

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Agrícola

Tesis de Grado

Para optar por el título de

Licenciatura en Ingeniería Agrícola

*Evaluación de Sistema de Sacos de Geotextil en Condiciones  
Simuladas: Implicaciones en Control de Erosión*

---

Ing. Georgina Sánchez Salas

*Ciudad Universitaria Rodrigo Facio*

*San José, Costa Rica*

*Junio 2012*

Sometido a la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica como requisito parcial para optar por el grado de:

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

*Esta Tesis fue aprobada por el Tribunal Evaluador*

---

Ing. Geovanni Carmona Villalobos,  
Presidente del Tribunal

---

Ing. Alejandra Rojas González, MSc.  
Miembra del Tribunal

---

Ing. José Francisco Aguilar Pereira, MSc.  
Director, Escuela de Ingeniería Agrícola  
Director del Proyecto

---

Ing. Ronald Aguilar Álvarez  
Lector asesor del Proyecto

---

Ing. Edwin Solórzano Campos, MSc  
Lector asesor del Proyecto

*Sustentante*

---

Ing. Georgina Sánchez Salas

## Dedicatoria

*Quisiera dedicarle el esfuerzo que se concreta en este trabajo a mis padres Arnoldo Sánchez y Gina Salas. Quienes han dedicado su vida y energía a que, tanto yo como mis hermanos, recibiéramos la mejor educación posible. Ellos supieron inculcarme el valor del estudio y del trabajo honesto.*

*Le agradezco a Dios por favorecerme con la guía y apoyo incondicional que me han brindado mis padres en cada paso de mi vida. Su motivación y empuje es lo que me ha llevado hoy a iniciar una nueva etapa de crecimiento personal y profesional al continuar mis estudios de maestría en el extranjero.*

*Mis logros siempre serán sus logros.*

## Reconocimiento

Gracias a Dios puedo reconocer y agradecer el trabajo, apoyo y colaboración de tantas personas involucradas en el desarrollo de este proyecto. El intercambio de conocimientos que ayudó a conjugar esta tesis es basto gracias a todas estas personas que influyeron tan positivamente.

Msc. José Francisco Aguilar, Director de la Escuela de Ingeniería Agrícola y Director del Proyecto, por la guía brindada en cada momento, sus aportes y conocimiento para concretar este trabajo.

Msc. Edwin Solorzano, Decano de la Facultad de Ingeniería y Asesor del Proyecto, por siempre tener la disposición para poyarme, por sus aportes e intercambio de conocimiento.

Ing. Ronald Aguilar, Profesor de la Escuela de Ingeniería Agrícola y Asesor del Proyecto, por el esmero dedicado a mejorar la calidad de este proyecto.

Ing. Roger Bonilla, por su esfuerzo brindado al asesorarme en el área estadística y todo el tiempo invertido generosamente.

Ing. Geovanni Carmona, Profesor de la Escuela de Ingeniería Agrícola, por su interés hacia este proyecto y su apoyo al formar parte del Comité Evaluador.

PhD. Alejandra Rojas, Profesora de la Escuela de Ingeniería Agrícola, por su tiempo prestado, aportes y anuencia a colaborar en este proyecto al ser parte del Comité Evaluador.

PhD Ajit Srivastava, Director del departamento de Biosistemas e Ingeniería Agrícola de la Universidad Estatal de Michigan, mil gracias por abrirme las puertas de su universidad, permitirme ser pionera en el intercambio UCR-MSU y brindarme la oportunidad de desarrollar mi proyecto de Tesis con el apoyo absoluto de la escuela de Biosistemas.

PhD. Dawn Reinhold, Profesora del departamento de Biosistemas e Ingeniería Agrícola de la Universidad Estatal de Michigan y Asesora Directa del Proyecto, por su guía y apoyo incondicional. Fue un honor para mí ser parte de su grupo de trabajo. Le agradezco muchísimo su tiempo y el conocimiento que me transfirió, además de toda su paciencia. El enriquecimiento profesional que adquirí gracias a usted trasciende las fronteras de este trabajo.

Ing. Melissa Rojas, Colega y Colaboradora directa del Proyecto, por todo el esfuerzo brindado para ayudar a concretar este proyecto, por las horas de duro trabajo y el conocimiento intercambiado durante el proceso de experimentación. Gracias por ser una excelente compañera de trabajo e incondicional en todo momento, siempre es un honor trabajar con tan excelente profesional.

Msc. Phill Hill, Especialista del departamento de Biosistemas e Ingeniería Agrícola de la Universidad Estatal de Michigan, por su asesoría, consejos y total disposición para colaborar durante el proceso de diseño y construcción de estructuras.

Msc. Steve Marquie, Investigador del departamento de Biosistemas e Ingeniería Agrícola de la Universidad Estatal de Michigan, por su apoyo y disposición en la búsqueda de herramientas tecnológicas aplicables al proyecto.

Douglas Gordillo, por su incondicional ayuda durante el montaje del sistema de recolección de datos remoto.

A mi tía, Beatriz Salas Feyth, quien me dedicó el amor, apoyo y cariño de una madre. No tengo palabras para agradecer el esfuerzo que depositaste en mí. Todo el conocimiento que me brindaste me está ayudando hoy a iniciar con una nueva etapa de mi vida.

## Resumen

Costa Rica es un país que presenta condiciones idóneas para la degradación de sus suelo a causa de la erosión, esto, sumado a las malas práctica de manejo de suelo y agrícolas es el resultado de tasas de hasta 100 ton/hec/año (Programa Estado de la Nación, 2007). El objetivo de este proyecto fue comparar la eficiencia en remoción de sedimentos y el impacto sobre el volumen de flujo superficial que ejercen sacos de geotextil empleados como elementos perimetrales de control de erosión. Para lograrlo se disponen condiciones simuladas que buscan representar condiciones típicas/extremas de usos de suelo agrícolas en Costa Rica. La Universidad Estatal de Michigan es la entidad a cargo de la supervisión del proyecto, que es llevado a cabo en el departamento de Biosistemas e Ingeniería Agrícola.

Para la simulación de tormenta se define el siguiente parámetro 50mm/hr, 60mm/hr y 70mm/hr, consecutivos con períodos de 30 minutos cada uno. Se estudia el factor tratamiento de sacos de geotextil con dos mezclas de relleno: Arena+Compost (8 por 2 partes volumétricas, respectivamente) y Arena+Cemento (10 por 2 partes volumétricas, respectivamente). Se analizan los factores pendiente (15% y 30% de inclinación) y grado de compactación (0 y 2 Mpa de resistencia a la penetración).

Los resultados indican que ambos tratamientos de sacos reducen significativamente ( $p = 0,0009$ ) la concentración de sedimentos respecto a la condición control (sin uso de sacos). Las pruebas desarrolladas en pendiente de 30% presentan una tasa de sedimentos significativamente superior. Además, los sacos de geotextil, ambos rellenos, no presentan un cambio significativo ( $p = 0,0543$ ) sobre la variable volumen de escorrentía, respecto al control. Se obtuvo que la condición de compactación a 2 Mpa de resistencia a la penetración incrementa significativamente el volumen de escorrentía recolectado.

Cómo parte de los objetivos se calcula el factor P de práctica de control de la erosión de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, los resultados muestran un rango de P entre 0,1 y 0,9 para las distintas condiciones evaluadas. Este proyecto promueve la experimentación en el área de prácticas de control de erosión para asistir como parámetro en la toma de decisiones en cuanto a diseño de obras de conservación de suelo.

**PALABRAS CLAVE:** Control de Erosión, Simulación, Sacos Geotextil.

## Índice General

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.1.1. Contexto nacional: Conservación de suelos.....	1
1.2. Justificación .....	4
1.3. Objetivos .....	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
Capítulo 2. Marco Teórico.....	7
2.1. Erosión de suelo .....	7
2.1.1. Factores erosivos.....	8
2.1.2. Modelación de la erosión de suelo (USLE) .....	10
2.1.3. Factor de práctica de control de erosión (P).....	12
2.1.4. Medición de la erosión de suelo .....	15
2.1.5. Erosión de suelos: Costa Rica .....	20
2.2. Compactación de suelos.....	21
2.2.1. Humedad del suelo y compactación .....	22
2.2.2. Efectos de la degradación del suelo por compactación.....	23
2.2.3. Compactación y erosión.....	24
Capítulo 3. Métodos y Materiales.....	25
3.1. Ubicación.....	25
3.2. Parcela de erosión.....	25
3.2.1. Factores por evaluar en la experimentación.....	25
3.2.2. Zona destinada a la experimentación .....	26
3.2.3. Materiales .....	26
3.2.4. Presupuesto.....	26
3.3. Simulador de lluvia.....	26
3.3.1. Patrón de simulación.....	27
3.4. Equipo de medición.....	28
3.4.1. <i>Tipping Bucket</i> .....	28
3.4.2. Sensores de contenido de humedad.....	28
3.4.3. Martillo compactador.....	29
3.4.4. Penetrómetro.....	30
3.5. Materiales .....	30

3.5.1.	Tipo de suelo .....	30
3.5.2.	Saco geotextil .....	30
3.6.	Diseño experimental .....	30
3.6.1.	Materiales de relleno .....	32
3.6.2.	Pendiente .....	32
3.6.3.	Compactación.....	33
3.6.4.	Disposición de los sacos de geotextil .....	34
3.7.	Análisis de laboratorio.....	36
3.7.1.	Sólidos totales .....	36
3.8.	Análisis estadístico .....	37
3.9.	Cálculo de factor P de RUSLE .....	38
Capítulo 4.	Resultados.....	40
4.1.	Parcela de erosión.....	40
4.2.	Simulador de lluvia.....	44
4.3.	Escorrentía y carga de sedimentos .....	45
4.3.1.	Análisis estadístico: Variable escorrentía.....	47
4.3.2.	Análisis estadístico: Variable sedimentos .....	50
4.4.	Factor P. práctica de conservación (RUSLE) .....	53
Capítulo 5.	Discusión de resultados .....	55
5.1.	Parcela de erosión.....	55
5.2.	Simulador de lluvia.....	56
5.3.	Escorrentía y carga de sedimentos .....	58
5.3.1.	Escorrentía .....	58
5.3.2.	Carga de sedimentos.....	60
5.4.	Factor P. práctica de conservación (RUSLE) .....	66
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones.....	70
6.1.	Conclusiones.....	70
6.2.	Recomendaciones .....	71
Capítulo 7.	Bibliografía .....	72
Bibliografía .....		72
Capítulo 8.	Anexos.....	76
8.1.	Simulador de lluvia.....	76
8.2.	Calibración de sensores de humedad .....	79
8.3.	Datos completos de las evaluaciones .....	81



8.4. Ilustraciones de Pruebas .....	114
-------------------------------------	-----

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 2.1-1 Parcelas de erosión a pequeña escala. ....	18
Ilustración 2.1-2 Parcelas de erosión a escala mayor. ....	18
Ilustración 2.1-3 Parcela de erosión con cortina de vientos. ....	19
Ilustración 2.1-4 Parcela de evaluación. ....	19
Ilustración 3.3-1 Simulador de lluvia.....	27
Ilustración 3.4-1 Sensor Decagon Ech <sub>2</sub> O.....	29
Ilustración 3.4-2 Martillo compactador. ....	29
Ilustración 3.6-1 Tratamientos de estudio .....	31
Ilustración 3.6-2 Proceso de compactación .....	34
Ilustración 3.6-3 Conformación de muro de contención .....	34
Ilustración 4.1-1 Unidades de suelo portátil. ....	40
Ilustración 4.1-2 Proceso de Conformación de Parcela .....	42
Ilustración 4.1-3 Pendiente de parcela .....	42
Ilustración 4.1-4 Descripción de componentes de parcela de erosión .....	43
Ilustración 4.1-5 Parcela de erosión finalizada .....	43
Ilustración 4.2-1 Curva de calibración Presión/Intensidad .....	44
Ilustración 4.3-1 Evaluación de tratamientos: Escorrentía .....	49
Ilustración 4.3-2 Evaluación de compactación: Escorrentía .....	49
Ilustración 4.3-3 Evaluación de pendiente: Escorrentía .....	50
Ilustración 4.3-4 Evaluación de tratamiento: Carga de sedimentos .....	52
Ilustración 4.3-5 Evaluación de pendiente: Carga de sedimentos .....	52
Ilustración 4.3-6 Evaluación de compactación: Carga de sedimentos .....	53
Ilustración 5.2-1 Tasa de simulación y lluvia acumulada para los 90 minutos de prueba. ....	57
Ilustración 5.3-1 Gráficas sólidos totales: Evaluaciones de tratamiento en suelo suelto.....	64
Ilustración 5.3-2 Gráficas sólidos totales: Evaluaciones de tratamiento en suelo compacto.....	65
Ilustración 5.3-3 Gráficas sólidos totales: Evaluaciones control en suelo suelto .....	65
Ilustración 5.3-4 Gráficas sólidos totales: Evaluaciones control en suelo compacto .....	66
Ilustración 5.4-1 Factor P calculado por tratamiento evaluado.....	67
Ilustración 8.1-1 Comportamiento de simulador de lluvia 1.....	77
Ilustración 8.1-2 Comportamiento de simulador de lluvia 2 .....	78
Ilustración 8.2-1 Curva de calibración sensores. Suelo franco arenoso.....	81
Ilustración 8.4-1 Prueba: Tratamiento Compost+Arena, 15%, Suelo Suelto .....	114
Ilustración 8.4-2 Prueba: Tratamiento Cemento+Arena, 15%, Suelo Suelto .....	114
Ilustración 8.4-3 Prueba: Control, 30%, Suelo Suelto .....	115
Ilustración 8.4-4 Prueba: Control, 15%, Suelo Suelto .....	115
Ilustración 8.4-5 Prueba: Tratamiento Compost+Arena, 30%, Suelo Compacto .....	116
Ilustración 8.4-6 Prueba: Tratamiento Compost+Arena, 15%, Suelo Compacto .....	116
Ilustración 8.4-7 Prueba: Tratamiento Cemento+Arena, 15%, Suelo Compacto.....	117
Ilustración 8.4-8 Prueba: Control, 15%, Suelo Compacto .....	117

## Índice de Tablas

Tabla 2.1-1 Factor P para distintos tipos de uso de suelos .....	13
Tabla 2.1-2 Factor P para distintos tipos de manejo de suelo .....	13
Tabla 2.1-3 Valores del factor P para barretas: Suelo franco-limoso. Lexington, Kentucky. ....	15
Tabla 2.2-1 Rangos de resistencia a la penetración.....	22
Tabla 3.6-1 Proceso de pruebas en parcelas 1 y 2 .....	35
Tabla 3.6-2 Proceso de pruebas en parcela 3 .....	35
Tabla 4.3-1 Resultado de pruebas en parcelas de erosión .....	46
Tabla 4.3-2 Análisis de varianza para escorrentía total .....	48
Tabla 4.3-3 Análisis de varianza para carga de sedimento total.....	51
Tabla 4.4-1 Resultados para factor P .....	54
Tabla 5.4-1 Resultado de factor P en orden descendiente .....	68
Tabla 8.1-1 Evaluación de simulador de lluvia 1 .....	76
Tabla 8.1-2 Evaluación de simulador de lluvia 2 .....	77
Tabla 8.1-3 Análisis de varianza de simuladores de lluvia .....	78
Tabla 8.2-1 Primer paso calibración de sensores.....	79
Tabla 8.2-2 Segundo paso calibración de sensores.....	80
Tabla 8.3-1 Tratamiento Compost + Arena, 30%, 0 Mpa, R1 .....	82
Tabla 8.3-2 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 0 Mpa, R2 .....	83
Tabla 8.3-3 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 0 Mpa, R3 .....	84
Tabla 8.3-4 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 0 Mpa, R1 .....	85
Tabla 8.3-5 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 0 Mpa, R2 .....	86
Tabla 8.3-6 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 0 Mpa, R3 .....	87
Tabla 8.3-7 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 0 Mpa, R1 .....	88
Tabla 8.3-8 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 0 Mpa, R2 .....	89
Tabla 8.3-9 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 0 Mpa, R3 .....	90
Tabla 8.3-10 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 0 Mpa, R1 .....	91
Tabla 8.3-11 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 0 Mpa, R2 .....	92
Tabla 8.3-12 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 0 Mpa, R3 .....	93
Tabla 8.3-13 Datos: Control, 30%, 0 Mpa, R1 .....	94
Tabla 8.3-14 Datos: Control, 30%, 0 Mpa, R2 .....	95
Tabla 8.3-15 Datos: Control, 15%, 0 Mpa, R1 .....	96
Tabla 8.3-16 Datos: Control, 15%, 0 Mpa, R2 .....	97
Tabla 8.3-17 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 2 Mpa, R1 .....	98
Tabla 8.3-18 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 2 Mpa, R2 .....	99
Tabla 8.3-19 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 2 Mpa, R3 .....	100
Tabla 8.3-20 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 2 Mpa, R1 .....	101
Tabla 8.3-21 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 2 Mpa, R2 .....	102
Tabla 8.3-22 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 2 Mpa, R3 .....	103
Tabla 8.3-23 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 2 Mpa, R1 .....	104
Tabla 8.3-24 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 2 Mpa, R2 .....	105
Tabla 8.3-25 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 2 Mpa, R3 .....	106
Tabla 8.3-26 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 2 Mpa, R1 .....	107
Tabla 8.3-27 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 2 Mpa, R2 .....	108

Tabla 8.3-28 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 2 Mpa, R3 .....	109
Tabla 8.3-29 Datos: Control, 30%, 2 Mpa, R1 .....	110
Tabla 8.3-30 Datos: Control, 30%, 2 Mpa, R2 .....	111
Tabla 8.3-31 Datos: Control, 15%, 2 Mpa, R1 .....	112
Tabla 8.3-32 Datos: Control, 15%, 2 Mpa, R2 .....	113

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1-1 Erosión y pendiente .....	9
Ecuación 2.1-2 RUSLE .....	11
Ecuación 3.7-1 Sólidos Totales .....	36
Ecuación 3.8-1 Modelo estadístico .....	37
Ecuación 3.9-1 Factores constantes .....	38
Ecuación 3.9-2 Factor P prueba control .....	38
Ecuación 3.9-3 Factor P tratamiento .....	39
Ecuación 8.2-1 Calibración sensores .....	80

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1. Antecedentes

### 1.1.1. Contexto nacional: Conservación de suelos

Costa Rica es un país que presenta condiciones altamente sensibles a la degradación de sus suelos a causa de la erosión. Aproximadamente un 70% de la extensión del territorio nacional está en condición de ladera, dentro de los cuales algunos casos presentan un relieve muy escarpado (Quirós, 2002). El factor precipitación es otro aspecto que expone predeterminación de Costa Rica hacia la erosión hídrica, intensidades de 1400mm y hasta 7700mm anuales se pueden presentar a lo largo del país (Vahrson W.-G. , 1992).

El amplio rango en la variación del realce topográfico, así como el régimen de lluvias caracterizado por variación de condiciones tanto temporal como espacial, precisan de control y estudio constante de las condiciones ambientales para optimizar las actividades de forma tal que el impacto ambiental se reduzca.

Uno de los intentos por controlar la actividad humana se desarrolla en 1998 por parte de la Asamblea Legislativa de la Republica de Costa Rica. Por medio del decreto de la Ley No 7779 Ley de Uso, Manejo y Conservación de Suelos. Esta ley “tiene como fin fundamental proteger, conservar y mejorar los suelos en gestión integrada y sostenible con los demás recursos naturales, mediante el fomento y la planificación ambiental adecuada”.

A este esfuerzo por conservar el recurso suelo se le suman el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas (MIRENEM) al desarrollar el reglamento de Capacidad de Uso de Las Tierras de Costa Rica, con el fin de promover un desarrollo sostenible durante el progreso de las diversas actividades desarrolladas en nuestro país.

La erosión del suelo es un problema que no solo afecta la degradación de este, sino, que entre otros problemas implica una fuente de contaminantes no localizados que daña diversos sistemas, entre ellos la red hidrográfica (Programa Estado de la Nación, 2007). Una de las

principales víctimas de la erosión son los recursos acuíferos, los sedimentos presentes en los ríos son uno de los principales contaminantes del agua a nivel nacional. El río Reventazón es ejemplo de esta situación, es el segundo río más contaminado del país y se estima una tasa anual de erosión de 26 toneladas por hectárea. Esto implica un problema tanto ambiental como económico; por desembalses de represa hidroeléctrica se gasta en promedio seis millones de dólares anuales. (Programa Estado de la Nación, 2007)

Otro caso contabilizado de acumulación de sedimentos se presenta en la vertiente norte de la cuenca del Río Reventazón (subcuenca del Río Birrís). Este punto representa tan solo un 5% de la cuenca, pero es responsable del 16% del aporte de sedimentos (JASEC, 2004). Dentro de esta subcuenca la agricultura se extiende en 36% de la zona y la ganadería en 35%. El aporte de sedimentos de esta subcuenca es la más alta en la cuenca del Río Reventazón, 50 t/ha/año. (JASEC, 2004).

Otro caso que se puede destacar es en la subcuenca Río Agua Caliente, zona norte de Cartago, donde las elevadas pendientes, la alta precipitación, el tipo de suelo, la deforestación y la actividad agrícola han contribuido para generar tasas anuales de erosión superiores a 100 toneladas por hectárea y elevadas tasas de contaminación de los cuerpos acuíferos (Programa Estado de la Nación, 2007). Estos casos contabilizados son ejemplos y motivos de alarma para la mejora de los sistemas de planeamiento y manejo de los suelos, como se procura con esfuerzos como el de la Ley 7779.

Otros controles empleados para la reducción de la erosión, específicamente para restringir el ingreso de sedimentos en los cuerpos de agua son las técnicas y materiales de barrera o controles periféricos. Estas prácticas aumentan el almacenamiento del agua superficial, gracias a esto son una buena protección del desprendimiento y transporte ocasionado por la salpicadura del agua y la consecuente escorrentía (Morgan, 1997). El producto estudiado en el presente proyecto es empelado con este fin y se busca estudiar su capacidad de funcionamiento.

Para el estudio de la capacidad de elementos y técnicas que permitan controlar la erosión del suelo los experimentos en campo son difíciles de desarrollar por el factor temporal-espacial de la lluvia (Morgan, 1997). Es por esto que la simulación de condiciones es una práctica altamente eficaz y permite el montaje de condiciones variadas y específicas.

Alrededor del mundo se han desarrollado experimentos para clasificar la capacidad que presenta una práctica de manejo de suelos o un material para el control de la erosión. Una

forma de cuantificar el efecto de un elemento para retener sedimentos o proteger el suelo es por medio de la comparación del efecto que presenta el elemento respecto a condiciones equivalentes donde existe la ausencia del elemento o de la práctica de conservación (Renard, Foster, Weesies, McDool, & Yoder, 1997).

Ejemplo de esto es desarrollado por Dabney *et al* (2009), donde se clasifica la práctica de conservación compuesta por setos de hierbas como efectiva en el control de sedimentos al evaluarla en parcelas de erosión con 5% de pendiente; se registra un valor promedio de 0,5 para el factor P (práctica de conservación) de la Ecuación RUSLE.

Con el desarrollo de los materiales para el control de la erosión se han desarrollados estándares que permitan cuantificar su eficiencia. Ejemplo de esto son los estándares internacionales para la evaluación de materiales ASTM (American Society for Testing and Materials).

Un ejemplo de aplicación del estándar ASTM lo aplica Beighley (2008). En simulaciones desarrolladas para parcelas con pendiente de 3:1 se evalúa el material de control de erosión Gator Guard. Aplicando un esquema de diseño de tormenta similar al estándar internacional ASTM 6459-99. Como resultado Beighley (2008) obtiene una reducción total de sedimentos del 41% respecto a simulaciones sin el tratamiento; en general el material promedia un valor de 0,55 para el factor P.

En las evaluaciones o experimentos desarrollados para la prueba de prácticas o materiales de conservación de suelo se incorporan diversos factores para definir las condiciones de desempeño propias de la técnica estudiada. Como se han mencionado ya factores como la pendiente, cobertura, el tipo en sí de práctica de conservación, entre otros. Aspectos como el grado de compactación del suelo puede ser incorporado a los factores de estudio.

Evaluaciones como las desarrolladas por Ekwue et al. (2010) incorporan a su estudio el factor compactación de suelo y lo fusionan a la problemática de la erosión. En este estudio aplican tres tipos de suelo, cuatro grados de pendiente (entre 9% y 30%) y tres grados de compactación del suelo (0,95 Mpa, 1,37 Mpa, 1,79 Mpa). Ekwue et al obtienen como resultado que la cobertura sobre el suelo reduce la erosión en todos los casos. Además encuentra que la compactación del suelo incrementa la escorrentía, disminuye la infiltración y disminuye la pérdida del suelo.

