiva | Familia Textural ^ξ | | | Media (mg/m ²) | Media Pond. (mg/m ²) | Media Pond. (kg/ha) |
| B | Superficial y Muy Superficial | (M/g)/G | 2 | 2.88 | 48 | 3.94 | 0.04 |
| C | Superficial y Profundo | F-/g | 3 | 15.20 | 25 | 10.88 | 0.11 |
| C | Moderado | F-/g-M) | 2 | 4.38 | 24 | 3.00 | 0.03 |
| C | Superficial, Moderado y Profundo | F-/F+ | 3 | 12.54 | 33 | 11.81 | 0.12 |
| Total (kg/Zona 1) | | | | | | | 10.40 |

H= 1.33

P= 0.7207

^β Clasificación por clase hidrológica: A= Suelos de infiltración rápida y drenaje perfecto, B= Suelos de infiltración moderada y drenaje de bueno a moderado, C= Suelos de infiltración lenta y drenaje imperfecto y D= Suelos de infiltración muy lenta y drenaje pobre a muy pobre (U.S. Soil Conservation Service 1972).

^ξ Textura dominante clasificada según profundidad en cm [(0-30/30-60)]/[(60-90/90-120)].

Cuadro 10. Costo del (N) perdido durante una lluvia con una intensidad de 75 mm h⁻¹ en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Fertilizante | Concentración (%) | | | Precio ^ω \$/kg | Costo de Pérdida \$/ha | Tendencia del precio para Honduras |
|-------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------------|
| | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | | | |
| Urea | 46 | 0 | 0 | 0.68 | 0.44 | Disminución |
| Nitrato de amonio | 34 | 0 | 0 | 0.56 | 0.48 | Disminución |

Fuente de datos: ^ω Fondo Hondureño de Investigación Agrícola (FHIA 2011).

4. CONCLUSIONES

- Bajo condiciones de lluvias de alta intensidad y corta duración en época lluviosa, los suelos de Zona 1 de Zamorano generan procesos hortonianos de escorrentía superficial de hasta 90 % de la precipitación incidente. Estos procesos de escorrentía superficial y baja infiltración resultan en arrastre de suelos, pérdida de nutrientes y pérdida de fertilidad de los suelos estudiados.
- Se encontraron variaciones en el coeficiente de escorrentía en los diferentes sitios de simulación. Esto demuestra la influencia de las características texturales en los procesos que desfavorecen la infiltración y por consiguiente aumentan la escorrentía. Se calculó un coeficiente de escorrentía promedio para la Zona 1 de 0.35. En suelos de familia textural fina (F-/F+) el coeficiente de escorrentía es de 0.14 mientras que en suelos de familia textural media sobre grava y roca ((M/g)/G) es de 0.04.
- Como resultado de los eventos de precipitación simulados, las pérdidas de suelo son en promedio de 0.35 t/ha/evento y la fertilidad se ve diezmada en 0.024 kg/P₂O₅/ha y de 0.3 kg/N/ha. Los datos obtenidos revelan la necesidad de la implementación de medidas de conservación de suelos en el valle del Yeguaré y revelan las implicaciones de los procesos de precipitación-escorrentía-pérdida de suelos en la movilización de nutrientes del suelo. Se identifica la zona productiva de Zamorano como una fuente potencial no puntual de contaminación a cuerpos de agua superficiales en temporada lluviosa.
- Los suelos de familia textural fina (F-/F+) y media sobre grava y roca ((M/g)/G)) son los más vulnerables a la pérdida de sólidos mientras que el suelo de familia textural fina (F-/F+) pierde más fosfatos y el suelo de familia textural media sobre grava y roca ((M/g)/G) pierde más nitratos. Las pérdidas de suelo cuantificadas son en promedio para Zona 1 de 12.07 t/evento.
- El simulador de lluvia utilizado en el presente estudio ha sido desarrollado para producir lluvia en lugares remotos para los estudios de escorrentía, con facilidad de operación y la portabilidad del diseño. Este simulador permite realizar estudios de escorrentía en lugares que carecen de acceso a agua y electricidad y permite a la vez contar con una herramienta para realizar estudios comparativos similares que requieren de condiciones replicables y constantes de precipitación.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios similares en los suelos de la Escuela Agrícola Panamericana de vocación forestal después de un incendio para determinar la pérdida de nutrientes durante un evento de lluvia y así comparar el efecto de los incendios forestales sobre la fertilidad de los suelos.
- Desarrollar para cada tipo de suelo un plan de manejo y conservación en donde se evite la pérdida de suelo y arrastre nutrientes y de esta manera reducir los costos de producción de los diferentes cultivos que producen anualmente en Zona 1. Asimismo y de forma simultánea se deberán realizar estudios de evaluación técnica, económica y ambiental de la erosión y la fertilidad del suelo y los cultivos.
- Utilizar un remolque equipado con el tanque de agua para que sea más fácil de movilizar cuando se esté trabajando en campo con el simulador de lluvia.
- Calibrar el simulador con la boquilla (½ HH-50WSQ Spraying Systems Co.) para la determinación del comportamiento de los suelos a diferentes intensidades de precipitación.
- Realizar ajustes al simulador que permitan mayores elevaciones sobre el suelo y un mejor ajuste a la altura deseada para así obtener las características de energía cinética deseadas en la lluvia.
- Durante la realización de futuros estudios se deberá contar con un cronograma sincronizado entre los productores que hacen uso del suelo y los investigadores, con el fin de evitar alteraciones al suelo objeto de estudio por prácticas agrícolas.