Todos los esfuerzos nacionales e internacionales mencionados anteriormente no concluyen o terminan de solucionar la problemática que existe a nivel mundial de la degradación del suelo a causa de la erosión. Esta norma no es diferente para Costa Rica, por esto el interés de fomentar la importancia de crear conciencia acerca del problema y plantear soluciones propias para las características ambientales de nuestro país.

En este punto es que surge la iniciativa del presente proyecto. Donde se busca promover el desarrollo de investigación en el área de prácticas de conservación del suelo. Experimentando (ya sean en campo o a nivel de laboratorio) dentro de un marco que contemple las condiciones topográficas y de régimen de lluvia propios de Costa Rica. Con el fin de optimizar los diseños de prácticas de conservación de suelos.

## 1.2. Justificación

La topografía y régimen de lluvia de Costa Rica lo hace un ambiente característico a sufrir la degradación de sus suelos a causa de la erosión de los mismos. A pesar de la riqueza de los suelos ticos, las elevadas pendientes y las fuertes precipitaciones son factores que sumados a la actividad agrícola solo pueden resultar en elevadas tasas de erosión. Esto no es un mito ni una alerta excedida es la realidad de nuestro país.

Dadas estas condiciones sería de esperar que los profesionales relacionados a la materia y las mismas instituciones nacionales busquen el luchar por la preservación del recurso suelo. A pesar de los esfuerzos desarrollados en la materia la tasa de erosión de suelo de nuestro país sobrepasa los límites aceptables.

Situemos nuestra atención al factor económico. Esta problemática incrementa el costo de producción agrícola, la pérdida de la capa fértil del suelo obliga a los agricultores a adquirir más productos que sustituyan la falta de nutrientes del suelo. Anualmente los embalses de las represas hidroeléctricas del país deben ser liberados de los sedimentos acumulados, esto implica un enorme gasto para la industria eléctrica.

Hasta este punto apenas hemos destacado la punta del iceberg de la problemática en sí. El presente proyecto busca el incentivar la investigación para análisis de Buenas Prácticas de Manejo de Suelo. En el área de conservación de suelos existen diversas técnicas y materiales dispuestos a la tarea de prevenir la erosión, el valorar la capacidad costo beneficio de estas

prácticas contribuye a la toma de decisiones y a la optimización del diseño de manejo de suelos.

El primer paso es saber valorar si una práctica es la óptima para la condición, este proyecto busca ser un marco de referencia en este aspecto. Empleando un montaje experimental tipo parcela de erosión dentro de un módulo de condiciones simuladas se analiza la capacidad de un elemento de control de la erosión. El producto del proyecto es investigación, aporte metodológico, presentación de diseños y resultados. El fin del proyecto es crear conciencia de la problemática, valorar la importancia de la experimentación y crear un impacto en la solución, es decir, contribuir en la disminución de la tasa de erosión de los suelos de Costa Rica.

Finalmente para lograr este cometido se busca apoyo en la Universidad Estatal de Michigan (MSU por sus siglas en inglés), institución centenaria en el área de la Ingeniería Agrícola. Gracias al actual convenio MSU-UCR este proyecto además de fomentar la investigación promueve el intercambio del conocimiento entre instituciones académicas y naciones.



## **1.3.Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar la eficiencia del sistema de sacos de geotextil como medida para mitigar la carga de sedimentos, empleando parcelas de erosión en condiciones simuladas.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Analizar, diseñar y construir la estructura de parcela de erosión, para establecer las condiciones estructurales que se ajusten a los factores de operación, simulando topografía de ladera típica de Costa Rica.
- Determinar y calibrar el comportamiento del parámetro de operación de los simuladores de lluvia para ajustar su aplicación a condiciones tropicales.
- Establecer el diseño experimental de la evaluación que contemple los factores de estudio, para tasas de simulación de lluvia constantes a períodos establecidos, asimilando condiciones típicas de uso de suelo agrícola afectado por la erosión en Costa Rica.
- Analizar los resultados del comportamiento de los factores a fin de establecer eficiencia de los sacos en reducción de sedimentos y escorrentía respecto a su equivalente control.
- Calcular el factor P (practica de control de la erosión, RUSLE) para los tratamientos, bajo las condiciones evaluadas y respecto a su equivalente control.

# Capítulo 2. Marco Teórico

---

## 2.1. Erosión de suelo

La erosión del suelo es un proceso compuesto por tres fases, la primera es el desprendimiento de las partículas de la masa de suelo, la segunda fase es su transporte a causa de agentes erosivos, finalmente cuando la energía de los agentes erosivos no es suficiente para continuar transportando las partículas del suelo se produce la fase de deposición (Morgan, 1997).

El agua y el viento son los principales agentes erosivos, de los cuáles las corrientes de agua son las más erosivas. La salpicadura causada por el golpe de la gota de lluvia sobre la superficie del suelo descubierto es el causante más importante del desprendimiento de las partículas; la exposición continua a lluvias intensas debilita significativamente el suelo (Morgan, 1997).

El proceso de la erosión hídrica puede darse de forma natural o acelerado por acciones humanas; así mismo la tasa de erosión puede variar de acuerdo a condiciones del suelo, geografía y ambientales (NRCS, 2001b). Los tipos de erosión hídrica son la erosión laminar, erosión en regueros o surcos, erosión en cárcavas y la erosión por desprendimientos o deslizamientos en masa (Vargas, 2010).

La erosión es un proceso de degradación del suelo, origina la remoción de la capa superficial del suelo, en el proceso se reducen los niveles de materia orgánica y se destruye la estructura del suelo (NRCS, 1996b). Esto ocasiona un impacto sobre la productividad de cultivos, la capacidad de las plantas de recuperarse una vez perdida la capa superficial del suelo es reducido (NRCS, 2001b).

Una estructura de suelo degradada a causa de la erosión puede reducir la tasa de infiltración, además la erosión puede ocasionar una disminución en el espesor de la zona de las raíces de las plantas, así como limitar la cantidad de agua, aire y nutrientes al alcance de las plantas (NRCS, 2001b).

Los sedimentos transportados también puede originar daños ambientales al asentarse en ríos, lagos y embalses degradando la calidad del agua; estos sedimentos comúnmente presentan alta actividad biológica y elevadas cantidades de materia orgánica lo cual puede desarrollar problemáticas como el proceso de eutrofización (NRCS, 1996b)

La erosión a causa del agua es la forma predominante de degradación del suelo (55,7%), seguido de la erosión a causa del viento (25,8%), degradación por factores químicos (12,3%) y finalmente degradación por daño físico (ejemplo de este tipo es la compactación del suelo) (Oldeman, 1994)

### **2.1.1. Factores erosivos**

Los factores que afectan la erosión son la erosividad de la lluvia y el viento, la erosionabilidad del suelo, la pendiente del terreno y la naturaleza de la cobertura vegetal.

#### **Erosividad**

La lluvia contribuye en la pérdida de suelo de dos maneras, primero por el impacto de la gota de lluvia que desprende las partículas del suelo y segundo por el desprendimiento y arrastre de sedimentos producidos por la escorrentía. La escorrentía contribuye a la erosión del flujo superficial y a la formación de regueros y cárcavas (Morgan, 1997).

Para el control de la formación de escorrentía no es tan importante la capacidad de infiltración, sino la capacidad que tiene el suelo para retener agua, esta capacidad de retención se desarrolla por la porosidad del suelo (Morgan, 1997). Las fuerzas de tensión superficial y succión son las que le permiten al agua retenerse en los espacios porosos del suelo. Cuando la presión en los poros es menor que la presión atmosférica el agua es capaz de retenerse, pero cuando se incrementa el contenido de humedad del suelo y se alcanza la capacidad límite todos los espacios porosos se llenan de agua. En este punto la presión del agua en los poros es igual a la presión atmosférica lo que ocasiona que la tensión del agua disminuye a cero y la superficie se va a encharque. Una vez que todas las depresiones de la superficie del suelo se llenen se inicia la escorrentía (Morgan, 1997).

En pendientes moderadas de hasta un 20% los procesos de erosión más comunes son a causa del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo y por el flujo superficial de escorrentía (Misra & Rose, 1995)

### Erosionabilidad

La erosionabilidad es la capacidad del suelo de soportar los procesos de desprendimiento y transporte de las partículas; aquí entran en juego las propiedades del suelo como la textura, la estabilidad de los agregados, resistencia al esfuerzo cortante, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos (Morgan, 1997).

### Pendiente

El salpicar de las gotas de lluvia actúa de manera diferente en un terreno plano respecto a uno con pendiente; Morgan (1997) indica que sobre una superficie plana el salpicar de las gotas se deriva aleatoriamente hacia todas las direcciones, por otro lado en un terreno con inclinación más partículas de suelo salpicarán pendiente abajo, esta proporción se ve incrementada con la inclinación de la pendiente.

Para describir la respuesta de la erosión a la inclinación del terreno se presenta la siguiente ecuación:

#### Ecuación 0-1 Erosión y pendiente

$$E \propto tg^m \theta L^n$$

Donde:

E = Pérdida de suelo por unidad de superficie;

$\theta$  = Ángulo de pendiente (grados);

L = Longitud de pendiente;

m = Exponente para la inclinación de la pendiente; y

n = Exponente para la longitud de la pendiente.

## Cobertura

La cobertura actúa como una capa de protección del suelo donde se cuenta con componentes aéreos y subterráneos. Los aéreos como hojas y tallos reducen la energía de las gotas de lluvia, aminorando su efecto sobre el suelo, por otro lado los componentes subterráneos como las raíces contribuyen con la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1997).

Wischmeier et al (1978) indicaron que, de acuerdo a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, se puede alcanzar una erosión relativa de 0,1 si se aplica en un terreno *mulch* con una cobertura de 80% de la superficie, mientras que una erosión relativa de 0,5 se logra si la cobertura del *mulch* abarca un 30% del terreno en comparación con un suelo descubierto.

La cobertura puede tener impacto sobre la dinámica de la erosión del suelo de diversas maneras. En el caso de la lluvia el aspecto más importante de la cobertura es la altura, ya que una gota de lluvia puede alcanzar cerca del 90% de su velocidad terminal desde una elevación de 7 metros. Al caer las gotas sobre las hojas de los árboles se pueden acumular y aumentar su diámetro, por lo que a la hora del impacto sobre el suelo se puede ver incrementando su capacidad erosiva (Morgan, 1997).

En otro aspecto, la cubierta vegetal puede disipar la energía de la esorrentía, el flujo de agua en movimiento puede ser aminorado por la cobertura vegetal ya que se incrementa la rugosidad sobre el terreno (Morgan, 1997). Por otro lado, la cobertura vegetal favorece la infiltración del agua al estructurar el suelo (Morgan, 1997).

### 2.1.2. Modelación de la erosión de suelo (USLE)

Los modelos de predicción de la erosión de los suelos son un método para simplificar la realidad. Inicialmente son desarrollados en los Estados Unidos, más adelante y a lo largo de los años surgen diversas ecuaciones por distintos investigadores donde se busca mejorar la capacidad de respuesta de los modelos por medio de nuevas variables y factores (Teh, 2011).

Smith y Wihttt en 1947 presentaron una de las primeras ecuaciones racionales para el cálculo de la pérdida de suelo. Más adelante el modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) fue adoptado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos en 1958 para convertirse en el modelo más ampliamente aceptado y empleado para la determinación de la erosión de suelo. La ecuación presenta seis factores y puede ser

empleada para la estimación de erosión laminar y de surcos (Renard, Foster, Weesies, McDool, & Yoder, 1997).

La ecuación de USLE supera muchas de las deficiencias encontradas en modelos anteriores, entre los principales progresos se tuvo: una mejor aplicación del efecto de los factores para resultados con mayor fidelidad, un índice de erosión que ofrece una mejor estimación del potencial erosivo de la lluvia y la correspondiente escorrentía, el factor de erosionabilidad del suelo evaluado de diversas investigaciones, un método que incluye interacción del patrón cultivo-manejo y finalmente un método para incorporar el efecto de patrones de lluvia para condiciones de cultivo respecto al factor de cobertura y manejo de cultivo específico (Renard, Foster, Weesies, McDool, & Yoder, 1997).

A través de los años se ha continuado la investigación para generar mejoras en el cálculo de la erosión del suelo, de aquí surge la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés), desarrollada en 1997 por K.G. Renard et al. Esta nueva ecuación preserva la base de la USLE, pero se generan mejoras en los factores gracias al progreso en las bases de datos. La RUSLE contempla de una forma más óptima la relación entre desprendimiento y deposición de las partículas del suelo respecto al flujo de que las conduce (Renard, Foster, Weesies, McDool, & Yoder, 1997). El progreso de modelos para el cálculo de la erosión continúa en desarrollo con el fin de contribuir como herramienta guía en la toma de decisiones para planes de conservación (Renard, Foster, Weesies, McDool, & Yoder, 1997).

Ambas ecuaciones USLE y RUSLE ofrecen el dato de erosión media anual esperada en un campo con pendiente por medio de la siguiente ecuación (Renard, Foster, Weesies, McDool, & Yoder, 1997):

#### Ecuación 0-2 RUSLE

$$A = R K L S C P$$

Donde:

A = Cálculo de la pérdida espacial y temporal media de suelo por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para K y para el período seleccionado para R (usualmente empleado ton/ha\*año)

R = Factor de Erosividad de pluvial/escorrentía: el índice de erosividad de la lluvia más el factor por cualquier escorrentía significativa a causa del derretimiento de la nieve.

K = Factor de Erosionabilidad del suelo: la tasa de pérdida de suelo por el índice unitario de erosión para un suelo específico medido en una parcela de erosión estándar, definida por 22,1m de largo en una pendiente uniforme de 9% continuamente labrada.

L = Factor de Longitud de pendiente: la proporción de pérdida de suelo del terreno respecto a la pérdida de suelo de una parcela de erosión con longitud de pendiente de 22,1m bajo condiciones idénticas.

S = Factor de Pendiente: la proporción de pérdida de suelo del campo con gradiente de pendiente respecto a la pérdida de suelo de un campo con 9% de pendiente bajo condiciones idénticas.

C = Factor de manejo-cobertura del cultivo: la proporción de pérdida de suelo de un área con cobertura y manejo específicos respecto a la pérdida de suelo de un área idéntica bajo laboreo continuo.

P = Factor de prácticas de control de la erosión: la proporción de pérdida de suelo con alguna práctica de control de erosión respecto a la pérdida de suelo bajo condiciones de manejo de cultivo en línea recta hacia arriba y debajo de la pendiente.

### **2.1.3. Factor de práctica de control de erosión (P)**

El factor de práctica de conservación (P) es comúnmente confundido con el factor de cobertura (C). En general el factor P es definido como el impacto positivo que se genera en un terreno gracias al manejo de control de escorrentía en términos del cambio en la dirección, velocidad y cantidad de su flujo (Renard, Yoder, Lightle, & Dabney, 2011).

El factor P permite evidenciar la capacidad de funcionamiento de un sistema de control de erosión respecto a las condiciones equivalentes donde no se emplea ningún tipo de manejo de conservación o elemento de control de erosión (Renard, Foster, Weesies, McDool, & Yoder, 1997). Ver metodología 3.9 para descripción del cálculo del factor P.

El factor P se determina de acuerdo al uso de suelo y al manejo del suelo, ejemplo de valores para el factor P por uso de suelo y manejo se presentan en las tablas 2.1-1 y 2.1-2. Entre menor es el valor del factor P mayor es su eficacia en el control de la erosión, el cálculo del factor P se genera del producto de sub-factores P tomando en cuenta cada práctica de

conservación empleada; la práctica de labranza en pendiente hacia arriba y abajo tiene un valor de 1 (Vargas, 2010).

**Tabla 0-1 Factor P para distintos tipos de uso de suelos**

Fuente: (Troeh, Hobbs, & Donahue, 1999)

<b>Uso de Suelo</b>	<b>Factor P</b>
Estaciones Agrícolas	0,4
Cultivo de Coco	0,5
Diversificación de cultivos	0,45
Peces y Estanques	0,5
Bosque	0,1
Horticultura Mixta	0,4
Terreno recientemente limpiado	0,7
Huertos	0,4
Áreas de minería	1
Cultivo de Arroz	0,5
Área Recuperada	0,7
Área Recreativa	0,6
Cultivo de Caucho	0,4
Pantanos	0,5
Tierras Ociosas	0,45
Áreas Urbanas	1
Agua	0,5
dipterocarpáceas	0,1
Bosques de Tierras Bajas	0,1
Suelo Descubierta	0,7

**Tabla 0-2 Factor P para distintos tipos de manejo de suelo**

Fuente: Departamento de Agricultura (DOA; 2010)

<b>Estructura/ Práctica de Conservación</b>	<b>Factor P</b>
Camas de siembra en Contra / Perpendicular al Contorno	0,85
Camas de Siembra a lo Largo del Contorno	0,3
Franjas de Zacate	0,5
Zanjas de Contorno	0,5
Planificación en Contorno	0,8
Mulch	0,2
Terrazas (continua)	0,2
Terrazas (discontinua)	0,4
Terrazas Tradicionales	0,6
Setos de Vertiver en Contorno	0,6



Las prácticas más comúnmente empleadas para el cálculo del factor P son la siembra en contorno, terrazas y prácticas de conservación en terrenos forestales (Vargas, 2010). Además de estas prácticas comúnmente empleadas se aplican prácticas de manejo de suelos orientadas al control o recolección de sedimentos y en la reducción de la escorrentía, entre más cerca de la zona de la pendiente se disponga la práctica más eficaz es su trabajo (Renard, Foster, Weesies, McDool, & Yoder, 1997).

Dentro de las prácticas de manejo y conservación de suelos se cuenta con los elementos de control de erosión de tipo barrera. Este tipo de elementos son eficientes para estimar el impacto de la carga de sedimentos fuera de los límites de control, pero es inadecuado para estimar la degradación del suelo dentro de la zona de control (Dabney, McGregor, Wilson, & Cullum, 2009). No evita que se erosione el suelo solo contiene los sedimentos para que no continúen desplazándose a zonas de menor elevación. (Dabney, McGregor, Wilson, & Cullum, 2009)

#### Factor P: Barreras y estructuras para el control de sedimentos

En el control de la erosión se pueden ver dos objetivos o fines principales al desarrollar esta práctica. El primero es el control en sitio, que busca la protección del suelo para que la productividad del terreno se conserve a largo plazo (Toy & Foster, 1998). La segunda perspectiva es el control de la erosión para la protección de los recursos fuera del perímetro; dentro de esta perspectiva se pueden nombrar prácticas como: barreras vivas, barreras de paja, filtros de grava, terrazas de banco, diques de piedra y sacos de arena (Toy & Foster, 1998).

El efecto de los elementos de tipo barrera es descrito por Dabney et al (2009) por medio de cinco principales razones por las cuales los estos elementos reducen la carga de sedimentos:

1. El retardo hidráulico causado por la barrera sobre el flujo de los sedimentos erosionados, se incrementa la deposición de sedimentos en la zona de empozamiento antes de la barrera y dentro de la misma barrera.
2. Reduce la escorrentía debido al incremento de infiltración dentro de la barrera y en la zona de empozamiento colina arriba de la barrera.
3. Por causa del efecto de difusión y retardo de la escorrentía, la carga de sedimentos disminuye antes, dentro y debajo de la barrera.

4. Las barreras crean pequeñas terrazas de gradientes, cuando la pendiente es larga la acortan y disminuyen la fuerza de la escorrentía pendiente abajo, además si se ajustan adecuadamente se dirige la escorrentía a una salida controlada.
5. A largo plazo las barreras pueden disminuir el grado de inclinación creando pequeñas terrazas de banco.

Los sacos de arena son de esperar que provean de una protección en la retención de sedimentos similar a la que se obtiene por el Silt Fence, sin embargo su grado de efectividad depende de su correcta instalación y mantenimiento apropiado (Toy & Foster, 1998). En la siguiente tabla se presentan ejemplos de resultados del Factor P para diversas prácticas.

**Tabla 0-3 Valores del factor P para barretas: Suelo franco-limoso. Lexington, Kentucky.**

Fuente: (Toy & Foster, 1998)

Pendiente %	Tipo de Estructura			
	Franjas de Zacate corto	Sacos de Grava	Setos vivos	Silt Fence
< 5	0,37	0,21	0,11	0,08
5 - 10	0,55	0,37	0,21	0,15
10 - 15	0,67	0,55	0,45	0,37

#### 2.1.4. Medición de la erosión de suelo

La erosión del suelo puede ser medida o calculada en condiciones de campo o condiciones controladas en laboratorio. Para desarrollar esta práctica experimental de la cuantificación de la erosión en condiciones controladas la simulación de parámetro es una herramienta de gran ayuda. La simulación permite controlar las variables temporales y espaciales (Morgan, 1997).

Para el control de los factores que afectan a la erosión del suelo el desarrollo de experimentos con variables controladas dentro de parcelas aisladas es un método práctico en la investigación, ya que se permite estudiar más fácilmente la influencia de cada factor (Morgan, 1997).

Los tamaños y tipos de parcelas de erosión son variados, pero se tienen parámetros regularmente seguidos en su confección: la parcela debe estar limitada o aislada, se debe tener conocimiento de sus dimensiones y pendiente, en la base se debe situar un canal o sistema colector de escorrentía bloqueado de la lluvia y finalmente se debe disponer un sistema de muestreo de escorrentía y de cálculo volumétrico del flujo (Morgan, 1997).

Actualmente existen diversas estrategias aplicables para el control de la erosión; se pueden desarrollar métodos mecánicos, medidas de manejo de cultivo y existen también materiales naturales y sintéticos usados en el control de la erosión (Toy & Foster, 1998). Ejemplo de los métodos tradicionales y/o naturales es la aplicación de coberturas o mulches. También existen los productos manufacturados como los productos a base de geosintéticos, típicamente empleados por un lapso de vida útil definido. Los geosintéticos se encuentran en diversas formas (Toy & Foster, 1998).

Existen diversos métodos para probar la capacidad de los productos desarrollados para el control de la erosión, investigaciones han demostrado que las pruebas en campo ofrecen los mejores resultados, pero las condiciones naturales no siempre se prestan para desarrollar pruebas óptimamente. Para superar estos inconvenientes es que se emplean equipos como las parcelas de erosión y simuladores de lluvia (Toy & Foster, 1998).

Para el desarrollo de pruebas que examine la capacidad del funcionamiento de los productos dispuestos para el control de la erosión existen estándares que pueden ser seguidos; la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) ha desarrollado estándares para la prueba de materiales de control de la erosión (Toy & Foster, 1998). Ejemplo de esto es el estándar ASTM D6459.99 designado para la determinación del rendimiento de productos de control de erosión de cobertura en condiciones de ladera y bajo lluvia simulada (Toy & Foster, 1998).

#### Estudio de diseños previos: Parcelas de erosión

Babcock (2008) para evaluar tratamientos de mulch y poliacrilamida para el control de la erosión, emplea un diseño de caja de madera de 2m de largo, por 1m de ancho y 6cm de espesor. Evalúa los tratamientos en pendientes de 18% y 32%. Dispone un colector de escorrentía por medio de un tubo en la base de la caja cubierto por un plástico para no captar lluvia, únicamente escorrentía; se dispone un barril de 5 galones para almacenar la escorrentía. (Babcock, 2008).

En el área de pruebas de métodos para el control de la erosión existen diversas formas y diseños de parcelas. TRI Environmental Inc., es una empresa dedicada a la prueba e investigación de geosintéticos en distintas escalas. Entre los diseño de parcela que han aplicado se cuentan los diseño pequeños, a escala de laboratorio, en sistemas cuidadosamente controlados de acuerdo a los estándares de evaluación ASTM. Ejemplo de esto se puede visualizar en la Ilustración 2.1-1, donde se presentan equipos de parcelas empleados para la evaluación de la reducción de erosión y escorrentía en pendiente de acuerdo al estándar ASTM D7101. (TRI Environmental, Inc., 2007)

En contra parte, TRI Enviromental, también desarrolla pruebas de investigación a escalas mayores. Ejemplo de estos diseños se presentan en las ilustraciones 2.1-2 y 2.1-3. Como se puede ver estos diseños incorporan factores estructurales mayores.



Ilustración 0-1 Parcelas de erosión a pequeña escala.

Fuente: TRI Environmental Inc.



Ilustración 0-2 Parcelas de erosión a escala mayor.

Fuente: TRI Environmental, Inc.



**Ilustración 0-3 Parcela de erosión con cortina de vientos.**

**Fuente: TRI Environmental, Inc.**

Otro diseño comúnmente empleado son las parcelas de erosión en campo, Morgan (1997) describe el diseño de parcela tipo, una parcela delimitada por chapas metálicas o de madera de 15cm ó 20cm de alto, con 22m de largo y 1,8m de ancho, en la base se sitúan canales cubiertos y tanques para coleccionar la escorrentía. Dabney et al (2009) emplea un diseño similar de 22,1m de largo y 4m de ancho sobre una pendiente de 5%. Antes de los tanques colectores de escorrentía Dabney et al (2009) emplea un sistema de recolección de muestras llamado la Rueda Coshocton.

Otro diseño analizado es el que se presenta en la ilustración 2.1-4, que contempla una parcela de erosión de 8 m de largo por 2 m de ancho con una pendiente de inclinación de 3:1, este sistema cuenta con un canal que dirige y recolecta a una salida (Beighley, 2008).



**Ilustración 0-4 Parcela de evaluación.**

**Fuente: Laboratorio de Investigación de la Universidad Estatal de San Diego.**

Otros acercamientos para el diseño de parcelas de erosión se ajustan a la distribución efectiva del simulador de lluvia por empleado, como es el caso de Faucette et al (2009), donde se ajusta un tamaño de 4,8 m de largo por 1 m de ancho, bordeado por placas de metal de 15 cm de alto, además placas removibles de 90 cm por 60 cm se entierran en el borde de la parcela, a los lados de la base para controlar el empozamiento del agua.

Morgan (1997) describe que el principal problema del diseño de parcelas a escala de laboratorio es eliminar el efecto del borde que facilita el paso del agua en esta zona, para esto se propone no recolectar la escorrentía proveniente de la totalidad de la anchura, sino en una zona central.

### **2.1.5. Erosión de suelos: Costa Rica**

La erosión del suelo impacta directamente el ambiente y la economía a nivel mundial, la productividad de terrenos se ha visto afectada hasta en un 50% a causa de la erosión de suelo y el proceso de desertificación (Eswaran, Lal, & Reich, 2001). Ejemplo de esto se ve reflejado en la reducción de la producción agrícola histórica en el continente de África, donde se han reportado rangos entre 2% a 40%, con una media de 8,2% (Eswaran, Lal, & Reich, 2001). En el sur del continente Asiático se estima una pérdida anual en productividad de cereal equivalente a US\$5400 millones a causa de la erosión hídrica y US\$1800 millones por la erosión eólica (Eswaran, Lal, & Reich, 2001). El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (2001) estima que el costo de la pérdida anual en la agricultura a causa de la erosión de suelos es de US\$44 billones.

¿Cómo se ve reflejado este impacto mundial de la erosión del suelo en Costa Rica? De acuerdo a estudios de la FAO (1989) Costa Rica, como muchos otros países de Latino América ha sufrido un crecimiento en la agricultura que no se ha extendido concretamente a zonas aptas para el desarrollo de esta actividad, sino también en zonas marginales, con condiciones de pendientes escarpadas y suelos susceptibles a la erosión y a otros mecanismos de degradación.

## 2.2. Compactación de suelos

La compactación del suelo se origina cuando las partículas son sometidas a presión, esto causa una reducción del espacio poroso y un cambio en la estructura del suelo (incrementa el peso por unidad volumétrica); la compactación es mayor cuando el suelo se encuentra húmedo (NRCS, 1996a). Con la adopción de las prácticas de mecanización el problema de compactación de los suelos ha incrementado; la compactación del suelo es uno de las causas de degradación física del mismo (Eswaran, Lal, & Reich, 2001).

La profundidad de la zona de suelo compactada puede variar, se puede presentar en diversos estratos del suelo y espesores; la compactación se puede evidenciar en la superficie de un terreno, dentro de la capa labrada, por debajo de la zona de labranza y hasta en profundidades superiores (Batey, 2009). El tráfico de maquinaria pesada y las labores de mecanización pueden afectar la compactación del suelo, también el golpe de las gotas de lluvia sobre el suelo sin cobertura, la humedad del suelo (los suelos secos presentan mayor resistencia a la compactación), textura y el contenido de materia orgánica (NRCS, 1996a).

El espesor de la capa de suelo compactada varía igualmente, se pueden presentar condiciones de pocos milímetros, o en el caso de usos de suelo agrícolas un rango típico de espesor de capa de suelo compactada varían entre los 20mm y 100mm, este valor incrementa en escenarios con mal manejo del suelo (Hatley, Wiltshire, Basford, Royale, Buckley, & Johnson, 2005).

La compactación del suelo puede ser medida o evaluada por diversos atributos: resistencia a la penetración, densidad aparenta, porosidad y la capacidad de infiltración (Baver & Gardner, 1972). La resistencia a la penetración es la capacidad de un suelo confinado a resistir ser penetrado por un objeto; esta resistencia está directamente ligada con el contenido de humedad del suelo (Soil Survey Division Staff, 1993). En la Tabla 2.2-1 se presenta una descripción de los rangos de resistencia a la penetración del suelo en Mega Pascales.



Tabla 0-4 Rangos de resistencia a la penetración.

Fuente: USDA

Resistencia a la Penetración: Clases	
Clases	Resistencia a la Penetración (MPa)
<b>Baja</b>	< 0,1
Extremadamente Baja	<0,01
Muy Baja	0,01 - 0,1
<b>Intermedia</b>	0,1 - 2
Intermedia Baja	0,1 - 1
Moderada	1 - 2
<b>Alta</b>	> 2
Elevada	2 - 4
Muy elevada	4 - 8
Extremadamente Alta	> 8

### 2.2.1. Humedad del suelo y compactación

Cuando se habla de compactación el agua presenta un papel muy importante en el proceso ya que trabaja como un lubricante entre las partículas del suelo permitiendo su cohesión (Multiquip Inc, 1998). La compactabilidad del suelo incrementa fuertemente con el contenido de humedad que presenta y, así mismo, la compactación está limitada al someter al suelo a una gran cantidad de agua (Koolen & Kuipers, 1983). El agua puede transformar el suelo a un estado plástico y hasta un punto líquido, en este estado la resistencia a la carga es mínima (Multiquip Inc, 1998).

Otro aspecto de la intervención del agua en el proceso de compactación del suelo se presenta cuando la lluvia o irrigación trabajan como una fuerza externa; la energía de las gotas desintegra los agregados del suelo provocando una compactación superficial en los primeros centímetros de la capa de suelo, esto desarrolla la formación de una costra y un sello superficial en el suelo (Magdoff, 2000).

### 2.2.2. Efectos de la degradación del suelo por compactación

El proceso de compactación del suelo causa un cambio en la estructura del mismo, esto va a ocasionar su degradación (Eswaran, Lal, & Reich, 2001). Al incrementar la densidad aparente del suelo también aumenta la resistencia mecánica, este efecto se evidencia de forma más marcada en la capa superficial del suelo (Adekalu, Okunade, & Osunbitan, 2006). En un suelo compactado se puede apreciar un efecto de reducción en la conductividad hidráulica (Eswaran, Lal, & Reich, 2001). De igual forma, la capacidad de infiltración del suelo se ve afectada, al reducir el espacio poroso del suelo se dificulta la penetración del agua (Mijares, 1999).

La compactación reduce la capacidad del suelo de almacenar agua y limita la tasa de movimiento del agua dentro del suelo (NRCS, 2001a). La compactación tiende a incrementar la escorrentía superficial. (Adekalu, Okunade, & Osunbitan, 2006).

La compactación del suelo afecta el crecimiento de los cultivos; un incremento significativo en la densidad del suelo limita el crecimiento de las plantas ya que el desarrollo de las raíces se verá físicamente restringido (NRCS, 2001a). Un grado severo de compactación puede llegar a limitar las raíces de la planta a una zona superficial, limitando el acceso a fuentes de agua y nutrientes almacenados a mayores profundidades (NRCS, 2001a).

Del estudio de diversas fuentes el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1993) indica que para suelos con resistencia a la penetración en un rango de 1 a 2 Mpa se puede ver una restricción del crecimiento radicular aproximadamente lineal. De igual forma el USDA (1993) generaliza que para diversos cultivos anuales en condiciones de suelos húmedos el límite para una severa restricción del crecimiento radicular es 2 Mpa; se pueden presentar reformas para suelos y plantas específicas.

### 2.2.3. Compactación y erosión

La infiltración de agua en el suelo genera el control más importante sobre el proceso de la escorrentía superficial, la velocidad de la infiltración puede variar debido a factores de estructura, compactación, contenido de humedad inicial, perfil del suelo y vegetación (Morgan, 1997).

La compactación del suelo es un serio problema y una preocupación ambiental, se ocasiona tanto a nivel superficial como sub-superficial y puede provocar escorrentía o erosión en el suelo (Lundekvam & Skoien, 1998). En zonas donde las pendientes son escarpadas la afectación causada por erosión debido a suelos compactados no solo se evidencia en la propia zona, sino también en las áreas adyacentes o perimetrales (Batey, 2009).

Durante la compactación los agregados presentes en la estructura de un suelo serán destruidos, esto ocasiona que el suelo tienda a tornarse más homogéneo (Koolen & Kuipers, 1983). Esta homogeneidad puede verse reflejada en una reducción de la rugosidad en la superficial del terreno. En este punto la lluvia es un factor determinante en el grado de erosión que puede alcanzar un terreno con condiciones de suelo compactado. Hasta una lluvia ligera puede llegar a afectar un suelo con problemas de compactación, en especial al verse reducida la infiltración, en suelos con poca rugosidad superficial y limitada capacidad de almacenamiento de agua (Lundekvam & Skoien, 1998).

La lluvia o irrigación puede, como tal, llegar a contribuir a la compactación del suelo; el golpe de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo puede formar una costra superficial y un sello reduciendo la infiltración y promoviendo la erosión y escorrentía del terreno. (Magdoff, 2000)

En su estudio Misra et al (1995) se enfocan en la capacidad o resistencia del suelo a cargas e indica que la resistencia del suelo puede ser empleado como parámetro para definir el estado de compactación y de erosionabilidad. Misra et al (1995) concluye que el grado de compactación del suelo puede ser empleado como parámetro para determinar el peligro de erosión en un terreno, a pesar de esto no recomienda la compactación del suelo como medida de control de la erosión (Misra & Rose, 1995).

# Capítulo 3. Métodos y Materiales

---

## 3.1. Ubicación

El estudio se condujo en la Universidad Estatal de Michigan, Lansing, Michigan, Estados Unidos. Para el departamento de Biosistemas e Ingeniería Agrícola. El período de estudio fue de Agosto-Noviembre 2011.

## 3.2. Parcela de erosión

Para el análisis y diseño de la estructura de parcela de erosión se comenzó por desarrollar una investigación sobre diseños anteriormente empleados para fines equivalentes. Consecuentemente, se establecen las condiciones requeridas en el diseño y construcción:

### 3.2.1. Factores por evaluar en la experimentación

- Los sacos de geotextil, estos sacos en su condición llena presentan dimensiones aproximadas de 35,6cm de ancho por 61,0cm de largo por 15,2cm de alto. Para asemejar un manejo real del producto se define que se evaluarán dos niveles de sacos, por lo que la parcela debe tener un ancho de dos veces el largo de los sacos 1,22m.
- Pendiente de inclinación, el diseño debe presentar la capacidad de variación de pendiente de acuerdo a los rangos de inclinación deseados para asemejar condiciones típicas de suelos con uso agrícola en Costa Rica.
- Grado de compactación del suelo, el diseño de parcela debe permitir un espesor suficiente que permita el análisis de este factor.

### **3.2.2. Zona destinada a la experimentación**

Las condiciones de la zona donde se realiza las evaluaciones será a la intemperie, mas no en campo. Además, se cuenta con una extensión de área máxima de diez metros de largo por tres de ancho.

### **3.2.3. Materiales**

Los materiales deben ser apropiados para el medio en el cual se ubicará la parcela y las condiciones externas, así como las condiciones de simulación a las cuáles será sometida.

### **3.2.4. Presupuesto**

El presupuesto dispuesto para el proyecto es de US\$1000.00.

## **3.3.Simulador de lluvia**

Para simular las condiciones de precipitación se emplean dos simuladores de lluvia. Características de los simuladores:

- Soportados por una estructura de metal el aspersor de ubica a 3,05m de altura sobre el nivel del suelo.
- El sistema se conecta a una manguera común de uso doméstico.
- Cada simulador de lluvia cuenta con un manómetro con rango de 0 a 15 Psi.
- El control de la presión de agua aplicada se maneja por la válvula de la manguera y por una válvula en el simulador.
- Se emplean dos simuladores, ambos son sometidos a un proceso de calibración para ajustar la aplicación deseada a una presión de salida indicada por el manómetro. Se desarrolla una curva de calibración para cada simulador. (Ver Anexo 8.1)
- El área de aplicación de cada simulador es aproximadamente 3m por 3m.
- El aspersor de cada simulador queda suspendido en un punto medio sobre dos parcelas de erosión, aplicando una capa homogénea a cada una.

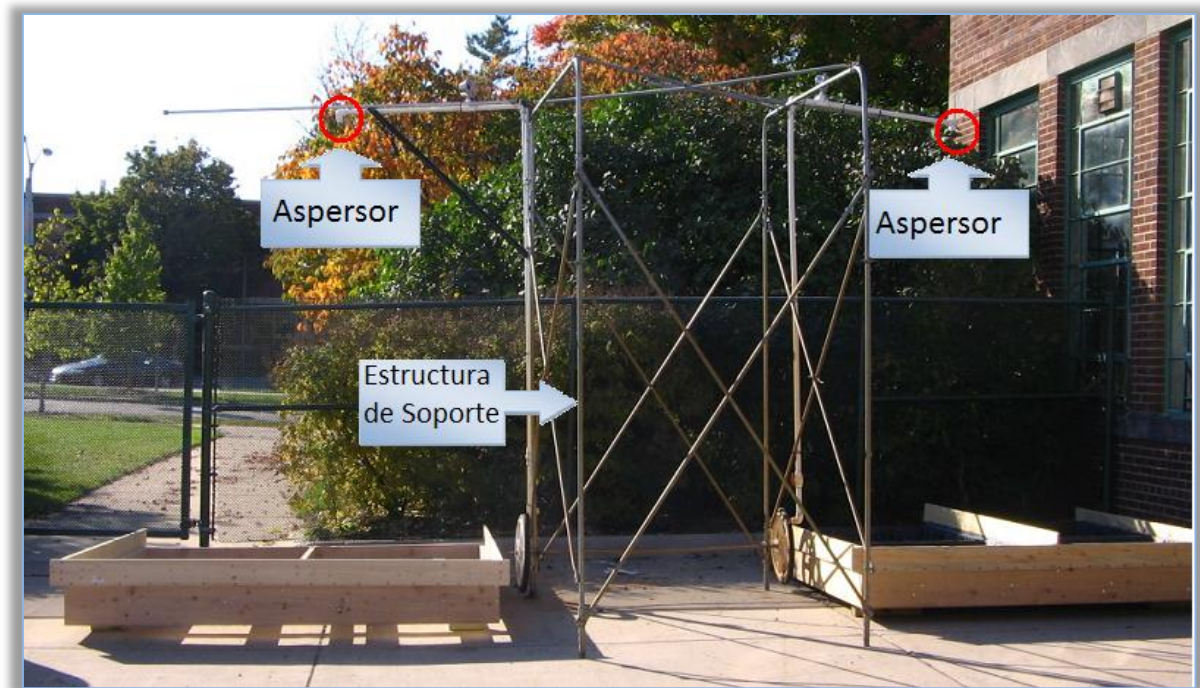


Ilustración 0-5 Simulador de lluvia.

### 3.3.1. Patrón de simulación

Se emplea un patrón de simulación modificado del estándar ASTM D6459 para la determinación de rendimiento de productos de control de erosión en laderas bajo precipitación inducida.

La simulación sigue la siguiente intensidad-duración de tormenta:

- 50mm/hr por un periodo de 30 minutos
- Seguido de 60mm/hr por un periodo de 30 minutos
- Seguido de 70mm/hr por un periodo de 30 minutos

La tormenta de 90 minutos se aplica en cada prueba. Antes de dar inicio a una nueva prueba cada parcela de erosión se deja reposar y drenar el exceso de agua por un período no menor a 15 horas.

Una vez iniciada cada simulación se toman muestras de escorrentía cada 15 minutos. Para un total de 6 muestras de escorrentía por prueba realizada. La muestra se toma a la salida del canal colector de escorrentía de cada parcela. Cada muestra se toma en embases iguales

plásticos, con tapa y debidamente rotulados. Un volumen aproximado de 300mL es recolectado de cada embase.

Finalmente cada embase es almacenado hasta que se vaya a realizar el análisis de sedimentos por medio de las pruebas de laboratorio de sólidos totales. Esta prueba permite cuantificar la concentración de miligramos de sedimento por litro de escorrentía.

### **3.4. Equipo de medición**

#### **3.4.1. *Tipping Bucket***

Un *tipping bucket* es el equipo empleado para la medición de flujo volumétrico. Es comúnmente empleado en sistemas de estaciones meteorológicas o en afluentes para medir caudal. El *tipping Bucket* es una cubeta de acero inoxidable, graduada para contener un litro de líquido en cada uno de sus dos lados; cuando el volumen se alcanza en un lado la cubeta se voltea y se comienza a llenar el lado opuesto.

El conteo de las veces que se voltea lo realiza un equipo de data logger conectado al *tipping bucket*. El data logger se programa para contar la cantidad de veces que la cubeta se voltea en un lapso de 5 minutos. El *tipping bucket* se dispone en la salida del canal colector de escorrentía antes de iniciar cada prueba. Se nivela y asegura antes de cada prueba para garantizar su adecuado funcionamiento.

#### **3.4.2. Sensores de contenido de humedad**

Se emplearon sensores de humedad Decagon ECH<sub>2</sub>O-10 Dielectric Aquameter. Los sensores se conectan al data logger para la colección de las lecturas que proporcionan. Los sensores calculan el contenido volumétrico de agua (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) en el suelo por medio de la constante dieléctrica que presenta.

Como cada tipo de suelo presenta propiedades conductivas distintas se realiza una calibración con el tipo de suelo empleado en el experimento. El método de calibración empleado es el recomendado por el fabricante, el cual sigue el procedimiento general para la calibración de

sensores de capacitancia descrito por Starr y Paultineanu (2002) (Cobos & Chambers, 2010).  
(VER ANEXO 8.2)



Ilustración 0-6 Sensor Decagon Ech<sub>2</sub>O.

Fuente: Decagon Devices, Inc.

### 3.4.3. Martillo compactador

Se construye un martillo compactador de suelo, escala de laboratorio. El diseño que se sigue es de acuerdo a las especificaciones del estándar Proctor ASTM D698 – 07. El martillo de 2,5kg, presenta una caída 30,5cm y un diámetro de base de 5,1cm. El proceso de compactación se divide en tres capas, se compacta una tras otra.

El grado de resistencia a la penetración requerido es de dos Mpa. De acuerdo al tipo de suelo (en este caso franco arenoso) empleado la norma dicta que el suelo debe ser llevado a un 14% de contenido de humedad y se deben aplicar 25 golpes en cada punto. Por medio de pruebas preliminares se determina que se requiere de 50 golpes para alcanzar la compactación deseada.



Ilustración 0-7 Martillo compactador.



#### **3.4.4. Penetrómetro**

Se emplea un penetrómetro para corroborar que la resistencia a la penetración del suelo compactado sea de dos Mpa (aproximadamente 290 psi). El penetrómetro empleado tiene un sensor de acero inoxidable. El rango de medida va a de 0 a 500 psi. El penetrómetro se emplea para corroborar el grado de resistencia a la compactación.

### **3.5. Materiales**

#### **3.5.1. Tipo de suelo**

Una muestra homogenizada del suelo se envía al laboratorio de Nutrientes en Suelos y Plantas de la Universidad Estatal de Michigan. Los resultados indican un suelo tipo Franco Arenoso (%Arena = 77,4, %Limo = 12,9, %Arcilla = 9,7). Todo el suelo empleado se seca naturalmente y se tamiza por  $\frac{1}{4}$  de pulgada.

#### **3.5.2. Saco geotextil**

Los sacos de geotextil empleados se conforman por un polipropileno, compuesto por fibras cortas, no tejidas. El geotextil es resistente a degradación por rayo ultravioleta, además es resistente a ambientes biológicos o químicos que no se encuentran regularmente en suelos. (Agrecol Corporation, 2006)

### **3.6. Diseño experimental**

Se simulan condiciones de terraza dentro de las tres parcelas de erosión de suelo. Dentro de la parcela de erosión se ubica un muro de contención, constituido por dos niveles de sacos de geotextil, en la base, para evaluar su funcionamiento. A los sacos de geotextil se llamarán el factor tratamiento. Para optimizar el proceso de experimentación los sacos de geotextil son etiquetados de acuerdo a su relleno.

De esta forma los sacos son desplazados de una parcela a otra, para así estudiar el comportamiento de cada tratamiento en las parcelas de erosión respecto a los otros factores como lo son el grado de compactación del suelo y la inclinación de pendiente. Todas las evaluaciones realizadas son en parcelas con suelo descubierto y libre de vegetación.

El experimento estudia los siguientes factores:

1. Tratamientos evaluados: Dos tipos de materiales de relleno dentro los sacos de geotextil.
2. Dos niveles de compactación del suelo.
3. Dos grados inclinación de pendiente.
4. Pruebas control, sin tratamiento (sin sacos de geotextil).

Para el desarrollo de las pruebas de “control” todas las condiciones experimentales se conservan, pero se retiran los sacos en la base de la parcela.

En la Ilustración 3.6-1 se presenta las condiciones del estudio para los factores anteriormente señalados.

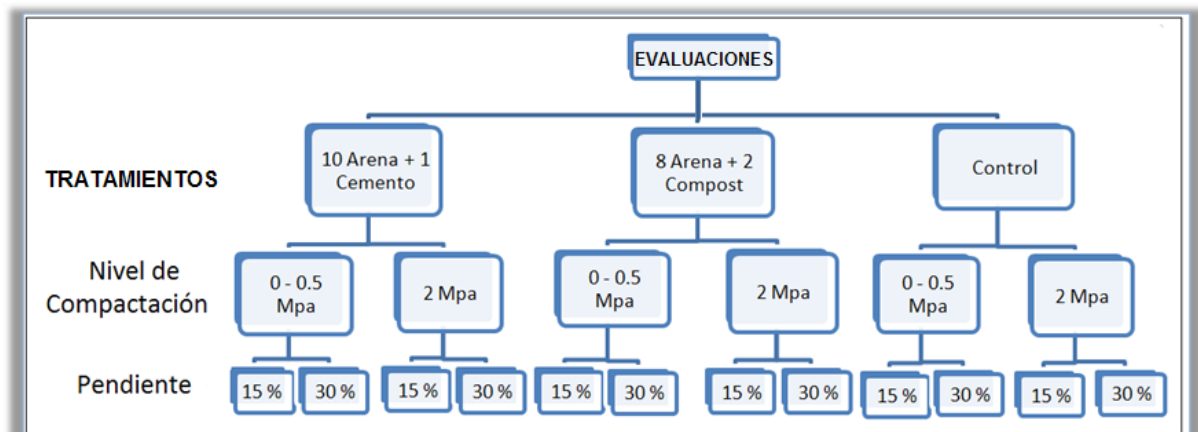


Ilustración 0-8 Tratamientos de estudio

Las variables por medir para este diseño experimental son la escorrentía en términos volumétricos y la carga de sedimentos presentes en la escorrentía.

### 3.6.1. Materiales de relleno

Se evalúa la efectividad de dos materiales de relleno, el primero (A), recomendado por el fabricante y el segundo (B) se propone ya que en referencias de estudios de materiales de contención y retención de sedimentos se han empleado y han probado proporcionar mayor vida útil al material, en este caso los sacos.

- Mezcla A: Ocho partes de arena con dos partes de compost (partes volumétricas). Los sacos son llenados con esta mezcla para un peso nominal de 32 kg. La disminución en el peso, respecto a la mezcla anterior es para compensar la diferencia volumétrica respecto a la mezcla anterior. Mezcla recomendada por fabricante. (Agrecol Corporation, 2007)
- Mezcla B: Diez partes de arena más una parte de cemento (partes volumétricas). Los sacos son llenados con esta mezcla para obtener un peso nominal de 36 kg. Esta mezcla es propuesta por el Departamento de Obras Públicas del Condado de los Ángeles, USA, como un material que aumenta la vida útil de los sacos.

### 3.6.2. Pendiente

Se define la aplicación de dos grados de pendiente a 15% y 30% para evaluar el sistema. Se definen estas dos inclinaciones como parámetro para simular condiciones geográficas de Costa Rica.

El decreto N° 23214-MAG-MIRENEM de la Ley de Conservación de Suelos ofrece el “Parámetro para la evaluación de la capacidad del uso de tierras”, dentro de este parámetro las únicas clases de suelo en las que se permiten algún tipo de desarrollo agrícola, con las limitaciones pertinentes del caso, es de la clase I a la V y estas clases se encuentran en un rango de pendientes de 0% a 30%, de aquí que se seleccionan los dos parámetros anteriormente indicados.