6. LITERATURA CITADA

Almoza, Y; Medina, H; Schiettecatte, W; Alonso, G; Rúaiz, M. 2008. El uso de datos pluviométricos para la determinación del factor erosividad de las precipitaciones en el modelo RUSLE. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 17 (1): 4-5.

Arévalo, G; Gauggel, C. 2010. Manual de prácticas de manejo de suelos y nutrición vegetal. 5 ed. EAP Zamorano. Honduras. 75 p.

Brady, C; Weil, R. 1999. The Nature of Properties of Soils. 12 ed. New Jersey, USA. Prentice-Hall. 881 p.

Covert, A; Jordan, P. 2009. A Portable Rainfall Simulator: Techniques for Understanding the Effects of Rainfall on Soil Erodibility (en línea). Streamline Watershed Management Bulletin no. 1. Consultado 2 may. 2011. Disponible en http://www.forrex.org/streamline/ISS41/Streamline_Vol13_No1_art2.pdf

Dueñez; A; Gutiérrez, J; Pérez, L; Návar; J. 2008. Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión (en línea). TERRA Latinoamericana, Vol. 24, Núm. 2. Consultado 20 sept. 2011. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57311108010>

Dunne, T; Leopold, L. 1978. Water in Environmental Plannig. New York, USA. W.H. Freeman and Company. 818 p.

Esquivel Palma, C. J; Mendoza Barzola, C. Q. 2011. Plan de manejo y conservación de suelos para la producción de sandía y forraje en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería Agronómica, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 43 p.

FAO (Organización de las Naciones unidas para la Agricultura y la Alimentación, It). 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos: Estudio de riego y drenaje (en línea). Consultado 23 may. 2011. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/w2598s/w2598s00.htm#contents>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, It). 1994. Erosión de Suelos en América Latina (en línea). Consultado 22 may. 2011. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S00.htm>

FHIS (Fondo Hondureño de Inversión Social). 2000. Manual de Referencias Hidrológicas para el Diseño de Obras de Drenaje Menor. HN. s.e. 370 p.

FHIA (Fondo Hondureño de Inversión Agrícola). 2011. Reporte semanal de precios de insumos agrícolas de Honduras (en línea). Consultado 12 de oct. 2011. Disponible en: http://www.fhia.org.hn/downloads/simpah_pdfs/3._Reporte_semanal_de_precios_de_insumos_agricolas_de_Honduras.pdf

Hach Company. 2000. Manual de análisis de agua (en línea). 2 ed. Colorado, EUA. 220p. Consultado 23 may. 2011. Disponible en <http://www.hach.com/fmmimghach?/code%-3a2814500528|1>

Heathcote, I. 1998. Integrated watershed Management principles and practice. Editorial John Wiley & Sons, Inc. New York. 414 p.