### 3.6.3. Compactación

Para analizar los efectos de la compactación del suelo sobre su degradación y consiguiente erosión se dispone estudiar dos grados de compactación distintos. El primer grado es suelo suelto entre 0Mpa y 0,5Mpa como resistencia a la penetración. El segundo grado de compactación es un grado cercado a los 2Mpa de resistencia a la penetración; para suelos compactados a más de 2Mpa el crecimiento radicular de las plantas decae. (Natural Resources Conservation Service, 1993)

La metodología de compactación es la siguiente:

- Las parcelas de erosión son llenadas con suelo franco arenoso. El suelo ya ha pasado por un proceso de secado natural y ha sido tamizado por una grilla de  $\frac{1}{4}$  de pulgada (0,64 cm) para obtener un tamaño de partícula homogéneo.
- Una vez que la parcela se ha llenado, se disponen en su lugar los sacos de geotextil. Se compacta el suelo bajo los sacos. Finalmente se disponen dos niveles de sacos.
- Ya que se trabaja con dos grados de compactación para el grado de 0 – 0,5 Mpa el proceso culmina en este punto.
- Para el grado de compactación de 2 Mpa se requiere llevar a cabo un proceso distinto. La parcela no se llena de suelo completamente, este proceso se hace en tres capas. Una a una las capas de suelo se llevan a un contenido de humedad de 14% (medido por medio de los sensores de contenido de humedad). Una vez alcanzado, se da inicio al proceso de compactación indicado anteriormente por el estándar Proctor ASTM D698. Se golpea 50 veces con el martillo compactados en cada zona de la parcela.
- El grado de compactación es corroborado por medio de un penetrómetro.



Ilustración 0-9 Proceso de compactación

#### 3.6.4. Disposición de los sacos de geotextil

Los sacos empleados presentan un peso nominal de 33kg. La disposición y peso de los sacos se hace de acuerdo a las recomendaciones del fabricante (Agregol Corporation, 2009). En la Ilustración 3.6-3 se muestra el acomodo final de los sacos de geotextil en la parcela.



Ilustración 0-10 Conformación de muro de contención

El detalle del acomodo de los sacos para cada prueba realizada en las tres parcelas de erosión se presenta en las siguientes dos tablas. Cada prueba es realizada en triplicado bajo las condiciones de estudio en las simulaciones. Para las pruebas de control se desarrollan dos repeticiones.

**Tabla 0-5 Proceso de pruebas en parcelas 1 y 2**

Suelo Resistencia a la Compactación aprox. a Cero.

<b>Evaluación</b>	<b>Tratamiento Parcela 1</b>	<b>Tratamiento Parcela 2</b>	<b>Pendiente</b>
1	A	A	30
2	A	B	30
3	B	B	30
4	B	B	15
5	B	A	15
6	A	A	15
7	Control	Control	15
8	Control	Control	30

Mezcla A = 8 partes de arena + 2 partes de compost (partes volumétricas)

Mezcla B = 10 partes de arena + 1 parte de cemento (partes volumétricas)

Control = Sin Sacos

**Tabla 0-6 Proceso de pruebas en parcela 3**

Suelo Resistencia a la Compactación aprox. a 2 Mpa.

<b>Evaluación</b>	<b>Tratamiento Parcela 3</b>	<b>Pendiente</b>
1	B	30
2	B	30
3	B	30
4	A	30
5	A	30
6	A	30
7	B	15
8	B	15
9	B	15
10	A	15
11	A	15
12	A	15
13	Control	15
14	Control	15
15	Control	30
16	Control	30

Mezcla A = 8 partes de arena + 2 partes de compost (partes volumétricas)

Mezcla B = 10 partes de arena + 1 parte de cemento (partes volumétricas)

Control = Sin Sacos

### 3.7. Análisis de laboratorio

Para determinar la funcionalidad de los bloques o sacos, se evalúan dos aspectos, el primero es el flujo volumétrico de escorrentía y el segundo es los sedimentos presentes en la escorrentía.

Durante los 90 minutos de cada evaluación se cuantifica el volumen de flujo superficial recolectado a la salida del sistema en períodos de 15 minutos. Así mismo cada 15 minutos se toma una muestra de escorrentía la cuál será evaluada para sólidos totales.

#### 3.7.1. Sólidos totales

Se sigue la normativa técnica presente en el Manual de Procedimientos Analíticos para Aguas Efluentes (1996):

1. Cada muestra colectada en las pruebas es llevada al laboratorio.
2. La muestra se homogeniza batiéndola vigorosamente hasta que los sedimentos asentados se mezclen nuevamente.
3. De cada embase de muestreo de escorrentía se toman 3 muestras para realizar los sólidos totales.
4. Se emplean platos metálicos para el secado de las muestras.
5. Cada plato etiquetado debidamente.
6. Se pesa cada plato con una balanza.
7. Con un balón volumétrico se toma cada muestra de 50 ml y se vierte en cada plato de metal.
8. Se disponen los platos en el horno de 103- 105 °C y se seca completamente cada muestra.
9. Se pesa nuevamente cada plato.
10. Finalmente los sólidos totales son obtenidos por la siguiente ecuación:

Ecuación 0-3 Sólidos Totales

$$ST, \text{ mg/L} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V}$$

Donde:

ST = sólidos totales en mg/L;

P1 = peso de plato preparado en mg; y

P2 = Peso de plato más el residuo seco a 103 - 105 °C.

### 3.8. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados se emplea el modelo estadístico de ANOVA con Bloques. Las variables de estudio son los litros de escorrentía recolectados en cada prueba y los gramos de sedimentos.

Se emplea el paquete estadístico InfoStat. Se desarrolla análisis de varianza con el método de comparación Tukey, con una significancia de 0,05. El modelo se presenta a continuación:

#### Ecuación 0-4 Modelo estadístico

$$Y_1 = \alpha + T + \beta_1 + \beta_2 + \varepsilon_{ijk}$$

$$Y_2 = \alpha + T + \beta_1 + \beta_2 + \varepsilon_{ijk}$$

$Y_1$  = Variable respuesta, Escorrentía Total (L)

$Y_2$  = Variable respuesta, Carga total de Sedimentos (g)

$\alpha$  = Efecto de la media general

T = Efecto del tratamiento, mezcla de relleno de sacos y control (a: Mezcla Compost + Arena; b: Mezcla Cemento + Arena; c: Control)

$\beta_1$  = Bloque, efecto de pendiente (a: 15% pendiente; b: 30% pendiente)

$\beta_2$  = Bloque, efecto de compactación (a: 0Mpa Resistencia a la Penetración; b: 2Mpa Resistencia a la Penetración)

$\varepsilon_{ijk}$  = Error experimental o perturbación



### 3.9. Cálculo de factor P de RUSLE

El factor P (práctica de conservación) de la ecuación RUSLE se obtiene como otra variable o parámetro que va a permitir la comparación entre los tratamientos (Sacos de Geotextil con sus respectivos rellenos) evaluados en cada condición de estudio (inclinación y compactación del suelo).

El factor P es una unidad a-dimensional dentro de la ecuación RUSLE. Para el cálculo del factor P la ecuación (RUSLE) ofrece dos estimaciones separadas. La primera estimación se le puede llamar  $P_1$  plan de conservación, donde elementos como, cobertura, técnicas de arado, siembra en contorno y otros son evaluados.

La segunda estimación, a la cuál llamaremos  $P_2$ , indica la retención de la carga de sedimentos. Ambos factores son igual a uno para condiciones de un terreno con pendiente homogénea sin ningún tipo de práctica de conservación o de retención periférica de sedimentos. En el caso del presente estudio  $P_1$  se tomará igual a uno, ya que estamos analizando un sistema de tipo perimetral para retención de sedimentos. Esto descarta a  $P_1$  del análisis. Para el cálculo del factor  $P_2$  se sigue la siguiente metodología:

1. De la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada [ecuación 2.1-2] se toma el valor de A como la pérdida de suelo observada en las pruebas de las parcelas. Los valores de los factores R, K, LS y C se asumen constantes para las condiciones de estudio equivalentes.

Ecuación 0-5 Factores constantes

$$RKLSC = X$$

2. El valor de P para las pruebas control se asume igual a uno.

Ecuación 0-6 Factor P prueba control

$$P_{\text{Control}} = 1, \text{ por tanto: } A_{\text{Control}} = X * P_{\text{Control}} = X$$

3. Despejan respecto a la constante "X" se tiene que el valor de P de cada tratamiento de estudio es igual a la pérdida de suelo observada respecto a el valor la pérdida de suelo observada en las condiciones control (sin sacos de geotextil) de pruebas equivalentes (iguales pendientes y grados de compactación).

$$A_{\text{Tratamiento}} = A_{\text{Control}} * P_{\text{Tratamiento}}, \text{ por lo tanto: } P_{\text{Tratamiento}} = A_{\text{Tratamiento}} / A_{\text{Control}}$$

Por medio de este método se puede estimar el valor del factor P, como práctica de control de erosión en la ecuación de la RUSLE, equivalente a los sacos de geotextil, con los dos rellenos de estudio y para las condiciones bajo las cuales es desarrollado el experimento.

# Capítulo 4. Resultados

---

## 4.1. Parcela de erosión

Del estudio de diversos tipos de diseños de parcelas de erosión, versus el análisis de los factores de las condiciones requeridas y/o las posibilidades y presupuesto al alcance del proyecto se obtiene un diseño final óptimo de parcela de erosión, el cual por medio de las pruebas preliminares es afinado. A continuación se presenta el detalle del diseño.

Se conforman tres parcelas de erosión con dimensiones de 2,5m de largo por 1,3m de ancho. Cada parcela es conformada por dos Unidades de Suelo Portátiles (USP; GreenTech ITM System) como elemento base para las parcelas de erosión y de una serie tablas de madera que conforman el soporte estructural.

Todas estas consideraciones son analizadas para seleccionar la dimensión apropiada de las tablas de madera por emplear para asegurar la integridad de la estructura. El diseño es analizado bajo la supervisión del Ingeniero Mecánico y Coordinador de las Instalaciones de Investigación y Prototipos del departamento de Biosistemas Msc. Phill Hill.

Las unidades son facilitadas por Hancock Turfgrass Field Laboratory (Laboratorio en Campo de Césped Hancock). Cuentan con la resistencia estructural requerida y un sistema de drenaje, además de esto el piso de las unidades está moldeado para poder ser transportado por medio de monta cargas como se muestra en la ilustración 4.1-1.

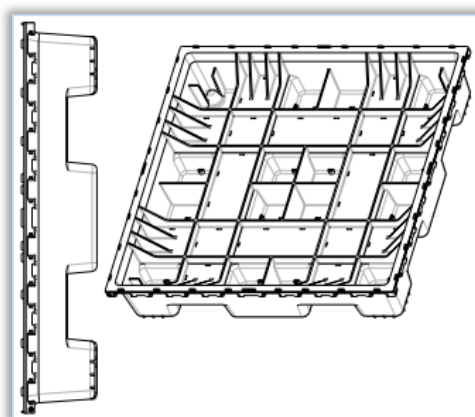


Ilustración 0-11 Unidades de suelo portátil.

Fuente: GreenTech.

Cada parcela de erosión cuenta con la capacidad para contener aproximadamente  $0,5\text{m}^3$  de suelo, lo cual constituye un peso de suelo estimado en 750kg. Considerando un adicional por el peso del agua aplicada durante la simulación de lluvia.

En la Ilustración 4.1-2 se presenta la conformación de dos parcelas de erosión, nótese que ambas parcelas están unidas, en la ilustración 4.1-4 se puede ver el detalle de la división que segrega las parcelas. Como se puede apreciar en esta ilustración los soportes de madera se disponen de forma transversal en toda la estructura, además de forma perimetral se disponen los tablones de mayor dimensión (2x10 pulg.) para contener las USP y el suelo como tal.

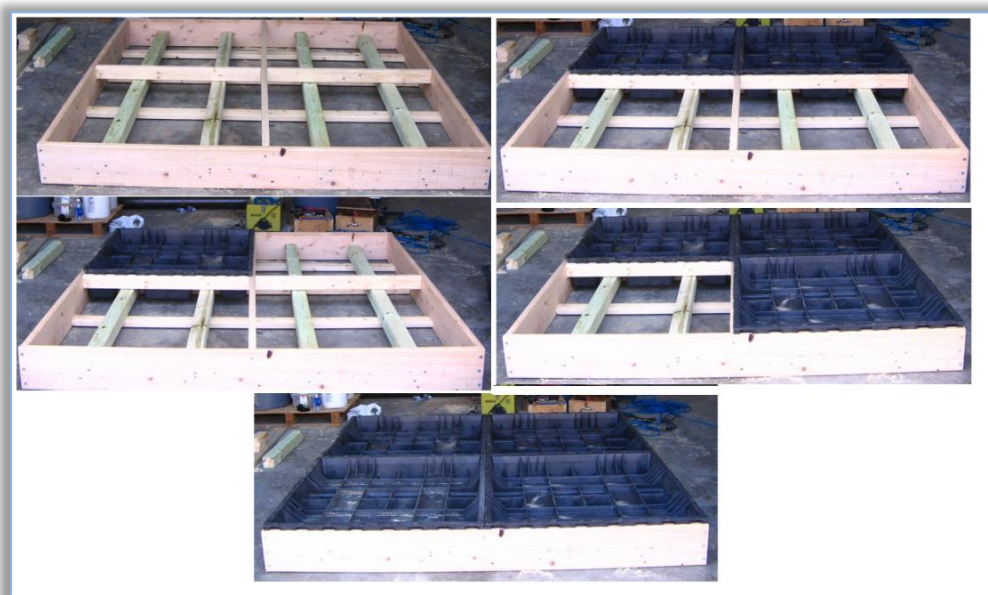
### *Alcances de las parcelas de erosión:*

Variación de pendiente: el grado de inclinación puede ser variado hasta un 30%. Para modificar la pendiente se introducen blocks de concreto bajo el lado superior de las parcelas hasta la altura adecuada, dando el grado de inclinación deseado. Un equipo de monta cargas es el empleado para variar el grado de la pendiente, como se muestra en la ilustración 4.1-3

Sistema de drenaje: El fondo de las USP cuenta con orificios de 6,35mm. Una capa de red de fibra de vidrio es adherida al fondo de cada USP y se dispone una cama de grava (4,75mm) de tres centímetros de espesor antes de agregar el suelo.

Colector de escorrentía: Un canal colector se dispone en la base de cada parcela de erosión. El colector consiste de un tubo de PVC (10,2cm) cortado a la mitad, el tubo cuenta con una inclinación que transporta la escorrentía al punto de muestreo y medición volumétrica de escorrentía. El canal colector se cubre con una lámina para que únicamente capte escorrentía y no lluvia.

Estructura de soporte: se conformó por tablas de madera con dimensiones de 5,08cm x 10,16cm, 10,16cm x 10,16cm, 5,08cm x 25,4cm y 2,54cm x 20,32cm, por 3,05m de largo. En la ilustración 4.1-2 se puede apreciar el detalle del diseño de la estructura de soporte.



**Ilustración 0-12 Proceso de Conformación de Parcela**



**Ilustración 0-13 Pendiente de parcela**

La ilustración 4.1-4 presenta la descripción de las partes anteriormente detalladas de la parcela de erosión (sistema de drenaje, barrera divisora de parcelas y canal colector de escorrentía). La ilustración se encuentra en la etapa previa al agregado del suelo y colocación de los sacos de geotextil. En la Ilustración 4.1-5 se aprecia el proceso final de conformación de dos parcelas. Se puede apreciar, gradualmente, como se conforman el sistema de drenaje, el suelo y de los sacos de geotextil. La parcela completamente conformada ilustra la condición de 30% de pendiente. El costo final de materiales de confección de las parcelas fue de US\$ 300.



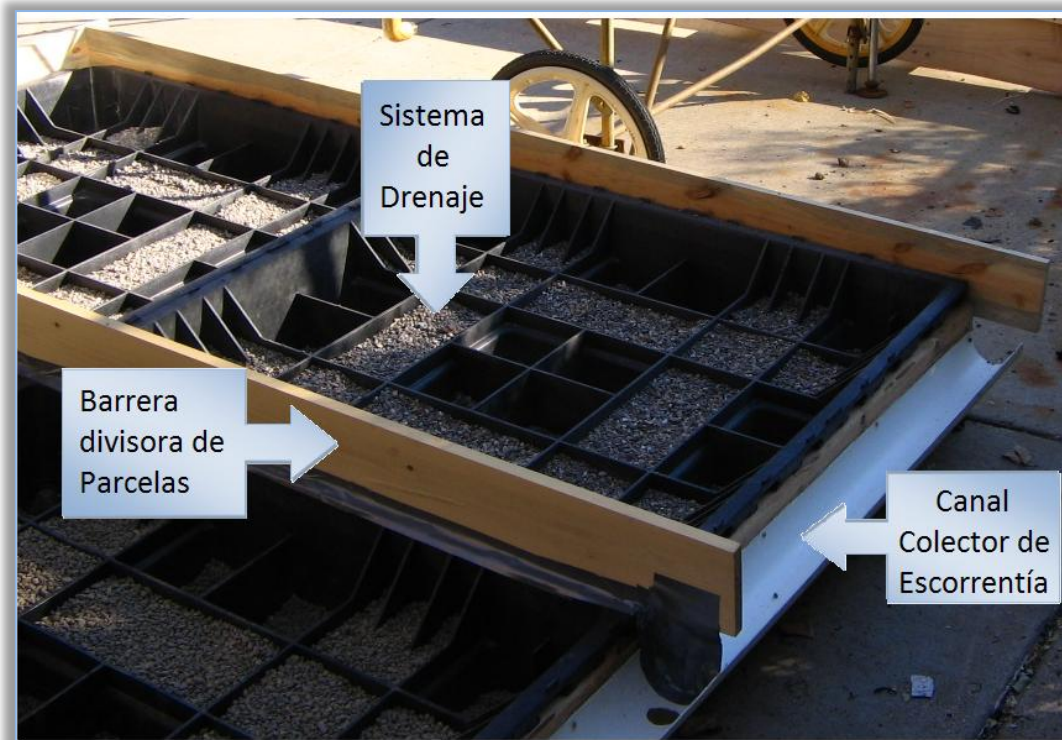


Ilustración 0-14 Descripción de componentes de parcela de erosión



Ilustración 0-15 Parcela de erosión finalizada

## 4.2.Simulador de lluvia

Del estudio de los dos simuladores de lluvia a emplear se genera la curva de calibración Presión vs Intensidad. Esta curva permite ajustar cada simulador para proporcionar el parámetro de operación de lluvia deseado y descritos anteriormente en la metodología. En el anexo 8.1 en la tabla 8.1-3 se presenta el análisis estadístico desarrollado para los dos simuladores donde se puede ver que la diferencia de aplicación y cobertura de los simuladores no es significativa.

La curva descrita en la ilustración 4.2-1 permite relacionar la presión de salida medida por los manómetros presentes en cada simulador respecto a la intensidad de aplicación deseada para la simulación de las condiciones estudiadas.

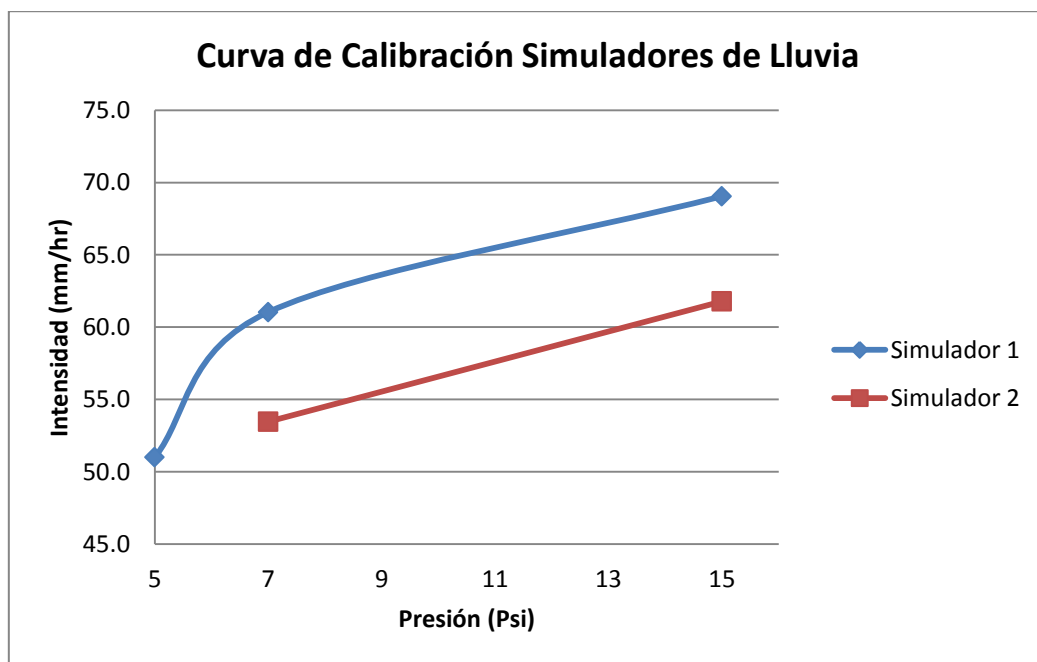


Ilustración 0-16 Curva de calibración Presión/Intensidad

### 4.3. Escorrentía y carga de sedimentos

De acuerdo al diseño experimental establecido se estudian las variables de litros de escorrentía captados y carga de sedimentos presentes en el muestreo. Estas variables se evalúan bajo las condiciones de simulación de lluvia establecidas en la metodología. Finalmente los factores que intervienen en la evaluación son: el tratamiento de sacos de geotextil (para dos rellenos de saco distintos), la no presencia de los sacos (condición control), inclinación de pendiente (dos inclinaciones evaluadas) y grado de compactación del suelo (dos grados de compactación evaluados).

Fueron desarrollados 32 experimentos en total, contemplando tres repeticiones para cada evaluación de tratamientos y factores y dos repeticiones para las evaluaciones control. El resultado obtenido para cada una de las pruebas se resume en la tabla 4.3-1. La tabla presenta el dato de litros de escorrentía totales recolectados durante los 90 minutos de evaluación para cada prueba. Este resultado se obtiene de la suma de los datos que ofrece el equipo de *tipping bucket* el cual calcula los litros de escorrentía cada 15 minutos.

Multiplicando la escorrentía captada para cada 15 minutos de la prueba por el promedio del resultado de concentración de sedimentos calculado por el análisis de los sólidos totales, (mg/L, recolectadas cada 15 minutos igualmente), se obtiene el resultado de sedimentos captados en los seis segmentos de 15 minutos por la duración de la prueba (90 minutos). Al sumar los sedimentos generados durante toda la evaluación se presenta el resultado de gramos de sedimentos totales captados para las 32 prueba realizadas como se muestra igualmente en la tabla 4.3-1.



Tabla 0-7 Resultado de pruebas en parcelas de erosión

Prueba	Tratamiento	Pendiente (%)	Compactación (Mpa)	Repetición	Escorrentía (L)	Sedimentos (g)
1	Compost + Arena	30	0	1	301	554.42
2	Compost + Arena	30	0	2	364	1076.80
3	Compost + Arena	30	0	3	291	509.68
4	Compost + Arena	15	0	1	390	1320.20
5	Compost + Arena	15	0	2	82	116.17
6	Compost + Arena	15	0	3	368	1098.95
7	Cemento + Arena	30	0	1	252	856.15
8	Cemento + Arena	30	0	2	149	326.77
9	Cemento + Arena	30	0	3	329	660.10
10	Cemento + Arena	15	0	1	152	412.05
11	Cemento + Arena	15	0	2	359	492.75
12	Cemento + Arena	15	0	3	97	295.06
13	Control	30	0	1	326	4097.48
14	Control	30	0	2	377	2635.45
15	Control	15	0	1	260	961.59
16	Control	15	0	2	329	1246.04
17	Compost + Arena	30	2	1	485	2456.95
18	Compost + Arena	30	2	2	461	1716.96
19	Compost + Arena	30	2	3	485	2228.97
20	Compost + Arena	15	2	1	346	422.49
21	Compost + Arena	15	2	2	395	440.16
22	Compost + Arena	15	2	3	408	171.92
23	Cemento + Arena	30	2	1	343	2368.39
24	Cemento + Arena	30	2	2	346	1430.96
25	Cemento + Arena	30	2	3	482	1968.21
26	Cemento + Arena	15	2	1	374	1241.18
27	Cemento + Arena	15	2	2	439	757.61
28	Cemento + Arena	15	2	3	467	399.93
29	Control	30	2	1	533	3246.69
30	Control	30	2	2	462	1838.67
31	Control	15	2	1	473	1374.43
32	Control	15	2	2	471	1445.53

### 4.3.1. Análisis estadístico: Variable escorrentía

Por medio del paquete estadístico InfoStat y aplicando el método comparativo de Tukey, con una significancia de 0,05 se analizan los resultados de los tratamientos y factores estudiados en las pruebas, el detalle del análisis se presentan en la tabla 4.3-2.