Huang, J; Hong, H; Zhang, L. 2008. Control division of agricultural non-point source pollution at medium-sized watershed scale in southeast china (en línea). *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China* no. 3. Consultado 21 may. 2011. Disponible en <http://www.springerlink.com/content/55722976j758666r/fulltext.pdf>

Humphry, B; Daniel, T; Edwards, D; Sharpley, A. 2002. A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies (en línea). *Applied Engineering in Agriculture* 18(2):199–204. Consultado el 16 sept. 2011. Disponible en <http://asae.frymulti.com/azdez.asp?search=1&JID=3&AID=7789&CID=aeaj2002&v=18&i=2&T=1>

Kinner, D; Moody, J. 2008, Infiltration and runoff measurements on steep burned hillslopes using a rainfall simulator with variable rain intensities (en línea). U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007–5211. Consultado 20 sept. 2011. Disponible en <http://pubs.usgs.gov/sir/2007/5211/pdf/SIR07-5211.pdf>

Leal, T; Millán, D; Méndez, C; Servín, C. 2008. Evaluación de la afectación de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales y subterráneos por efecto de la variabilidad y el cambio climático y su impacto en la biodiversidad, agricultura, salud, turismo e industria. (en línea). Consultado 10 sept. 2011. Disponible en http://cms1.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/ev_calidad_agua_cc.pdf

Leal, Z; Díaz, J; Schiettecatte, W; Ruiz E; Almoza, Y. 2007. Efecto de la cobertura vegetal de cultivos agrícolas principales sobre el proceso de erosión en suelos de la cuenca del río Cuyaguaje. (en línea). *Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Consultado 19 sept. 2011. disponible en: <http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=-1b1add90-189e-4657-9b43-684a8ee39322%40sessionmgr15&vid=1&hid=25>

Pierzynski, G.; Sims, T.; Vance, G. 2000. *Solis and Environmental Quality*. 2ed. Editorial CRS. New York. 459 p.

Pilgrim, D; Cordery, I. 1993. Flood runoff. In David, M. ed. *Handbook of Hydrology*. New York, USA, McGraw-Hill. p. 9.1-9.42.

Pimentel, D; Allen, J; Beers, A; Guinand, L; Linder, R; Mclaughlin, P; Meer, B; Musonda, D; Perdue, D; Poisson, S; Siebert, S; Stoner, K; Salazar, R; Hawkins, A. 1987. World agriculture and soil erosion: erosion threatens world food production (en línea). Bioscience no. 4. Consultado 24 may. 2011. Disponible en <http://www.jstor.org/stable/1310591?seq=1>

Plaster. E. 2000. La Ciencia del Suelo y su Manejo. Madrid, ES. Paraninfo. 419 p.

Sain, J; Tripp, R; Brenes, E. 1994. Desafíos presente y futuros del medio ambiente y la productividad de la agroempresa centroamericana (en línea). San José. INCAE. Consultado 20 sept. 2011. Disponible en http://books.google.hn/books?hl=es&lr=&id=zCbOT5dA_8C&oi=fnd&pg=PA7&dq=perdida+de+suelo+en+centroamerica&ots=veTxfe3TXg&sig=0KeqfrOaWUAL8EuIvLnWk8IyHyA#v=onepage&q&f=false

Sharpley, A; Kleinman, P; Wright, R; Daniel, T; Joern, B; Parry, R; Sobocki, T. 2002. The National Phosphorus Project: Addressing the interface of agriculture and environmental phosphorus management in the USA (en línea). In J Steenvoorden; F Claessen; J Willems. eds. Agricultural Effects on Ground and Surface Waters: Research at the Edge of Science and Society (2000, Wageningen, Ned). International Association of Hydrological Sciences. no. 273. Wallingford, Eng. IAHS Press. p. 95-100. Consultado el 17 sept. 2011. Disponible en http://iahs.info/redbooks/a273/iahs_273_095.pdf

Srinivasan, M; Sharpley, A; Kleinman, P; Buob, T; Gburek, w. 2007. Hydrology of Small Field Plots used to Study Phosphorus Runoff Under Simulated Rainfall (en línea). Journal of Environmental Quality. Consultado 10 may. 2011. Disponible en <http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/17489/1/ind44004332.pdf>

Thiagarajan, A; Gordon, R; Madani, A; Stratton, g. 2007. Discharge of *Escherichia coli* from Agricultural Surface and Subsurface Drainage Water: Tillage Effects (en línea). Water, Air, & Soil Pollution no. 182. Consultado 23 may. 2011. Disponible en <http://www.springerlink.com/content/hl24544188114039/fulltext.pdf>

U.S. Soil Conservation Service. 1972. Hydrology, section 4, National Engineering handbook. Washington DC, USA.