Como se puede observar para el caso de la variable escorrentía los dos tratamientos examinados de sacos de geotextil (relleno de Compost + Arena, relleno de Cemento + Arena) y el Control indican que no existe diferencia significativa para una significancia de 0,05. El valor de p que ofrece el análisis de varianza es de 0,0543, lo cual muestra que está muy cercano a ser significativa la diferencia de los tratamientos respecto a las pruebas control.

A pesar de que nos se presenta diferencia significativa entre tratamientos respecto al control los tratamientos de sacos de geotextil presentan una media menor en cuanto a litros de escorrentía recolectados (media Compost+Cement 315,75 L, Compost+Arena 364,67 L), respecto a la condición de control (media 403,88 L).

En cuanto a los factores de pendiente y compactación, la compactación es el factor determinante y se presenta una diferencia significativa entre la condición de suelo suelto y suelo compacto a 2 Mpa de resistencia a la penetración. La condición compactada (media 440,93 L) presenta mayor generación de escorrentía que las evaluaciones de suelo suelto (media 281,93 L).

Finalmente para la variable escorrentía el estudio de varianza indica que el factor de pendiente no es significativamente diferente entre la condición de 15 y 30 por ciento de pendiente. A pesar de esto la media de la condición a un 30% de pendiente (379,43 L) es superior en generación de escorrentía respecto a la de 15% de pendiente (343,43 L).

Los gráficos de las ilustraciones 4.3-1, 4.3-2 y 4.3-3 reflejan respectivamente el comportamiento de la distribución de frecuencias para los factores Tratamiento, Pendiente y Compactación respecto a la variable escorrentía. En los gráficos de caja se describen los percentiles 25%, 50% (mediana) y 75%, además del promedio (punto). Las líneas o bigotes representan los puntos muestrales extremos.

Tabla 0-8 Análisis de varianza para escorrentía total

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Escorrentía (L)	32	0.61	0.55	21.65

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)

	F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo		251293.71	4	62823.43	10.56	<0.0001
Tratamiento		38677.71	2	19338.85	3.25	0.0543
Pendiente (%)		10368.00	1	10368.00	1.74	0.1978
Compactación (Mpa)		202248.00	1	202248.00	34.01	<0.0001
Error		160571.79	27	5947.10		
Total		411865.50	31			

**Test : Tukey Alfa: 0.05 DMS: 83.01169**

Error: 5947.1034 gl: 27

Tratamiento	Medias	n		
Cemento + Arena	315.75	10	A	
Compost + Arena	364.67	12	A	B
Control	403.88	10		B

**Test : Tukey Alfa: 0.05 DMS: 55.98728**

Error: 5947.1034 gl: 27

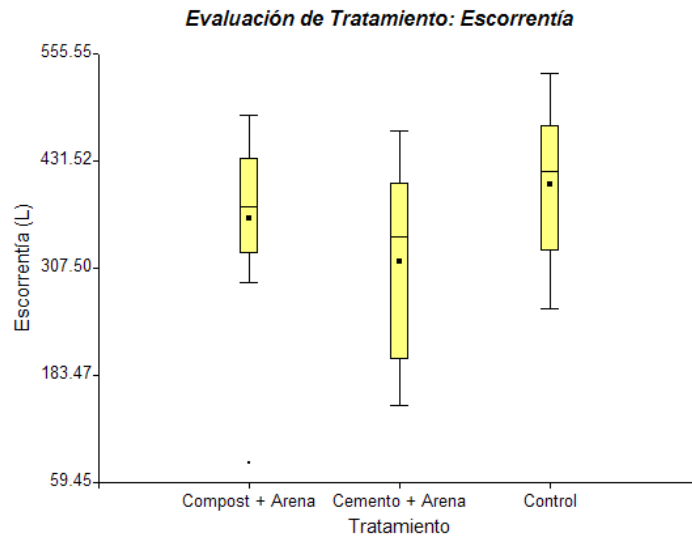
Pendiente (%)	Medias	n	
15.00	343.43	16	A
30.00	379.43	16	A

**Test : Tukey Alfa: 0.05 DMS: 56.20814**

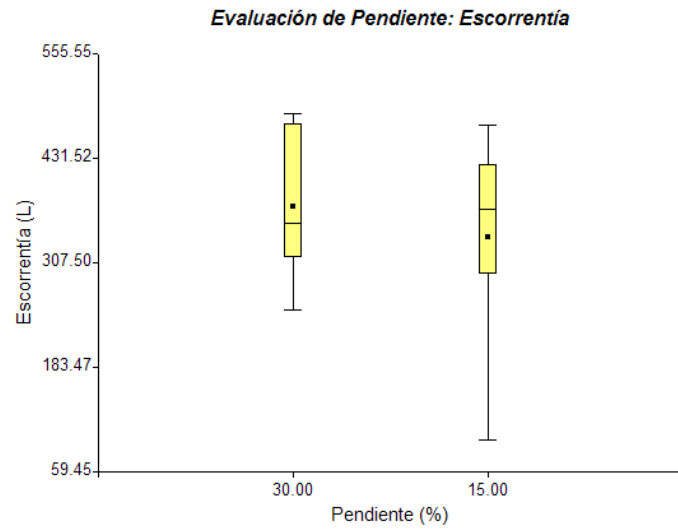
Error: 5947.1034 gl: 27

Compactación (Mpa)	Medias	n	
0.00	281.93	18	A
2.00	440.93	14	B

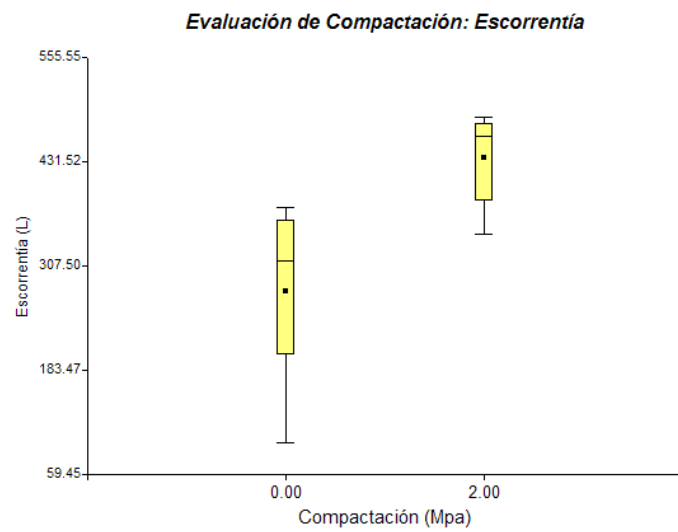
Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ )



**Ilustración 0-17 Evaluación de tratamientos: Escorrentía**



**Ilustración 0-18 Evaluación de compactación: Escorrentía**



#### 4.3.2. Análisis estadístico: Variable sedimentos

De igual forma que para la escorrentía total, en el caso de la carga total de sedimentos de cada prueba se emplea el método comparativo de Tukey, con una significancia de 0,05, los resultados del análisis se presentan en la tabla 4.3-3 .

Analizando la variable carga de sedimentos el análisis de los datos indica que el uso de tratamientos de sacos de geotextil colecta significativamente menos cantidad de sedimentos ( $p = 0,0009$ ) respecto a las pruebas control (media 2105,74 g). Además que el tratamiento de sacos con relleno de cemento y arena (media 934,10 g) presentan una media menor en la carga de sedimentos, en comparación con el desempeño de los sacos rellenos con compost y arena (media 1009,47 g), a pesar de que no se presenta una diferencia significativa entre estos dos tratamientos.

En el estudio del factor pendiente, se observa que la carga de sedimentos obtenida en las pruebas con inclinación al 15% (media 856,75 g) si es significativamente menor respecto a las pruebas realizadas en inclinación al 30% (media 1842,79 g).

El grado de compactación del suelo, donde se analizó la condición de suelo suelto (0 Mpa de resistencia a la penetración) y suelo compacto a 2 Mpa de resistencia a la penetración, no presenta diferencia significativa en cuanto a la carga de sedimentos calculados durante las pruebas en las parcelas de erosión.

En las ilustraciones 4.3-4, 4.3-5, y 4.3-6 se presentan gráficos de caja que describen el comportamiento de los tratamientos evaluados, la condición control y los factores inclinación de pendiente y grado de compactación resultantes para el estudio de la carga de sedimentos dentro de las pruebas realizadas. La distribución de frecuencias presentada en los gráficos de caja describen los percentiles 25%, 50% (mediana) y 75%, además del promedio (punto). Las líneas o bigotes representan los puntos muestrales extremos.

Tabla 0-9 Análisis de varianza para carga de sedimento total

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Sedimentos (g)	32	0.60	0.54	51.59

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	16993367.11	4	4248341.78	10.13	<0.0001
Tratamiento	7749150.38	2	3874575.19	9.24	0.0009
Pendiente (%)	7778149.75	1	7778149.75	18.55	0.0002
Compactación (Mpa)	1466066.98	1	1466066.98	3.50	0.0724
Error	11322286.68	27	419343.95		
Total	28315653.79	31			

**Test : Tukey Alfa: 0.05 DMS: 697.06244**

Error: 419343.9510 gl: 27

Tratamiento	Medias	n	
Cemento + Arena	934.10	10	A
Compost + Arena	1009.47	12	A
Control	2105.74	10	B

**Test : Tukey Alfa: 0.05 DMS: 470.13416**

Error: 419343.9510 gl: 27

Pendiente (%)	Medias	n	
15.00	856.75	16	A
30.00	1842.79	16	B

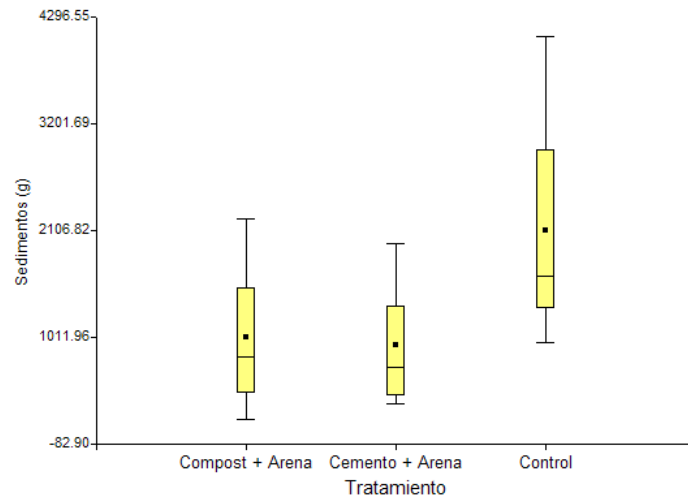
**Test : Tukey Alfa: 0.05 DMS: 471.98877**

Error: 419343.9510 gl: 27

Compactación (Mpa)	Medias	n	
0.00	1135.72	18	A
2.00	1563.81	14	A

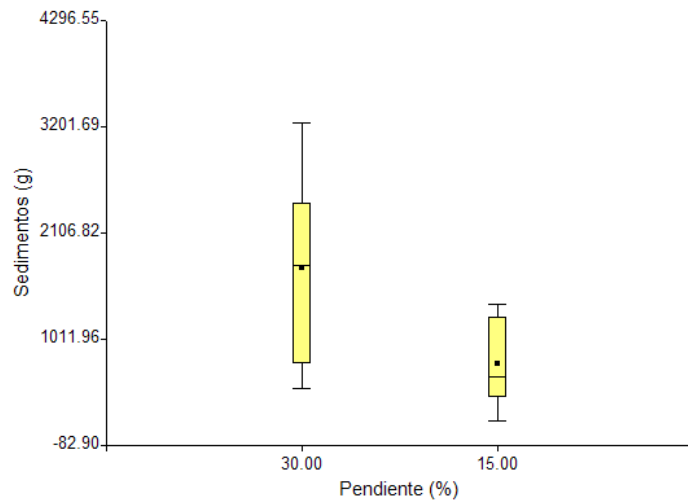
Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ )

**Evaluación de Tratamiento: Carga de Sedimentos**



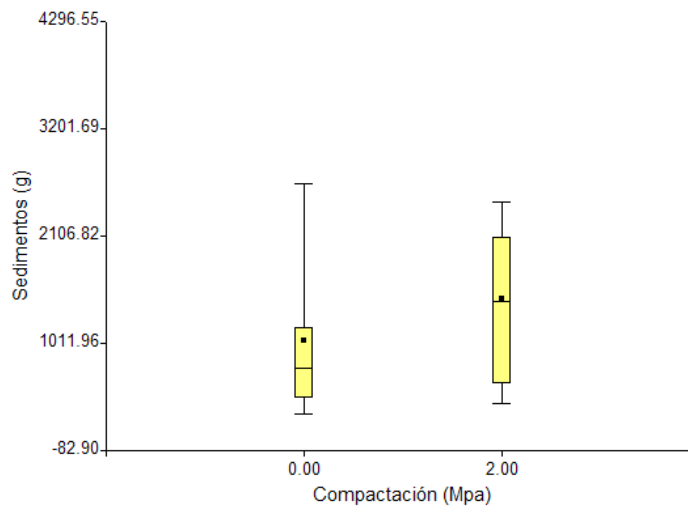
**Ilustración 0-20 Evaluación de tratamiento: Carga de sedimentos**

**Evaluación de Pendiente: Carga de Sedimentos**



**Ilustración 0-21 Evaluación de pendiente: Carga de sedimentos**

**Evaluación de Compactación: Carga de Sedimentos**



#### 4.4. Factor P. práctica de conservación (RUSLE)

Se obtiene el factor P de Práctica de Conservación (RUSLE) correspondiente a cada tratamiento empleado (saco de geotextil para sus dos rellenos), para cada condición de pendiente y compactación respecto a su equivalente control. El valor de factor P otorgado a las evaluaciones control es uno (como se describe en la metodología). La tabla 4.4-1 presenta los resultados obtenidos en las 32 evaluaciones realizadas.

Se obtiene el resultado individual para cada una de las tres repeticiones realizadas a los tratamientos y factores evaluados. En el caso de las pruebas control solo se desarrollan dos repeticiones, este valor se emplea promediado. Por lo que cada factor P de cada tratamiento es igual a la carga de sedimentos medidos entre el promedio de las dos pruebas control que presentan las condiciones equivalentes, como lo describe la ecuación 3.9-3.



Tabla 0-10 Resultados para factor P

Tratamiento	Pendiente (%)	Compactación (Mpa)	Sedimentos (g)	Factor P
Compost + Arena	30	0	554.42	<b>0.16*</b>
Compost + Arena	30	0	1076.80	<b>0.32</b>
Compost + Arena	30	0	509.68	<b>0.15</b>
Compost + Arena	15	0	1320.20	<b>1.2</b>
Compost + Arena	15	0	116.17	<b>0.11</b>
Compost + Arena	15	0	1098.95	<b>1</b>
Cemento + Arena	30	0	856.15	<b>0.25</b>
Cemento + Arena	30	0	326.77	<b>0.1</b>
Cemento + Arena	30	0	660.10	<b>0.2</b>
Cemento + Arena	15	0	412.05	<b>0.37</b>
Cemento + Arena	15	0	492.75	<b>0.45</b>
Cemento + Arena	15	0	295.06	<b>0.27</b>
Control	30	0	4097.48	1
Control	30	0	2635.45	1
Control	15	0	961.59	1
Control	15	0	1246.04	1
Compost + Arena	30	2	2456.95	<b>0.97</b>
Compost + Arena	30	2	1716.96	<b>0.68</b>
Compost + Arena	30	2	2228.97	<b>0.88</b>
Compost + Arena	15	2	422.49	<b>0.3</b>
Compost + Arena	15	2	440.16	<b>0.31</b>
Compost + Arena	15	2	171.92	<b>0.12</b>
Cemento + Arena	30	2	2368.39	<b>0.93</b>
Cemento + Arena	30	2	1430.96	<b>0.56</b>
Cemento + Arena	30	2	1968.21	<b>0.77</b>
Cemento + Arena	15	2	1241.18	<b>0.88</b>
Cemento + Arena	15	2	757.61	<b>0.54</b>
Cemento + Arena	15	2	399.93	<b>0.28</b>
Control	30	2	3246.69	1
Control	30	2	1838.67	1
Control	15	2	1374.43	1
Control	15	2	1445.53	1

# Capítulo 5. Discusión de resultados

---

## 5.1. Parcela de erosión

Para evaluar elementos de control de erosión tipo barrera o perimetrales es imprescindible contar con las condiciones adecuadas. Gracias al diseño de parcela de erosión confeccionado para el presente estudio se logra controlar los efectos de los factores tratamientos, pendiente y compactación del suelo adecuadamente. El control de estos factores permitió ofrecer resultados óptimos de las variables escorrentía y carga de sedimentos.

El proceso constructivo de las parcelas de erosión fue de fácil conformación (realizable por una persona, óptimamente por dos). Además la estructura de parcela de erosión toleró apropiadamente las cargas a las cuáles fue sometida y para las cuáles se diseñó, permitiendo una efectiva práctica durante cada prueba.

La dimensión de las parcelas de erosión facilitó evaluar el tratamiento de sacos de geotextil de forma adecuada ya que permitió valorar el efecto de este elemento de control de erosión y el efecto en una confección típica donde se tiene el traslape entre los sacos de geotextil.

Durante el desarrollo de las pruebas por medio de la observación se evidenció ocasionalmente, en especial en las pruebas bajo condición de suelo compacto, el desborde del agua por sobre la barrera de sacos de geotextil. Este efecto fue esperado, pero luego de una reflexión al respecto se define que un sistema de drenaje que facilitara más la evacuación del agua pudo aminorar esta condición, permitiendo una mejor infiltración. En este caso se plantea que un diámetro mayor en los orificios de las Unidades de Suelo Portátil (el diámetro empleado fue de  $\frac{1}{4}$  de pulgada) pudo ofrecer una mejor evacuación del agua.

## 5.2.Simulador de lluvia

De acuerdo al patrón de simulación empleado de 50mm/hr por 30 minutos, seguido de 60 mm/hr por otros 30 minutos y finalizando con una intensidad pico de 70 mm/hr por otros 30 minutos, la acumulación de precipitación aplicada para los 90 minutos de evaluación fue de 90 mm.

Para el diseño de obras de conservación en los suelos de Costa Rica es típico el uso de intensidades críticas de lluvia de 100 mm/hr por un período de 60 minutos en cualquier zona del país (Vahrson & Dercksen, 1990). Esto no siempre es óptimo ya que las precipitaciones pueden variar ampliamente en un rango espacial; las precipitaciones anuales presentan un rango de 1400 mm hasta 7700mm de acuerdo a la zona del país (Vahrson W.-G. , 1992).

Para eventos de lluvia de 100mm diarios los períodos de retorno en general a nivel nacional son de 1,1 a 5 años, es decir períodos muy frecuentes (Vahrson W.-G. , 1992). Con estos datos que se presentan de regímenes de lluvia típicos de Costa Rica y propios para el diseño de obras de conservación se busca recalcar el parámetro de lluvia aplicado está dentro de los rangos normales. Por lo que la simulación de 90mm de lluvia aplicada en 90 minutos es una condición que simula ajustable a las condiciones típicas de Costa Rica.

Las muestras extraídas para las pruebas de laboratorio (sólidos totales) son tomadas a partir del minuto 15 de iniciada la prueba. Debido a que, a pesar de que se aplicó lluvia durante los 90 minutos de la prueba, la escorrentía no inicia hasta que la tasa de lluvia excedió la tasa de infiltración del suelo. En la Ilustración 5.2-1 se presenta la gráfica de tasa de lluvia aplicada durante la simulación y la lluvia acumulada cada 15 minutos por la duración de los 90 minutos de prueba.

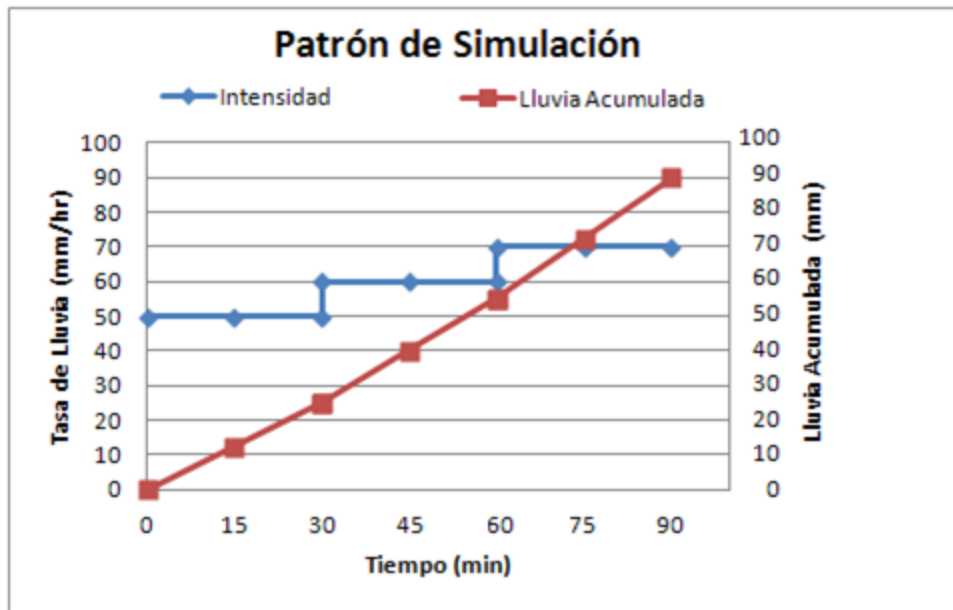


Ilustración 0-23 Tasa de simulación y lluvia acumulada para los 90 minutos de prueba.

Como se observó en la Ilustración 4.2-1 la curva de calibración de los dos simuladores de lluvia empleados para las pruebas la tasa de aplicación de ambos equipos varía ligeramente para una respectiva presión. Este hecho se trató de compensar durante la práctica gracias a la calibración realizada para ambos simuladores, pero esta leve desviación podría presentar ruido en los resultados.

Durante el desarrollo de las pruebas el simulador 1 siempre fue empleado en las parcelas con condición de suelo suelto (cero Mpa de resistencia a la penetración) y el simulador 2 fue únicamente empleado en la parcela de suelo compactado (dos Mpa de resistencia a la penetración). Por lo que este error está aislado y los resultados de cada evaluación para cada tratamiento en particular no se ven afectados.

## 5.3. Escorrentía y carga de sedimentos

### 5.3.1. Escorrentía

Para el caso de la efectividad de los sacos en la reducción de la escorrentía, se obtuvo que el tratamiento más eficiente fue el de Compost + Arena, para 15% de pendiente y en condición de suelo suelto, con una reducción de 72% respecto al similar control.

Los elementos de control de erosión de tipo barrera proporcionan un retardo hidráulico que contrarresta el flujo superficial, este retardo facilita que los sedimentos se asienten detrás de la barrera y permite que el agua tenga más tiempo para infiltrar en el terreno (Dabney, McGregor, Wilson, & Cullum, 2009). Los resultados en cuanto a volumen de escorrentía captada proponen que para un  $p = 0,05$  la diferencia respecto al uso de los sacos de geotextil versus el no uso (pruebas control) no es significativa ( $p = 0.0543$ ).

Como se puede ver los resultados quedan en un límite muy cercano a ser propiamente disímiles. La media de los resultados si indica que la condición control es la que alcanza la mayor cantidad de flujo superficial captado con una media de 403,88 litros, como era de esperar. Asimismo, dentro de los tratamientos de sacos de geotextil aplicado el tratamiento con relleno de Cemento + Arena es el que ofrece la menor media con 315,75 litros de escorrentía captada. El tratamiento de sacos de geotextil con Compost + Arena como relleno indica una media de 364,67 litros de escorrentía medidos.

El resultado de  $p = 0,0543$  tan próximo a ser significativo es coherente con el resultado, que más adelante se discutirá, de la carga de sedimentos. Donde se tiene relación con la base que indica que el emplear elementos de barrera como los sacos de geotextil permite el asentamiento de los sedimentos y por tanto la reducción de su presencia en la escorrentía que continuará pendiente abajo.

Además, el retardo hidráulico que le proporciona el tratamiento de sacos al flujo superficial va a promover la infiltración del suelo en el espejo de agua que se genera detrás del sistema de sacos, pendiente arriba. Esta situación de obligar al flujo superficial a infiltrar explica el resultado obtenido donde las medias de ambos tratamientos de sacos empleados son menores en volumen de escorrentía respecto a la condición control. (Ver Anexos Ilustración 8.4-6).