Van Hecke, T. 2010. Power study of anova versus Kruskal-Wallis test (en línea). Consultado 3 Nov. 2011. Disponible en <http://interstat.statjournals.net/YEAR/2010/articles/1011002.pdf>

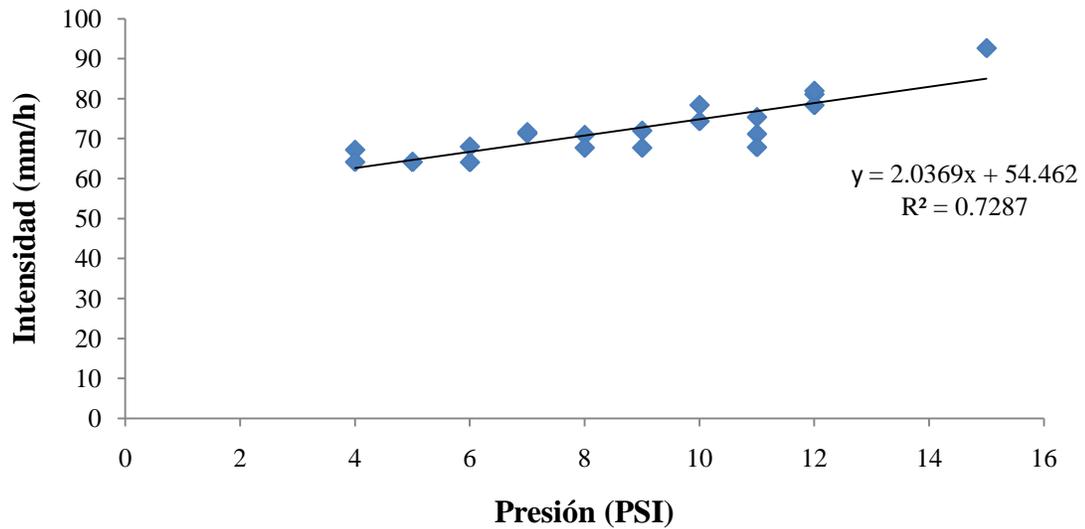
Walkley, A; Black, I. 1934. An Examination of Degjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. Soil Sci. 37:29-37.

7. ANEXOS

Anexo 1. Calibración para boquilla ½ HH- 50WSQ.

| Presión (PSI) | Lam. Inicial (mm) | Lam. Final (mm) | Diferencia (mm) | Tiempo (min) | Intensidad (mm/h) |
|------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| 4PSI | 2.00 | 6.20 | 4.20 | 3.75 | 67.20 |
| 4PSI | 4.20 | 7.80 | 3.60 | 3.37 | 64.16 |
| 5PSI | 7.40 | 11.00 | 3.60 | 3.37 | 64.16 |
| 5PSI | 11.80 | 15.40 | 3.60 | 3.37 | 64.16 |
| 6PSI | 15.80 | 19.20 | 3.40 | 3.18 | 64.08 |
| 6PSI | 17.40 | 20.80 | 3.40 | 3.00 | 68.00 |
| 7PSI | 20.60 | 24.60 | 4.00 | 3.37 | 71.29 |
| 7PSI | 22.40 | 26.20 | 3.80 | 3.18 | 71.62 |
| 8PSI | 27.80 | 31.80 | 4.00 | 3.38 | 70.94 |
| 8PSI | 28.20 | 32.00 | 3.80 | 3.37 | 67.72 |
| 9PSI | 83.20 | 87.00 | 3.80 | 3.37 | 67.72 |
| 9PSI | 35.40 | 39.00 | 3.60 | 3.00 | 72.00 |
| 10PSI | 33.80 | 38.20 | 4.40 | 3.55 | 74.37 |
| 10PSI | 43.60 | 48.00 | 4.40 | 3.37 | 78.42 |
| 11PSI | 53.80 | 65.80 | 12.00 | 10.12 | 71.17 |
| 11PSI | 69.60 | 73.20 | 3.60 | 3.18 | 67.85 |
| 11PSI | 52.00 | 56.00 | 4.00 | 3.18 | 75.39 |
| 12PSI | 46.20 | 51.00 | 4.80 | 3.55 | 81.13 |
| 12PSI | 75.80 | 81.20 | 5.40 | 4.13 | 78.39 |
| 12PSI | 59.40 | 64.00 | 4.60 | 3.37 | 81.98 |
| 15PSI | 70.00 | 75.20 | 5.20 | 3.37 | 92.67 |

Anexo 2. Gráfica de correlación entre presión aplicada e intensidad generada.

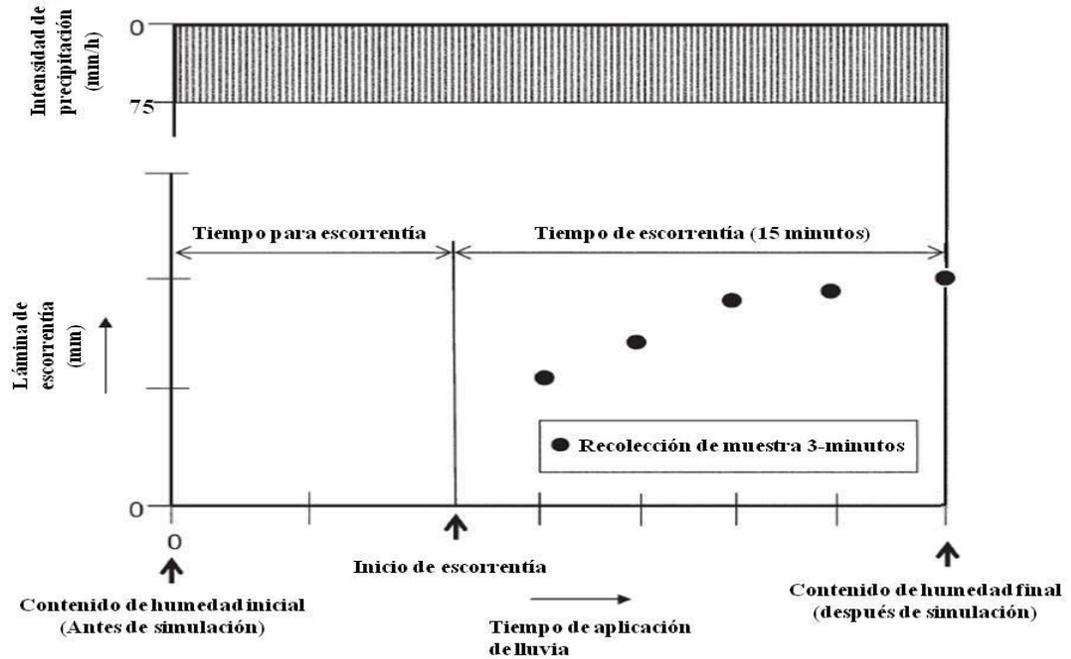


Anexo 3. Localización de puntos de muestreo para la recolección de muestras en Zona 1, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

| Unidad de suelo por familia textural | Número de Simulación | Ubicación Geográfica (UTM) | |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------------|---------|
| | | X | Y |
| (M/g)/G | 9 | 500119 | 1548945 |
| (M/g)/G | 10 | 500239 | 1548939 |
| F-/g | 1 | 500074 | 1549447 |
| F-/g | 3 | 500433 | 1548915 |
| F-/g | 4 | 500294 | 1549270 |
| F-/g-M | 6 | 500468 | 1549367 |
| F-/g-M | 7 | 500502 | 1549281 |
| F-/g-M | 8 | 500396 | 1549292 |
| F-/F+ | 2 | 500219 | 1549122 |
| F-/F+ | 5 | 500005 | 1549157 |
| F-/F+ | 11 | 500161 | 1549156 |
| F-/F+ | 12 | 499817 | 1549116 |