En cuanto al efecto de la compactación del suelo los resultados indican que este factor marcó una fuerte huella en la variable escorrentía. El cálculo de la escorrentía total obtenida en cada prueba (menos para el caso único de la prueba 4, ver tabla 4.3-1) fue mayor para cada condición donde el suelo se presentó compactado (resistencia a la penetración de 2 Mpa), respecto a su homólogo en suelo suelto (resistencia a la penetración de 0 Mpa).

El incremento de escorrentía dado al aumento de la compactación del suelo es debido a que la compactación va a reducir el espacio poroso de la masa del suelo, reduciendo además la tasa de infiltración. Este hecho va a hacer que el flujo del agua al interior de la masa de suelo sea más difícil por lo que el agua toma el camino más fácil, el cuál es desplazarse superficialmente por la parcela incrementando el registro volumétrico de escorrentía.

La partícula de suelo es erosionada por la escorrentía cuando la energía del flujo superficial de agua supera la fuerza cortante de la partícula de suelo unida a la masa, esta relación hidráulica está directamente relacionada a la velocidad del flujo (Morgan, 1997). Por esta razón sería de esperar que para los casos de mayores pendientes, donde la velocidad del flujo puede alcanzar valores más elevados, la capacidad erosiva de la escorrentía sea superior.

Como se aprecia en el análisis estadístico los resultados sugieren que no hay una diferencia significativa en el volumen de escorrentía captada entre las evaluaciones a 15% y 30% de pendiente. A pesar de esto los resultados sugieren que para el caso de la carga de sedimentos la pendiente si constituye un factor determinante. La recolección de sedimentos para las pruebas en 30% de inclinación es significativamente superior a los resultados obtenidos en cuanto a sedimentos colectados en 15% de inclinación.

En este punto entra en juego la consideración de factores adicionales como lo son el golpe de la gota de lluvia sobre el flujo, donde en inclinaciones menores la capa superficial permite un flujo laminar más elevado, este mismo flujo proporciona una protección ya que el impacto de la gota no es directo sobre la superficie del suelo (Morgan, 1997).

Por esto, a pesar de que la diferencia en cuanto a volumen de flujo superficial captado no sea significativa, los resultados indican que para la condición de pendiente al 30% el cortante de las partículas de suelo es más fácilmente superado lo que explica el aumento significativo de sedimentos presentes, en comparación a la condición de 15% de inclinación. Además la elevada inclinación favorece un espesor de flujo superficial menor permitiendo que la gota de lluvia colisione de forma más directa contra el suelo, y por tanto se facilite la erosión de las partículas del suelo.

Otro aspecto por rescatar es la desviación en los datos obtenidos para cada prueba. El tratamiento conformado con relleno de cemento y arena, a pesar de ser el que ofreció los mejores resultados, también indicó las mayores desviaciones de rangos. En el caso del factor compactación los resultados más variables fueron los obtenidos en las pruebas realizadas en suelo suelto. Finalmente para el factor pendiente los datos oscilaron en rangos más amplios para el caso de las pruebas desarrolladas en 15% de inclinación.

### 5.3.2. Carga de sedimentos

Los tratamientos de sacos de geotextil evaluados mostraron su efectividad en la reducción de la carga de sedimentos; además, las dos mezclas de rellenos empleados en la experimentación fueron efectivas al reducir los sedimentos respecto a las evaluaciones control. Existiendo una diferencia significativa con  $p = 0,0009$  entre tratamientos y control.

De las pruebas realizadas para evaluar el efecto del tratamiento de sacos de geotextil se observó que en la carga de sedimentos se obtuvo hasta un 90% en la reducción de los sedimentos presentes respecto al control, el tratamiento que ofreció este valor fue el de sacos rellenos de Cemento + Arena, para una pendiente del 30% en condición de suelo suelto.

A pesar de que los resultados entre mezclas de relleno empleados dentro de los sacos fueron igualmente eficaces, la mezcla de cemento con arena dictó un comportamiento ligeramente mejor en la reducción de la carga de sedimentos. Una posible forma de definir si realmente puede existir una diferencia entre estas dos mezclas de relleno se requiere desarrollar un estudio más a fondo y específicamente con el fin de comparar estas dos mezclas, además de un incremento en las repeticiones realizadas.

La mezcla de compost con arena es la indicada por el fabricante de los sacos de geotextil. Por lo que era de esperar que esta mezcla presentara mejores resultados. A pesar de esto la media del análisis estadístico tanto de escorrentía total como de carga de sedimentos total fue mayor para las evaluaciones que presentaban tratamiento con este tipo de relleno. Situando a la mezcla de cemento con arena en una mejor posición respecto a su capacidad de disminuir el volumen de escorrentía y la carga de sedimentos captados en el punto de colección del sistema.

¿A qué razonamiento se le atribuye este hecho? Una posible explicación se puede dar al observar y evaluar visualmente los dos rellenos. Durante el trabajo con los sacos se pudo notar que el relleno de compost arena se acomoda de una forma tal dentro de los sacos que permite que sean más apelmazables o moldeables cuando se encuentra en condición húmeda. Presentando una condición de mayor capacidad para retardar el flujo del agua, esto ocasiona en algunos momentos un desborde de escorrentía por sobre los sacos. Al pasar por arriba de los sacos la escorrentía los sedimentos no se retienen adecuadamente.

Por otro lado el relleno que emplea cemento sufre un cambio químico al ser humedecido, como es de esperarse el cemento forma agregados más gruesos dentro del saco. Al incrementar el tamaño de los agregados dentro del saco también se incrementa el tamaño del espacio poroso. Cuando se tiene mayor espacio poroso dentro de los sacos el retardo hidráulico que causa el sistema va a disminuir, permitiendo que la velocidad del flujo a través de los sacos sea mayor. Entonces, el relleno de cemento-arena va a lograr que escenarios en los que el agua se desborda por sobre el muro de sacos se van a presentar en menos ocasiones en comparación con los que se puedan dar con el relleno compost-arena.

Teóricamente un relleno que ofrezca mayor retardo hidráulico al flujo es mejor ya que permite que el agua se asiente más y se atrapa mayor cantidad de partículas de suelo. El factor determinante aquí es la inclinación de pendiente. Al trabajar con pendientes elevadas como lo son 15% y 30% el flujo del agua es rápido y necesita tomar el camino que requiera “el menor esfuerzo”. Si el retardo hidráulico que ofrecen los sacos es tal que no permite evacuar el agua a través de ellos, el nivel de agua puede incrementarse y pasar por sobre los sacos en vez de a través de ellos. Efecto que fue visualizado durante las evaluaciones.

Toy y Foster (1998) describen este efecto de manera tal que las estructuras de barrera para el control de sedimentos van a ser causantes de un estancamiento del agua y deposición de sedimentos; y que la efectividad de la barrera se encuentra directamente relacionada con la longitud y volumen del agua estancada. De manera tal que esta longitud y volumen se ven incrementadas a medida que disminuye la pendiente del terreno (Toy & Foster, 1998).

Este asentamiento de los sedimentos en la parte de atrás, pendiente arriba, del muro de sacos de geotextil van creando con el tiempo una pequeña terraza en esta zona. En condiciones de campo esto sería de mucha importancia en el control de la erosión. Al disponer este sistema en campo se van creando las terrazas a lo largo de una pendiente el factor de longitud de pendiente (RUSLE) va a disminuir. Por lo que la fuerza erosiva del flujo superficial va a disminuir.



En cuanto al factor compactación del suelo no se puede indicar una generalización entre los datos. Ya que la diferencia entre las evaluaciones en suelo suelto y suelo compactado no fue significativamente diferente para el conteo de carga de sedimentos. A pesar de que la diferencia no se ve significativa la media de la carga de sedimentos de las parcelas en suelo compactado es mayor a la media de las parcelas en suelo suelto.

Ekwue et al (2010) desarrollan un experimento donde estudia el factor compactación y su efecto sobre la erosión del suelo. Ekwue et al. Analizan dos tipos de suelo (Inceptisol: 67,7% arena, 15,3% limo, 17% arcilla y Alfisol: 80,4% arena, 4,7% limo, 14,9% arcilla). Estos suelos son de texturas gruesas similares al suelo Franco Arenoso que se emplea en el presente estudio. Pero con la diferencia que Ekwue et al. obtienen que para ambos tipos de suelo el incremento en la compactación del suelo reduce la pérdida de este por erosión. Los tres grados de compactación que aplican los autores son 0,95 Mpa, 1,37 Mpa, 1,79 Mpa.

La compactación puede actuar de distintas maneras en el suelo. Puede crear un sello que proteja las partículas del suelo de ser desprendidas de la masa. Pero también puede destruir la estructura del suelo, rompiendo los agregados y convirtiéndolos en partículas de menor tamaño, hasta cierto punto más fácilmente erosionables.

El vegetar el sistema de sacos de geotextil no se encuentra dentro de los alcances de este estudio. El fabricante del producto recomienda vegetar el muro que se conforma con los sacos. Esto le otorga mayor estabilidad y soporte estructural. El efecto del sistema radicular que se extiende dentro de los sacos y la vegetación que crece sobre ellos pueden resultar en variaciones en los resultados tanto de escorrentía como de carga de sedimentos.

Hay que recordar que uno de los propósitos de este estudio es extender las aplicaciones básicas de un producto para buscar satisfacer necesidades en cuanto a control de erosión comunes dentro de la labor agrícola de Costa Rica.

### Fluctuación de concentración de sólidos en el tiempo

Un aspecto importante del estudio es la fluctuación de la concentración de sedimentos en la escorrentía durante los 90 minutos de prueba. Para poder visualizar la tendencia de los datos respecto a este aspecto de evaluación se presentan las siguientes gráficas segregadas en cuatro bloques de ilustraciones.

Cada gráfica describe el comportamiento de la concentración de sólidos en miligramos por litro recolectada durante el muestreo, para un total de seis muestras. Los resultados indican que para las evaluaciones en las cuáles fue aplicado un tratamiento, indiferentemente del relleno de sacos empleado, la tendencia de la concentración de sólidos es a bajar respecto al tiempo. De forma tal que comparando las muestras obtenidas al minuto 15 respecto a la muestra tomada al minuto 90 de la evaluación (final) presentan un rango reducción de sedimentos entre 25% a 91%, con un promedio de 65%. (Ver ilustración 5.3-1).

Esta tendencia se presenta en las evaluaciones en condición de suelo suelto tanto como en las evaluaciones donde el suelo ha sido compactado a 2 Mpa de resistencia a la penetración. En el caso de las gráficas presentes en la ilustración 5.3-3 se puede ver este efecto de reducción de la tasa de sedimentos respecto al tiempo. Para el caso de las evaluaciones de tratamientos en suelo compacto la reducción en la concentración de sedimentos de la muestra del minutos 15 respecto a la muestra del minuto 90 se da en un rango de 18% a 72%, con una media de 34%. Por lo que se puede ver que a pesar de que la tendencia es la misma se da con menor intensidad en estos casos.

Es importante examinar por qué se da este efecto de reducción en la concentración de sedimentos. En el campo de la erosión de suelos las dinámicas son multifactoriales por lo que más de una explicación es razonable. Primero, como lo describe Dabney et al (2009) los sacos de geotextil van a ejercer un retardo hidráulico al flujo superficial de agua, generando la deposición de sedimentos detrás de estos (pendiente arriba), esta acumulación de sedimentos se va incrementando con el tiempo dificultando cada vez más que los sedimentos atraviesen la barrera y lleguen hasta el punto de recolección de muestras.

Otro razonamiento por discutir, es el factor compactación de suelo. Como lo indica Magdoff (2000) el suelo va a sufrir un proceso de compactación que sella su superficie, causado por la energía del golpe de las gotas de lluvia. De forma tal que a medida que transcurre el tiempo en la evaluación el suelo se va a ir sellando y esto va a causar un efecto de reducción en el desprendimiento de partículas de suelo y por tanto disminuye la concentración de sólidos respecto al tiempo.

En el caso de las evaluaciones control los datos indican un poco más de fluctuación entre los resultados. A pesar de esto si se pudo observar la reducción de sedimentos respecto al tiempo. Donde la mayor reducción en concentración de sedimentos la presentan las evaluaciones en suelo suelto.

De las muestras tomadas a 15 minutos respecto a las muestras tomadas a 90 minutos de la condición control, en suelo suelto, se obtiene un rango de reducción en la concentración de 47% a 79%, con una media de 60%.

Las evaluaciones control en condición de suelo compactado a 2 Mpa de resistencia a la penetración indicaron una reducción en la concentración de sedimentos de un 12% a 26% (muestras minuto 15 respecto a muestras minuto 90), para una media de 21%.

En la Ilustración 5.3-1 se presentan cuatro gráficos, cada gráfico presenta un tratamiento diferente evaluado con sus correspondientes tres repeticiones; todos los gráficos de esta ilustración son en condición de suelo suelto (0 Mpa de resistencia a la penetración).

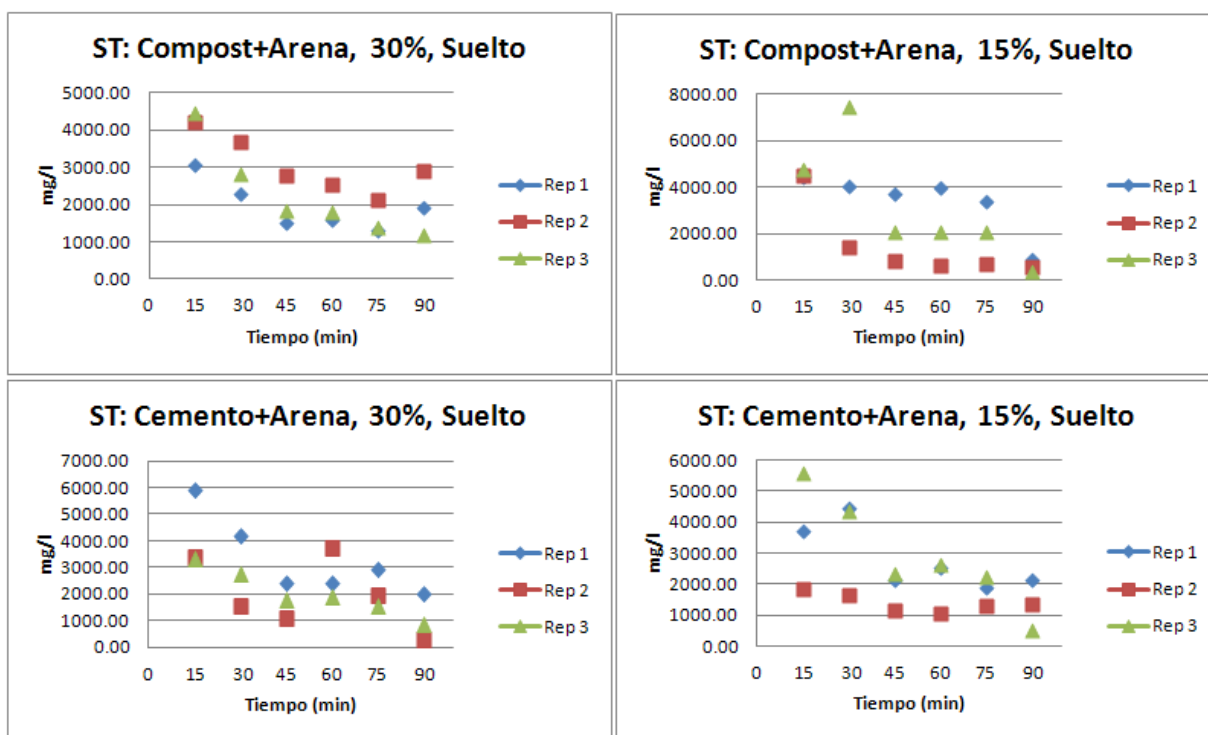


Ilustración 0-24 Gráficas sólidos totales: Evaluaciones de tratamiento en suelo suelto

En la Ilustración 5.3-2 se presentan cuatro gráficos, donde uno de los gráficos describe un tratamiento diferente evaluado con sus correspondientes tres repeticiones; todos los gráficos de esta ilustración son en condición de suelo compactado (2 Mpa de resistencia a la penetración).

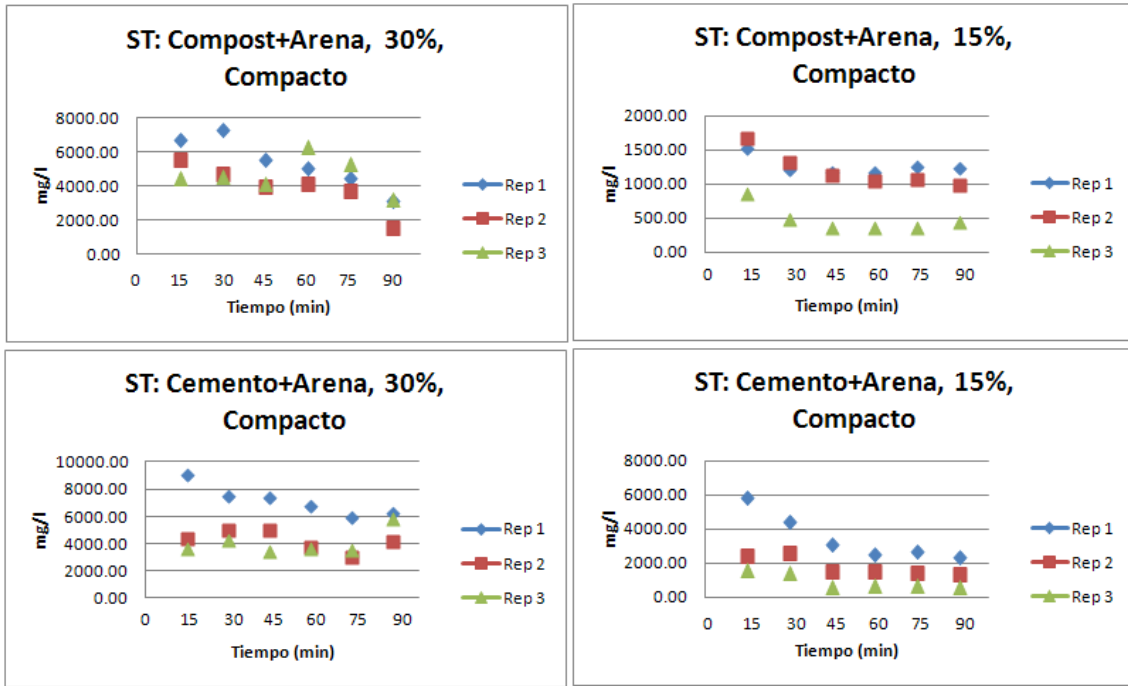


Ilustración 0-25 Gráficas sólidos totales: Evaluaciones de tratamiento en suelo compacto

En la ilustración 5.3-3 se presentan los dos gráficos de las evaluaciones control en condición de suelo suelto.

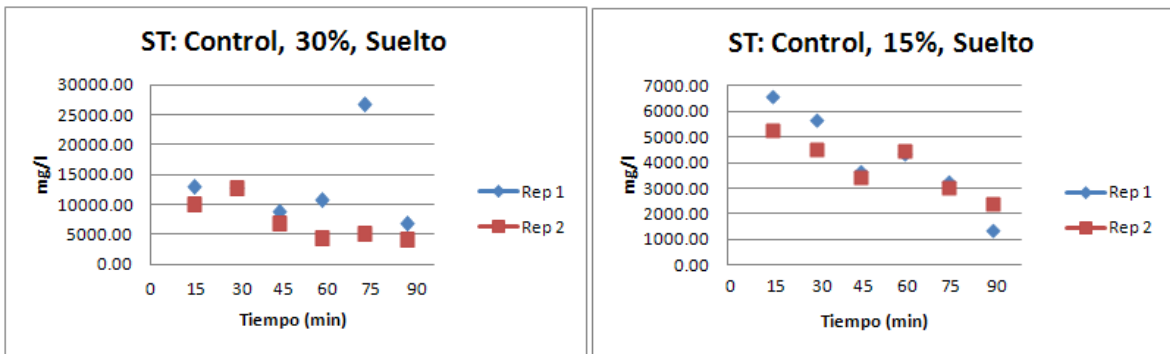


Ilustración 0-26 Gráficas sólidos totales: Evaluaciones control en suelo suelto

En la ilustración 5.3-4 se presentan los dos gráficos de las evaluaciones control, en este caso, en condición de suelo compactado.

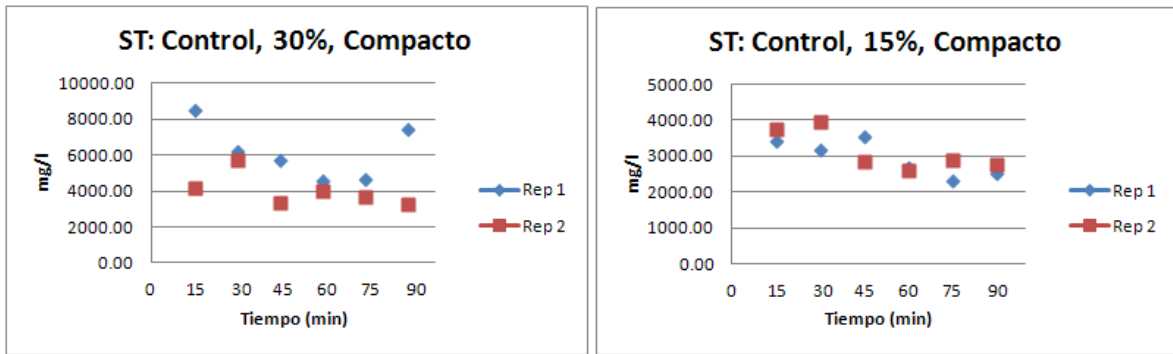


Ilustración 0-27 Gráficas sólidos totales: Evaluaciones control en suelo compacto

### 5.4. Factor P. práctica de conservación (RUSLE)

El desarrollo de experimentos que permitan el cálculo del factor P de práctica de conservación para la ecuación RUSLE favorece y fortalece las prácticas de planeamiento y diseño que promueven las Buenas Prácticas Agrícolas. Ya que optimiza la toma de decisiones en cuanto al diseño, disposición y aplicación de elementos para el control de la erosión de tipo barrera y otros.

Los resultados de los Factores P obtenidos para cada una de las evaluaciones de tratamiento estudiadas se presentan en la tabla 4.4-1. El gráfico presentado en la ilustración 5.4-1 describe los resultados promedio de las tres repeticiones desarrolladas para cada evaluación. Además en el gráfico se presenta la desviación estándar de cada promedio.

En promedio la carga de sedimentos calculada para las pruebas control en condición de suelo suelto y compacto, respectivamente, fue de 3366,5 g y 2542,7 g, obtenidos de las pruebas en pendiente 30%. En el caso de las pruebas control en pendiente de 15% la carga de sedimentos promedio fue de 1103,8 g (condición de suelo suelto) y 1409,9 g (condición de suelo compacto). A pesar de la dispersión de los datos (Ver Ilustraciones 4.3-1 al 4.3-6) la tendencia se mantiene en una tasa sedimentos superior para el grado de inclinación de 30%.

El factor P entra en juego en este aspecto ya que entre más erosiva sea la condición de estudio mayor podrá ser el cambio positivo, en términos de control de erosión, que una práctica pueda lograr. Como lo muestra la gráfica de la Ilustración 5.4-1 los dos tratamientos que promediaron valores de factor P menores se alcanzaron bajo condiciones de 30% de inclinación. Entre mayor sea la capacidad del elemento tipo barrera para el control de la erosión, menor será el

valor del factor P de práctica de conservación (Renard, Foster, Weesies, McDool, & Yoder, 1997).

Como se puede ver en la gráfica de la ilustración 5.4-1 el tratamiento que causó el mayor impacto como práctica de conservación del suelo es el saco de geotextil con relleno de Cemento y Arena, en la condición de 30% de pendiente y para suelo suelto, con un valor de P igual a 0,18. Mientras que el tratamiento que se promedia como menos efectivo con factor P igual a 0,84, es el de relleno de la mezcla Compost y Arena, en una inclinación de 30% y para suelo compactado a 2 Mpa de resistencia a la penetración.

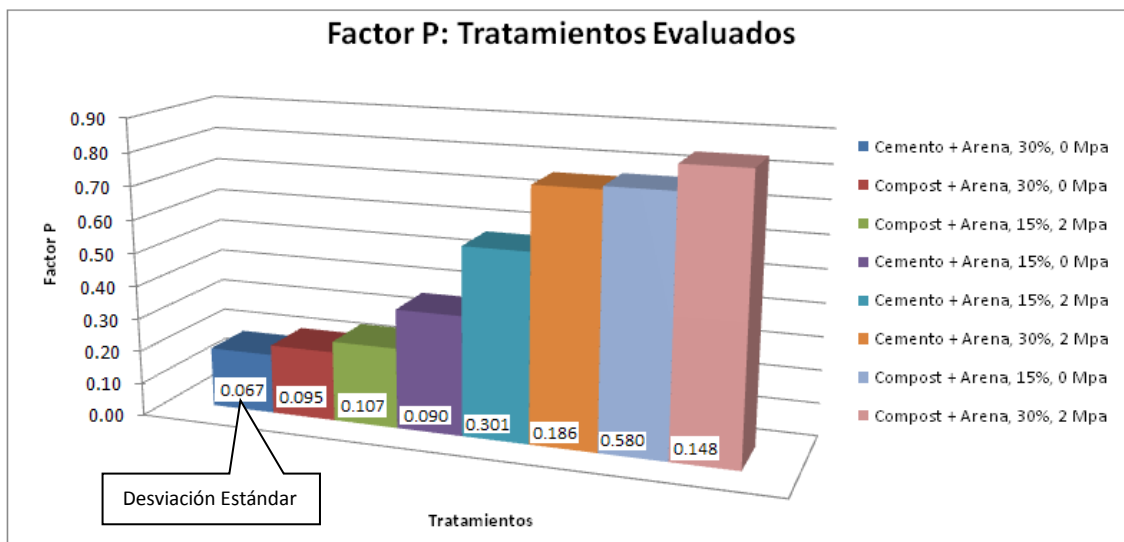


Ilustración 0-28 Factor P calculado por tratamiento evaluado

Para tratar de identificar una tendencia en los resultados del factor P se presenta la tabla 5.4-1. En esta tabla se encuentran en orden descendente los valores del factor P obtenidos para cada prueba realizada con cada repetición, no el promedio de repeticiones.

Lo primero que resalta es que los de resultados obtenidos 2 pruebas indicaron un factor P superior a 1, esto muestra que para estas pruebas el control ofreció menor recuento de sedimentos con respecto estos tratamientos específicos. Las dos pruebas que recolectaron estos datos son en tratamiento relleno con Compost y Arena, 15% de pendiente y 0 Mpa de resistencia a la compactación.

Este resultado puede ser ocasionado por algún problema o error humano que se diera específicamente en estas dos pruebas, ya que no es de esperar que presentaran mayor conteo de sedimentos que su equivalente control.

Esta tabla también muestra que las ocho pruebas que presentaron los valores de P más altos, pero inferiores a 1 se encuentran todas en condición de suelo compactado. Finalmente se puede notar que el resto de pruebas oscilan, sin ninguna tendencia en especial, entre un rango de 0,1 y 0,45 para el factor P.

Tabla 0-11 Resultado de factor P en orden descendiente

	Prueba	Factor P
Valores P entre 0,1 y 0,45	Cemento + Arena, 30%, 0 Mpa	0.10
	Compost + Arena, 15%, 0 Mpa	0.11
	Compost + Arena, 15%, 2 Mpa	0.12
	Compost + Arena, 30%, 0 Mpa	0.15
	Compost + Arena, 30%, 0 Mpa	0.16
	Cemento + Arena, 30%, 0 Mpa	0.20
	Cemento + Arena, 30%, 0 Mpa	0.25
	Cemento + Arena, 15%, 0 Mpa	0.27
	Cemento + Arena, 15%, 2 Mpa	0.28
	Compost + Arena, 15%, 2 Mpa	0.30
	Compost + Arena, 15%, 2 Mpa	0.31
	Compost + Arena, 30%, 0 Mpa	0.32
	Cemento + Arena, 15%, 0 Mpa	0.37
	Cemento + Arena, 15%, 0 Mpa	0.45
	Todas las evaluaciones son en suelo compacto	Cemento + Arena, 15%, 2 Mpa
Cemento + Arena, 30%, 2 Mpa		0.56
Compost + Arena, 30%, 2 Mpa		0.68
Cemento + Arena, 30%, 2 Mpa		0.77
Compost + Arena, 30%, 2 Mpa		0.88
Cemento + Arena, 15%, 2 Mpa		0.88
Cemento + Arena, 30%, 2 Mpa		0.93
Factor P > 1	Compost + Arena, 30%, 2 Mpa	0.97
	Compost + Arena, 15%, 0 Mpa	1.00
	Compost + Arena, 15%, 0 Mpa	1.20

¿Qué significan estos valores del Factor P? Para verificar los resultados obtenidos y confirmar su veracidad es importante compararlos con otros datos similares indicados por otros autores. Morgan (1997) registra valores de factor P iguales a 0,9 en condición de cultivo entre 12 y 15 grados de inclinación. Troed et al. (1999) indica que para condiciones de suelo descubierto, no específica inclinación, un factor P de 0,7. Mientras que Renard et al. describen en su guía de conservación de suelos de la RUSLE que la condición de suelo descubierto sin ninguna práctica de control de erosión debe tener un valor de factor P igual a uno.

En la tabla 2.1-2 que se presenta en la sección de Marco Teórico se indican valores de factor P para distintos tipos de manejo de suelo, en un rango de 0,2 a 0,85. Esta tabla especifica tres tipos de terrazas que registran valores de factor P entre 0,2 y 0,6. Estos valores de terrazas pueden ser comparables con los valores obtenidos para los tratamientos de sacos de geotextil.

Para lograr contrastar de manera más óptima los valores obtenidos en el presente estudio respecto a los valores indicados para estas terrazas se requeriría conocer las condiciones específicas de tipo de suelo, pendientes, compactación del suelo, parámetro de intensidad-duración de lluvia, entre otros.

Finalmente Toy y Foster (1998) recomiendan que para elementos como sacos de arena se puede emplear valores de factor P correspondientes a la barrera de sedimentos Silt Fence. En la tabla 2.1-3 se describen valores de factor P para cuatro prácticas de conservación y en tres condiciones de pendiente diferente. Para el caso específico de Silt Fence, este registra un factor P de 0,37 en condición de 10% a 15% de pendiente.

Varios de los resultados que se obtuvo en condición de 15% de inclinación para las evaluaciones de los sacos de geotextil, con los dos rellenos estudiados, dieron valores muy cercanos a 0,37. Esto da mayor seguridad de la veracidad de los datos obtenidos en este estudio.



# Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

---

## 6.1. Conclusiones

Se logró evaluar el efecto de emplear los sacos de geotextil como medida de control de erosión, estudiando las variables escorrentía y tasa de sedimentos.

Se concluye que el diseño experimental y de parcela de erosión simulan satisfactoriamente las condiciones de topografía escarpada y patrón de lluvia tropical propia de zonas con uso de suelo agrícola en Costa Rica.

Se demostró que los sacos de geotextil son significativamente eficientes en la reducción de sedimentos respecto al no uso de los sacos, para las condiciones de estudio. Logrando hasta un 90% en la reducción de sedimentos presentes en las muestras de escorrentía recolectadas.

Los tratamientos evaluados no indicaron una disminución significativa en el volumen de escorrentía recolectado respecto la condición control. A pesar de esto los sacos ofrecen retardo hidráulico respecto al flujo de agua favoreciendo el empozamiento de agua.

A pesar de que no se presentó una diferencia significativa entre la aplicación de los dos tipos de relleno empleados (Cemento+Arena y Compost+Arena), el resultado del análisis estadístico indica que en promedio el tratamiento de arena y cemento ofrece mejores resultados. Además, durante la ejecución de las pruebas se observó que los sacos con relleno de cemento y arena permiten que el agua fluya más rápidamente través de ellos, donde, en condiciones de alta pendiente esto es favorable ya que evita el desbordo del agua por sobre los sacos.

El factor "P" de práctica de control de erosión (RUSLE) para los sacos de geotextil (con relleno de Cemento+Arena y relleno de Compost+Arena) se encontró que fluctúa en un rango de 0,1 a 0,9, para las condiciones específicas del estudio.

El diseño de parcela de erosión, parámetro de lluvia y evaluaciones desarrolladas en este estudio sirven de base para el progreso de más investigación en el campo de las prácticas de conservación de suelo enfocadas a condiciones típicas de Costa Rica, asistiendo en la toma de decisiones en cuanto a diseño de obras de conservación de suelo más eficientes.

## 6.2.Recomendaciones

El siguiente escalón por alcanzar es el proceso que pasa de la experimentación con condiciones controladas en parcela de erosión hasta la utilización de la práctica de conservación de suelos en condiciones reales agrícolas. Para esto se recomienda primero desarrollar pruebas experimentales en campo. Luego de esto se debe pasar al siguiente peldaño la utilización real del producto, para esto la labor de extensión de la escuela de Ingeniería Agrícola es vital. La intervención de la escuela como ente mediador con el agricultor para que se fomente la prueba de las prácticas de conservación en condiciones reales, manteniendo un monitoreo constante. Para así alcanzar un nivel donde se tengan parámetros reales para el diseño conservacionista.

Un aspecto del diseño e instalación del muro de sacos de geotextil que indica el fabricante es la vegetación del mismo. Al vegetar el muro el sistema radicular de las plantas crece en el interior y a través de los sacos, proporcionando una mayor estabilidad estructural, además la vegetación que crece en la superficie otorga protección adicional. Por lo que se recomienda desarrollar pruebas donde se incorpore el factor vegetación en los sacos.

El factor económico no se encuentra dentro de los alcances de este proyecto, por lo cual se recomienda darle continuidad a este aspecto analizando el factor Costo-Beneficio que puede tener esta práctica de conservación al ser aplicada en condiciones reales.

Para pruebas futuras que tomen de base este estudio se recomienda variar el sistema de drenaje aumentando el diámetro de los drenajes que se encuentran en las Unidades de Suelo Portátil empleadas en la estructura de parcela de erosión. Esto permitiría facilitar la infiltración del agua reduciendo el desborde por sobre los sacos.

# Capítulo 7. Bibliografía

---

## Bibliografía

- Adekalu, K., Okunade, D., & Osunbitan, J. (2006). Compaction and mulching effects on soil loss and runoff from two southwestern Nigeria agricultural soils. *Elsevier B.V.*, 226-230.
- Agrecol Corporation. (2006). *Envirolok*. Recuperado el 3 de 3 de 2012, de [http://aspent.com/assets/erosion\\_control/envirolok/\\_BagMaterials.pdf](http://aspent.com/assets/erosion_control/envirolok/_BagMaterials.pdf)
- Agrecol Corporation. (2007). *Envirolok*. Recuperado el 3 de 3 de 2012, de Components of the Wall: [http://aspent.com/assets/erosion\\_control/envirolok/\\_EnvirolokComponents.pdf](http://aspent.com/assets/erosion_control/envirolok/_EnvirolokComponents.pdf)
- Agrecol Corporation. (2009). *Envirolok*. Recuperado el 3 de 3 de 2012, de Wall-Bulding Instructions: <http://www.patiotown.com/sites/default/files/files/envirolok-wall-building.pdf>
- Babcock, D. L. (2008). *Performance of Mulches and Polyacrylamide for Erosion Control and Vegetative Establishment*. North Carolina State University, Soil Science. Raleigh, North Carolina: North Carolina State University.
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management - a review. *Soil Use and Management*, 335-345.
- Baver, L., & Gardner, W. (1972). *Soil phisical*. Mexico: Centro Regional de Ayuda Técnica.
- Beighley, E. R. (2008). Evaluation Results from the Soil Erosion Reseach Laboratory San Diego State University for Gator Guard Enviromental Products Inc, Sediment Treatment Product (Gator Guard).
- Cobos, D. R., & Chambers, C. (2010). *Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensors*. Recuperado el 3 de Marzo de 2012, de Decagon Devices: <http://www.decagon.com/assets/Uploads/13393-04-CalibratingECH2OSoilMoistureProbes.pdf>
- Dabney, S. M., McGregor, K. C., Wilson, G. V., & Cullum, R. F. (January - February de 2009). How Management of Grass Hedges Affects their Erosion Reduction Potential. *Soil and Water Management and Conservation*, 73(1), 241 - 254.
- Durán, Z. V., Rodríguez, P. C., Martín, P. F., Graaff, J. d., Martínez, F. J., & Flanagan, D. (2011). Enviromental impact of introducing plant covers in the taluses of terraces: Implications for mitigating agricultural soil erosion and runoff. *Elsevier*, 79-88.
- Eswaran, H., Lal, R., & Reich, P. (2001). *USDA Natural Resources Conservation Service*. Recuperado el 08 de 04 de 2012, de <http://soils.usda.gov/use/worldsoils/papers/land-degradation-overview.html>

- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1989). *Evaluación de los estados de la erosión hídrica de los suelos de Costa Rica*. Roma: IT, FAO.
- Faucette, L., Governo, J., Tyler, R., Gigley, G., Jordan, C., & Lockaby, B. (2009, Febrero). Performance of compost filter socks and conventional sediment control barriers used for perimeter control on construction sites. *Soil and Water Conservation*, 64(1), 81-88.
- Hatley, D., Wiltshire, J., Basford, B., Royale, S., Buckley, D., & Johnson, P. (2005). *Soil compaction and potato crops*. Oxford, U.K.: British Potato Council.
- JASEC. (2004). *Junta Administrativa de Servicios Eléctricos de Cartago*. Recuperado el 8 de 3 de 2012, de Manejo de Cuencas Hidrográficas: [http://www.jasec.co.cr/ambiente/manejo\\_cuencas.html](http://www.jasec.co.cr/ambiente/manejo_cuencas.html)
- Koolen, A., & Kuipers, H. (1983). *Agricultural Soil Mechanics*. Berlin Heidelberg New York Tokio: Springer-Verlag.
- Lundekvam, H., & Skoien, S. (1998). Soil erosion in Norway. An overview of measurements from soil loss plots. *Soil Use and Management*, 84-89.
- Magdoff, F. (2000). *Building Soils for Better Crops*. United States: Sustainable Agriculture Network.
- Mijares, A. F. (1999). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico: Limusa.
- Misra, R., & Rose, C. (1995). An Examination of the Relationship between Erodibility Parameters and Soil Strength. *Australian Journal of Soil Research*, 715-32.
- Morgan, R. (1997). *Erosión y Conservación del Suelo*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Multiquip Inc. (1998). *Soil Compaction Handbook*. Recuperado el 12 de 04 de 2012, de [http://www.concrete-catalog.com/soil\\_compaction.html](http://www.concrete-catalog.com/soil_compaction.html)
- Natural Resources Conservation Service. (1993). *Soil Survey Manual Instructions*. Recuperado el 3 de 3 de 2012, de [ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil\\_Survey\\_Manual/pdf/SSM.pdf](ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Survey_Manual/pdf/SSM.pdf)
- NRCS. (1996a). *Soil Quality Resource Concern: Compaction*. Washington, D.C.: USDA Natural Resources Conservation Service.
- NRCS. (1996b). *Soil Quality Resource Concerns: Soil Erosion*. Washington, D.C.: USDA Natural Resource Conservation Service.
- NRCS. (2001a). *Rangeland Soil Quality: Compaction*. Washington D.C.: USDA Natural Resources Conservation Service.
- NRCS. (2001b). *Rangeland Soil Quality: Water Erosion*. Washington D.C.: USDA Natural Resources Conservation Service.

- Oldeman, L. (1994). The global extent of soil degradation. En D. J. Greenland, & I. Szabolcs (Ed.), *Soil Resilience and Sustainable Land Use* (págs. 99-118). Netherlands.: CAB International, Wallingford.
- Programa Estado de la Nación. (2007). *Decimotercer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Capítulo 4: Armonía con la naturaleza*. San José: Programa Estado de la Nación.
- Quirós, O. (2002). *Departamento de Agricultura Conservacionista*. Recuperado el 28 de 05 de 2012, de Ministerio de Agricultura y Ganadería:  
[http://www.infoagro.go.cr/organico/19.Conservacion\\_suelo.htm](http://www.infoagro.go.cr/organico/19.Conservacion_suelo.htm)
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McDool, D., & Yoder, D. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water. A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agricultural Handbook 703, USDA-ARS.
- Renard, K., Yoder, D., Lightle, D., & Dabney, S. (2011). *USDA United States Department of Agriculture*. (R. Morgan, & M. Nearing, Edits.) Recuperado el 24 de 4 de 2012, de <http://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDFfiles/2122.pdf>
- Smith, D., & Whitt, D. (1947). Estimating Soil Losses from Field Ares of Claypan Soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, 485-490.
- Soil Survey Division Staff. (1993). *Soil Survey Manual*. Washington D.C.: Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- Teh, S. H. (2011). *Soil Erosion Modeling Using RUSLE and GIS on Cameron Highlands, Malaysia for Hydropower Development*. University of Iceland: Masters, Thesis. The School for Renewable Energy Science.
- Toy, J., & Foster, G. (Agosto de 1998). *Guidelines for the Use of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Version 1.06 on Mined Lnads, Construction Sites, and Reclaimed Lands*. Denver: J. R. Galetovic.
- TRI Environmental, Inc. (2007). *Erosion and Sediment Control Testing of Erosion Control Products at TRI Environmental, Inc*. Texas: TRI Environmental, Inc. A Texas Research International Company.
- Troeh, F., Hobbs, J., & Donahue, R. (1999). *Soil and Water Conservation: Productivity and Environment Protection*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Vahrson, W.-G. (1992). Distribución Espacial de los Periodos de Retorno de Tres Eventos de Lluvia Extremos en Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 193-207.
- Vahrson, W.-G., & Dercksen, P. (1990). Intensidades Críticas de Lluvai para el Diseño de Obras de Conservación de Suelos en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 141-149.
- Vargas, F. (2010). *Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río*

*Birris, Costa Rica.* Turrialba: Tesis de Maestría, CATIE Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses.* USDA Agricultural Research Service Handbook 537.

# Capítulo 8. Anexos

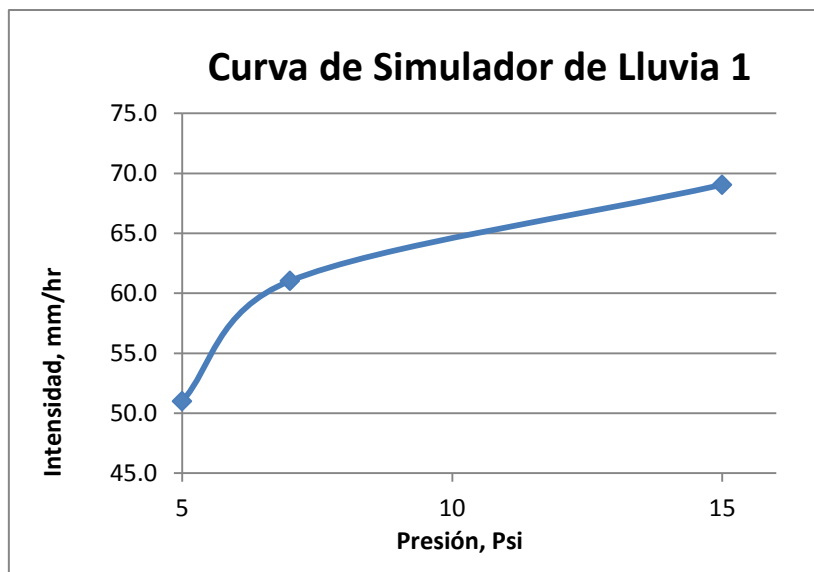
## 8.1. Simulador de lluvia

Se realizan pruebas para conocer la capacidad de los simuladores de lluvia y calibrar su aplicación a la lectura marcada por el manómetro. En la siguiente tabla se presenta la aplicación de la lámina de lluvia en mm/hr para las presiones evaluadas en el simulador 1. El simulador 1 es el empleado en las parcelas de erosión 1 y 2 (Suelo con resistencia a la penetración cercana a cero)

Tabla 0-1 Evaluación de simulador de lluvia 1

Intensidad de Aplicación (mm/hr)			
Posición	Presiones de Trabajo (Psi)		
	5	7	15
A1	43.4	51.8	55.1
A2	56.8	65.6	70.1
A3	53.4	66.3	66.1
A4	55.4	53.9	54.1
B1	50.1	56.6	68.1
B2	56.8	76.7	93.1
B3	60.1	79.4	91.1
B4	44.1	57.3	61.1
C1	49.4	57.3	70.1
C2	56.1	77.4	91.1
C3	60.1	78.0	88.1
C4	52.7	57.3	60.1
D1	16.7	42.8	49.1
D2	61.4	57.3	63.1
D3	66.8	58.0	64.1
D4	32.7	40.7	60.3
Promedio	51.0	61.0	69.1
Desv. Est.	12.3	12.0	14.2

Del promedio de aplicación para las tres presiones evaluadas se presenta la siguiente curva de calibración para el simulador de lluvia 1.



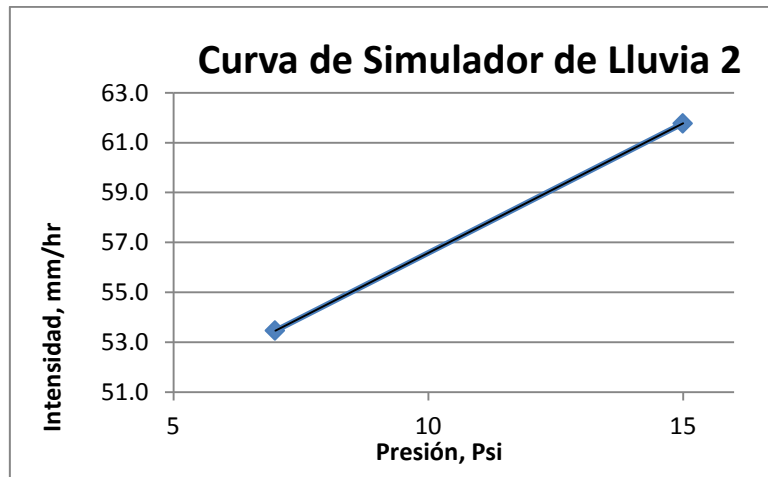
**Ilustración 0-1 Comportamiento de simulador de lluvia 1**

De igual forma, se obtiene la tabla 8.1-2 de presiones e intensidad de aplicación para el simulador de lluvia 2. El simulador de lluvia 2 es el empleado en la parcela de erosión 3 (Suelo con resistencia a la compactación cercana a 2 Mpa). En la evaluación del simulador de lluvia 2 se valoran dos presiones de trabajo, la curva de calibración para este simulador se presenta en la ilustración 8.1-2.

**Tabla 0-2 Evaluación de simulador de lluvia 2**

Posición	Intensidad de Aplicación (mm/hr)	
	Presiones de Trabajo (Psi)	
	7	15
A1	70.9	57.1
A2	54.7	59.1
A3	46.2	62.1
A4	62.4	54.1
B1	59.3	55.1
B2	48.5	68.1
B3	43.9	70.1
B4	53.2	59.1
C1	60.1	54.1
C2	47.0	66.1
C3	55.5	74.1
C4	64.7	70.1
D1	21.6	48.1
D2	63.9	59.1
D3	40.3	67.1
D4	63.2	65.1
Promedio	53.5	61.8
Dev. Est.	12.1	7.2





**Ilustración 0-2 Comportamiento de simulador de lluvia 2**

A continuación se presenta el resultado del análisis estadístico de varianza desarrollado para comparar la aplicación que ofrecen ambos simuladores de lluvia. Se puede ver que la diferencia de aplicación no es significativamente diferente (para  $p = 0,05$ ).

**Tabla 0-3 Análisis de varianza de simuladores de lluvia**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
<b>Presión 15 Psi</b>	32	0.10	0.07	17.21

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	421.95	1	421.95	3.33	0.0781
Simulador	421.95	1	421.95	3.33	0.0781
Error	3802.84	30	126.76		
Total	4224.79	31			

**Test : Tukey Alfa: 0.05 DMS: 8.12888**

Error: 126.7612 gl: 30

Simulador	Medias	n
2.00	61.79	16
1.00	69.05	16

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
<b>Presión 7 Psi</b>	32	0.10	0.06	21.04

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC Tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor p
Modelo	457.53	1	457.53	3.15	0.0858
Simulador	457.53	1	457.53	3.15	0.0858
Error	4350.67	30	145.02		
Total	4808.20	31			

**Test : Tukey Alfa: 0.05 DMS: 8.69470**

Error: 145.0223 gl: 30

Simulador	Medias	n
2.00	53.46	16
1.00	61.03	16

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ )

## 8.2. Calibración de sensores de humedad

Los sensores de humedad decágona ECH<sub>2</sub>O-10 son calibrados para mejorar la precisión de los datos recolectados. Para la calibración se sigue el procedimiento indicado por el fabricante. (Cobos & Chambers, 2010).