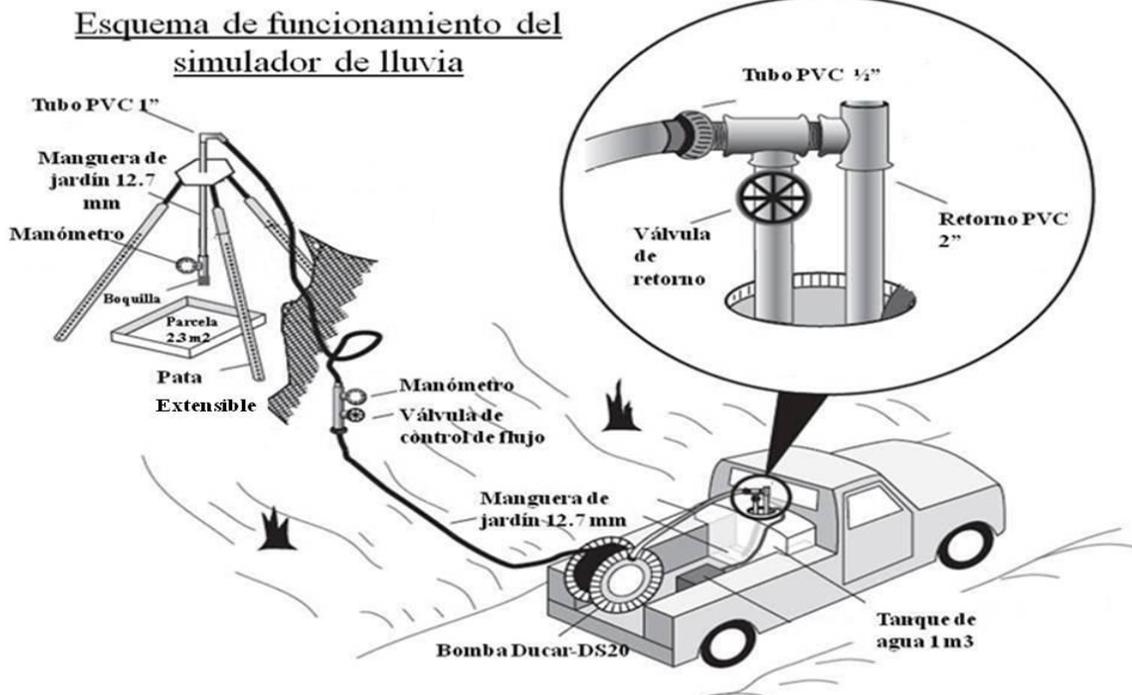
UTM: Sistema Universal de Medida Transversal

Anexo 4. Esquema de recolección de datos durante los experimentos de precipitación y escorrentía.



Fuente: Srinivasan *et al.* (2007) adaptado por los autores.

Anexo 5. Esquema del funcionamiento del simulador de lluvia.



Fuente: Kinner y Moody 2008.

Anexo 6. Análisis de humedad, escorrentía generada, arrastre de sólidos y materia orgánica de las muestras recolectadas en campo.

| Familia Textural | Número de simulación | Humedad (%) | Lluvia generada (mm) | Escorrentía generada (mm) | Arrastre de sólidos (g) | Materia orgánica (%) |
|------------------|----------------------|-------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------|
| (M/g)/G | 9 | 8.00 | 18.75 | 8.58 | 73 | 2.43 |
| (M/g)/G | 10 | 6.00 | 18.75 | 10.44 | 142 | 2.37 |
| F-/g | 1 | 13.00 | 18.75 | 4.18 | 30 | 3.09 |
| F-/g | 3 | 12.00 | 18.75 | 7.18 | 38 | 1.91 |
| F-/g | 4 | 12.00 | 18.75 | 3.31 | 99 | 3.57 |
| F-/(g-M) | 6 | 12.00 | 18.75 | 4.99 | 25 | 2.91 |
| F-/(g-M) | 7 | 12.00 | 18.75 | 9.82 | 103 | nd ^δ |
| F-/(g-M) | 8 | 11.00 | 18.75 | 11.06 | 191 | 4.01 |
| F-/F+ | 2 | 10.00 | 18.75 | 7.87 | 100 | nd ^δ |
| F-/F+ | 5 | 8.00 | 18.75 | 7.41 | 44 | 2.19 |
| F-/F+ | 11 | 8.00 | 18.75 | 6.20 | 122 | 2.30 |
| F-/F+ | 12 | 9.00 | 18.75 | 7.43 | 101 | 2.04 |

^δNo determinada.