Como se describe en el capítulo Métodos y Materiales, el tipo de suelo empleado es Franco Arenoso. Se recolecta una muestra homogenizada, tamizada y seca para la calibración. De la muestra de suelo se toman cantidades iguales a las cuáles se les aplica agua de 50 en 50 ml. En la siguiente tabla se presentan los resultados de las lecturas obtenidas por tres sensores empleados para la calibración.

Tabla 0-4 Primer paso calibración de sensores

Agua Aplicada (ml)*	Contenido Volumétrico de Agua (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )			Promedio de Lecturas	Desviación Estándar
	Sensor 10HS #1	Sensor 10HS #2	Sensor 10HS#3		
0	-0.023820	-0.034706	-0.027662	-0.028729	0.005521
50	-0.017417	-0.024460	-0.027022	-0.022966	0.004974
100	-0.003330	-0.014856	-0.001409	-0.006532	0.007273
150	0.264327	0.263046	0.213101	0.246825	0.029213
200	0.290580	0.273292	0.282256	0.282043	0.008646
250	0.434654	0.385989	0.418646	0.413096	0.024803
300	0.452263	0.430812	0.435615	0.439563	0.011257
100% Agua	0.482679	0.459627	0.469872	0.470726	0.011550

\*Agua aplicada a muestras de 1000g de suelo seco naturalmente.

De las muestras tomadas se obtiene el contenido de Humedad, en porcentaje, para cada cantidad de agua aplicada en la calibración, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 0-5 Segundo paso calibración de sensores

Peso R (g)	Peso SH + R (g)	Peso SS + R (g)	% CH	CVA (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Lectura Sensor
18	196	188	4.705882	0.000000	-0.028729
17	164	152	8.888889	0.081433	-0.022966
20	158	142	13.114754	0.162866	-0.006532
18	210	176	21.518987	0.244300	0.246825
22	212	178	21.794872	0.325733	0.282043
16	254	206	25.263158	0.407166	0.413096
20	252	198	30.337079	0.488599	0.439563

R: Recipiente  
 SH + R: Suelo Húmedo + Recipiente  
 SS + R: Suelo Seco + Recipiente  
 CH: Contenido de Humedad ((SH+R) - (SS+R))\*100/((SS+R) - (R))  
 CVA: Contenido Volumétrico de Agua (Volumen Agua aplicada / Volumen Suelo, Agua, Espacio Vacío)

Finalmente se grafica el contenido de Humedad en Porcentaje versus el promedio de lectura de los tres sensores evaluados. La gráfica obtenida se presenta a continuación. La ecuación de calibración específica para el suelo analizado es:

Ecuación 0-1 Calibración sensores

$$Y = 43,262 * X + 9,7679$$

Donde:

Y = % Contenido de Humedad en Suelo.

X = Lectura de Sensor.

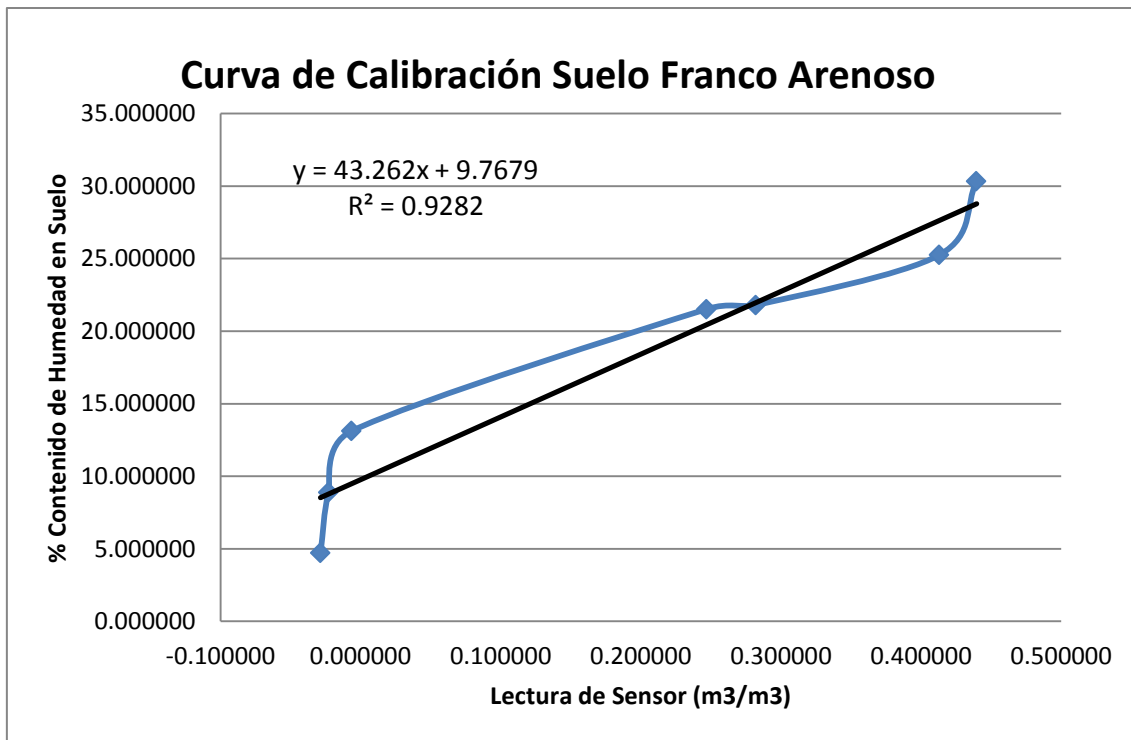


Ilustración 0-3 Curva de calibración sensores. Suelo franco arenoso.

### 8.3. Datos completos de las evaluaciones

En esta sección se detallan los resultados obtenidos en cuanto a recolección de escorrentía cada 15 minutos y los datos obtenidos de la toma de muestras para la medición de concentración en miligramos de sólidos por litro de fluido.

En las tablas de la 8.3-1 a la 8.3-32 se presentan los datos obtenidos de las 32 evaluaciones realizadas. Cada tabla presenta los resultados en los períodos de estudio de 15 minutos. La concentración de sólidos totales se obtiene según la ecuación 3.7-1 de la metodología.

Tabla 0-6 Tratamiento Compost + Arena, 30%, 0 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	1						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Solidos(g)	Concentración Solidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escoorrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	2.674	2.830	3120				
50		1B	2.671	2.841	3396				
50	15	1C	2.696	2.828	2646	3054.00	31	94.67	
50		2A	2.682	2.786	2066				
50		2B	2.677	2.794	2342				
50	30	2C	2.665	2.786	2410	2272.67	43	97.72	
60		3A	2.681	2.740	1180				
60		3B	2.672	2.765	1876				
60	45	3C	2.681	2.755	1490	1515.33	51	77.28	
60		4A	2.703	2.781	1568				
60		4B	2.701	2.770	1370				
60	60	4C	2.687	2.781	1880	1606.00	56	89.94	
70		5A	2.734	2.776	850				
70		5B	2.694	2.773	1584				
70	75	5C	2.711	2.784	1448	1294.00	57	73.76	
70		6A	2.718	2.800	1654				
70		6B	2.688	2.791	2052				
70	90	6C	2.676	2.779	2058	1921.33	63	121.04	
<b>Total</b>								<b>301</b>	<b>554.42</b>

Tabla 0-7 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 0 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición							
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Solidos(g)	Concentración Solidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	2.636	2.827	3812				
50		1B	2.664	2.900	4724				
50	15	1C	2.636	2.842	4132	4222.67	44	185.80	
50		2A	2.683	2.858	3502				
50		2B	2.676	2.879	4048				
50	30	2C	2.655	2.831	3506	3685.33	57	210.06	
60		3A	2.653	2.776	2464				
60		3B	2.670	2.809	2772				
60	45	3C	2.644	2.800	3110	2782.00	61	169.70	
60		4A	2.674	2.791	2346				
60		4B	2.668	2.820	3040				
60	60	4C	2.652	2.766	2268	2551.33	66	168.39	
70		5A	2.655	2.752	1944				
70		5B	2.669	2.766	1936				
70	75	5C	2.644	2.768	2466	2115.33	66	139.61	
70		6A	2.643	2.771	2562				
70		6B	2.669	2.816	2956				
70	90	6C	2.637	2.797	3192	2903.33	70	203.23	
<b>Total</b>								<b>364</b>	<b>1076.80</b>

Tabla 0-8 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 0 Mpa, R3

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición							
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Solidos(g)	Concentración Solidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	2.830	3.045	4290				
50		1B	2.841	3.065	4474				
50	15	1C	2.828	3.056	4566	4443.33	7	31.10	
50		2A	2.786	2.916	2604				
50		2B	2.794	2.943	2976				
50	30	2C	2.786	2.931	2898	2826.00	34	96.08	
60		3A	2.740	2.836	1932				
60		3B	2.765	2.858	1856				
60	45	3C	2.755	2.840	1702	1830.00	53	96.99	
60		4A	2.781	2.870	1770				
60		4B	2.770	2.870	1996				
60	60	4C	2.781	2.865	1680	1815.33	60	108.92	
70		5A	2.776	2.843	1332				
70		5B	2.773	2.842	1378				
70	75	5C	2.784	2.857	1472	1394.00	68	94.79	
70		6A	2.800	2.859	1172				
70		6B	2.791	2.850	1196				
70	90	6C	2.779	2.839	1188	1185.33	69	81.79	
<b>Total</b>								<b>291</b>	<b>509.68</b>

Tabla 0-9 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 0 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	1					
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Solidos(g)	Concentración Solidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)
50		1A	2.744	2.909	3298			
50		1B	2.769	3.033	5288			
50	15	1C	2.743	2.979	4710	4432.00	56	248.19
50		2A	2.751	2.917	3316			
50		2B	2.762	2.976	4286			
50	30	2C	2.743	2.970	4540	4047.33	63	254.98
60		3A	2.707	2.855	2954			
60		3B	2.736	2.939	4058			
60	45	3C	2.706	2.918	4240	3750.67	66	247.54
60		4A	2.720	2.847	2542			
60		4B	2.731	2.996	5296			
60	60	4C	2.701	2.911	4214	4017.33	66	265.14
70		5A	2.700	2.843	2866			
70		5B	2.752	2.934	3638			
70	75	5C	2.719	2.900	3620	3374.67	73	246.35
70		6A	2.712	2.748	716			
70		6B	2.746	2.798	1032			
70	90	6C	2.728	2.772	888	878.67	66	57.99
<b>Total</b>							<b>390</b>	<b>1320.20</b>



Tabla 0-10 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 0 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	2					
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Solidos(g)	Concentración Solidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)
50		1A	3.071	3.259	3748			
50		1B	3.213	3.433	4400			
50	15	1C	3.161	3.435	5472	4540.00	12	54.48
50		2A	3.022	3.094	1446			
50		2B	3.145	3.208	1276			
50	30	2C	3.131	3.210	1598	1440.00	16	23.04
60		3A	2.842	2.889	936			
60		3B	2.914	2.951	730			
60	45	3C	2.914	2.959	902	856.00	16	13.70
60		4A	2.925	2.957	630			
60		4B	2.998	3.031	666			
60	60	4C	2.983	3.017	668	654.67	15	9.82
70		5A	2.879	2.908	574			
70		5B	2.928	2.969	812			
70	75	5C	2.966	3.003	744	710.00	11	7.81
70		6A	2.876	2.899	456			
70		6B	2.896	2.925	592			
70	90	6C	2.864	2.903	784	610.67	12	7.33
<b>Total</b>							<b>82</b>	<b>116.17</b>

Tabla 0-11 Datos: Tratamiento Compost Arena, 15%, 0 Mpa, R3

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición							
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Solidos(g)	Concentración Solidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	2.909	3.094	3700				
50		1B	3.033	3.283	4994				
50	15	1C	2.979	3.263	5692	4795.33	42	201.40	
50		2A	2.917	3.197	5600				
50		2B	2.976	3.431	9088				
50	30	2C	2.970	3.353	7664	7450.67	61	454.49	
60		3A	2.855	2.930	1506				
60		3B	2.939	3.031	1848				
60	45	3C	2.918	3.066	2956	2103.33	66	138.82	
60		4A	2.847	2.935	1764				
60		4B	2.996	3.109	2270				
60	60	4C	2.911	3.021	2196	2076.67	66	137.06	
70		5A	2.843	2.905	1232				
70		5B	2.934	3.058	2480				
70	75	5C	2.900	3.032	2636	2116.00	66	139.66	
70		6A	2.748	2.770	446				
70		6B	2.798	2.820	430				
70	90	6C	2.772	2.790	356	410.67	67	27.51	
<b>Total</b>								<b>368</b>	<b>1098.95</b>

Tabla 0-12 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 0 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	1						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Solidos(g)	Concentración Solidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentia (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	2.827	3.118	5834				
50		1B	2.900	3.243	6860				
50		1C	2.842	3.089	4928	5874.00	41	240.83	
50	30	2A	2.858	3.045	3742				
50		2B	2.879	3.104	4502				
50		2C	2.831	3.049	4370	4204.67	75	315.35	
60	45	3A	2.776	2.913	2738				
60		3B	2.809	2.921	2236				
60		3C	2.800	2.908	2168	2380.67	49	116.65	
60	60	4A	2.791	2.922	2624				
60		4B	2.820	2.936	2328				
60		4C	2.766	2.881	2298	2416.67	16	38.67	
70	75	5A	2.752	2.870	2368				
70		5B	2.766	2.917	3014				
70		5C	2.768	2.936	3374	2918.67	4	11.67	
70	90	6A	2.771	2.864	1858				
70		6B	2.816	2.923	2126				
70		6C	2.797	2.895	1970	1984.67	67	132.97	
<b>Total</b>								<b>252</b>	<b>856.15</b>

Tabla 0-13 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 0 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	2					
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)
50	15	1A	3.045	3.193	2968			
50		1B	3.065	3.252	3742			
50		1C	3.056	3.230	3480	3396.67	26	88.31
50	30	2A	2.916	2.982	1320			
50		2B	2.943	3.020	1540			
50		2C	2.931	3.020	1780	1546.67	24	37.12
60	45	3A	2.836	2.883	922			
60		3B	2.858	2.912	1082			
60		3C	2.840	2.903	1264	1089.33	26	28.32
60	60	4A	2.870	2.995	2508			
60		4B	2.870	3.073	4072			
60		4C	2.865	3.093	4574	3718.00	33	122.69
70	75	5A	2.843	2.921	1560			
70		5B	2.842	2.951	2172			
70		5C	2.857	2.966	2184	1972.00	23	45.36
70	90	6A	2.859	2.873	276			
70		6B	2.850	2.866	308			
70		6C	2.839	2.853	292	292.00	17	4.96
<b>Total</b>							<b>149</b>	<b>326.77</b>

Tabla 0-14 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 0 Mpa, R3

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	3			Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)			
50	15	1A	3.118	3.234	2316			
50		1B	3.243	3.450	4126			
50		1C	3.089	3.261	3448	3296.67	53	174.72
50	30	2A	3.045	3.138	1852			
50		2B	3.104	3.256	3050			
50		2C	3.049	3.213	3268	2723.33	53	144.34
60	45	3A	2.913	2.985	1424			
60		3B	2.921	3.029	2176			
60		3C	2.908	2.997	1776	1792.00	59	105.73
60	60	4A	2.922	3.001	1572			
60		4B	2.936	3.033	1928			
60		4C	2.881	2.991	2204	1901.33	59	112.18
70	75	5A	2.870	2.935	1302			
70		5B	2.917	2.995	1566			
70		5C	2.936	3.023	1738	1535.33	48	73.70
70	90	6A	2.864	2.896	644			
70		6B	2.923	2.957	692			
70		6C	2.895	2.959	1266	867.33	57	49.44
<b>Total</b>							<b>329</b>	<b>660.10</b>

Tabla 0-15 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 0 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	1						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escorrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	2.683	2.844	3218				
50		1B	2.683	2.888	4104				
50		1C	2.677	2.871	3884	3735.33	18	67.24	
50	30	2A	2.656	2.843	3748				
50		2B	2.661	2.907	4930				
50		2C	2.655	2.891	4714	4464.00	22	98.21	
60	45	3A	2.664	2.758	1870				
60		3B	2.666	2.786	2400				
60		3C	2.661	2.774	2264	2178.00	27	58.81	
60	60	4A	2.719	2.818	1992				
60		4B	2.713	2.852	2772				
60		4C	2.697	2.840	2860	2541.33	28	71.16	
70	75	5A	2.698	2.786	1772				
70		5B	2.719	2.809	1818				
70		5C	2.735	2.842	2128	1906.00	27	51.46	
70	90	6A	2.756	2.850	1876				
70		6B	2.751	2.866	2300				
70		6C	2.722	2.839	2342	2172.67	30	65.18	
<b>Total</b>								<b>152</b>	<b>412.05</b>

Tabla 0-16 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 0 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	2						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	2.647	2.744	1928				
50		1B	2.679	2.769	1796				
50		1C	2.652	2.743	1826	1850.00	41	75.85	
50	30	2A	2.677	2.751	1492				
50		2B	2.692	2.762	1396				
50		2C	2.640	2.743	2054	1647.33	57	93.90	
60	45	3A	2.664	2.707	874				
60		3B	2.672	2.736	1288				
60		3C	2.640	2.706	1324	1162.00	61	70.88	
60	60	4A	2.677	2.720	862				
60		4B	2.672	2.731	1182				
60		4C	2.645	2.701	1114	1052.67	63	66.32	
70	75	5A	2.658	2.700	842				
70		5B	2.669	2.752	1674				
70		5C	2.646	2.719	1466	1327.33	68	90.26	
70	90	6A	2.650	2.712	1248				
70		6B	2.685	2.751	1314				
70		6C	2.648	2.728	1592	1384.67	69	95.54	
<b>Total</b>								<b>359</b>	<b>492.75</b>

Tabla 0-17 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 0 Mpa, R3

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	3						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	2.844	3.071	4550				
50		1B	2.888	3.213	6504				
50		1C	2.871	3.161	5808	5620.67	19	106.79	
50	30	2A	2.843	3.022	3572				
50		2B	2.907	3.145	4744				
50		2C	2.891	3.131	4794	4370.00	18	78.66	
60	45	3A	2.758	2.842	1696				
60		3B	2.786	2.914	2562				
60		3C	2.774	2.914	2792	2350.00	18	42.30	
60	60	4A	2.818	2.925	2136				
60		4B	2.852	2.998	2912				
60		4C	2.840	2.983	2858	2635.33	14	36.89	
70	75	5A	2.786	2.879	1848				
70		5B	2.809	2.928	2380				
70		5C	2.842	2.966	2478	2235.33	9	20.12	
70	90	6A	2.850	2.876	538				
70		6B	2.866	2.896	600				
70		6C	2.839	2.864	488	542.00	19	10.30	
<b>Total</b>								<b>97</b>	<b>295.06</b>



Tabla 0-18 Datos: Control, 30%, 0 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	1						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	3.536	4.043	10156				
50		1B	3.796	4.538	14848				
50		1C	3.785	4.476	13826	12943.33	49	634.22	
50	30	2A	3.336	3.810	9480				
50		2B	3.516	4.243	14542				
50		2C	3.510	4.234	14498	12840.00	54	693.36	
60	45	3A	3.041	3.405	7278				
60		3B	3.156	3.639	9670				
60		3C	3.149	3.630	9632	8860.00	63	558.18	
60	60	4A	3.132	3.519	7750				
60		4B	3.275	3.931	13124				
60		4C	3.254	3.834	11610	10828.00	55	595.54	
70	75	5A	3.060	4.077	20332				
70		5B	3.131	4.619	29764				
70		5C	3.174	4.687	30252	26782.67	45	1205.22	
70	90	6A	2.980	3.226	4934				
70		6B	3.012	3.440	8572				
70		6C	2.944	3.296	7042	6849.33	60	410.96	
<b>Total</b>								<b>326</b>	<b>4097.48</b>

Tabla 0-19 Datos: Control, 30%, 0 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	2					
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)
50	15	1A	3.338	3.722	7678			
50		1B	3.533	4.105	11434			
50		1C	3.562	4.129	11334	10148.67	49	497.28
50	30	2A	3.401	3.860	9174			
50		2B	3.665	4.430	15288			
50		2C	3.593	4.269	13526	12662.67	63	797.75
60	45	3A	3.074	3.316	4828			
60		3B	3.219	3.623	8076			
60		3C	3.250	3.617	7334	6746.00	66	445.24
60	60	4A	3.124	3.284	3198			
60		4B	3.334	3.582	4956			
60		4C	3.277	3.511	4686	4280.00	64	273.92
70	75	5A	3.043	3.263	4408			
70		5B	3.192	3.496	6074			
70		5C	3.214	3.463	4978	5153.33	67	345.27
70	90	6A	2.885	3.050	3312			
70		6B	2.946	3.167	4404			
70		6C	2.914	3.137	4460	4058.67	68	275.99
<b>Total</b>							<b>377</b>	<b>2635.45</b>

Tabla 0-20 Datos: Control, 15%, 0 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	1						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	3.259	3.536	5540				
50		1B	3.433	3.796	7248				
50		1C	3.435	3.785	6992	6593.33	15	98.90	
50	30	2A	3.094	3.336	4838				
50		2B	3.208	3.516	6156				
50		2C	3.210	3.510	5982	5658.67	34	192.39	
60	45	3A	2.889	3.041	3034				
60		3B	2.951	3.156	4102				
60		3C	2.959	3.149	3794	3643.33	53	193.10	
60	60	4A	2.957	3.132	3500				
60		4B	3.031	3.275	4872				
60		4C	3.017	3.254	4744	4372.00	53	231.72	
70	75	5A	2.908	3.060	3052				
70		5B	2.969	3.131	3238				
70		5C	3.003	3.174	3432	3240.67	54	175.00	
70	90	6A	2.899	2.980	1606				
70		6B	2.925	3.012	1728				
70		6C	2.903	2.944	812	1382.00	51	70.48	
<b>Total</b>								<b>260</b>	<b>961.59</b>

Tabla 0-21 Datos: Control, 15%, 0 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	2						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	3.094	3.338	4880				
50		1B	3.283	3.533	4996				
50		1C	3.263	3.562	5968	5281.33	44	232.38	
50	30	2A	3.197	3.401	4072				
50		2B	3.431	3.665	4686				
50		2C	3.353	3.593	4798	4518.67	54	244.01	
60	45	3A	2.930	3.074	2878				
60		3B	3.031	3.219	3756				
60		3C	3.066	3.250	3686	3440.00	57	196.08	
60	60	4A	2.935	3.124	3782				
60		4B	3.109	3.334	4498				
60		4C	3.021	3.277	5106	4462.00	57	254.33	
70	75	5A	2.905	3.043	2756				
70		5B	3.058	3.192	2682				
70		5C	3.032	3.214	3632	3023.33	59	178.38	
70	90	6A	2.770	2.885	2282				
70		6B	2.820	2.946	2536				
70		6C	2.790	2.914	2468	2428.67	58	140.86	
<b>Total</b>								<b>329</b>	<b>1246.04</b>

Tabla 0-22 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 2 Mpa, R1

Simulación	Muestreo	Repetición							
lluvia	Tiempo								
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía L c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	2.698	2.963	5300				
50	15	1B	2.674	3.061	7744				
50	15	1C	2.689	3.034	6908	6650.67	51	339.18	
50	30	2A	2.668	2.961	5866				
50	30	2B	2.669	3.103	8690				
50	30	2C	2.659	3.018	7170	7242.00	65	470.73	
60	45	3A	2.680	2.889	4188				
60	45	3B	2.696	3.002	6130				
60	45	3C	2.676	2.982	6128	5482.00	87	476.93	
60	60	4A	2.661	2.858	3954				
60	60	4B	2.684	2.952	5352				
60	60	4C	2.647	2.929	5646	4984.00	93	463.51	
70	75	5A	2.639	2.828	3762				
70	75	5B	2.680	2.928	4970				
70	75	5C	2.665	2.886	4432	4388.00	94	412.47	
70	90	6A	2.693	2.819	2534				
70	90	6B	2.686	2.867	3630				
70	90	6C	2.658	2.814	3124	3096.00	95	294.12	
<b>Total</b>								<b>485</b>	<b>2456.95</b>

Tabla 0-23 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 2 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	2						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escoorrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	2.963	3.177	4276				
50	15	1B	3.061	3.368	6140				
50	15	1C	3.034	3.338	6070	5495.33	52	285.76	
50	30	2A	2.961	3.153	3848				
50	30	2B	3.103	3.376	5458				
50	30	2C	3.018	3.253	4694	4666.67	67	312.67	
60	45	3A	2.889	3.032	2868				
60	45	3B	3.002	3.205	4060				
60	45	3C	2.982	3.217	4692	3873.33	84	325.36	
60	60	4A	2.858	3.018	3196				
60	60	4B	2.952	3.163	4216				
60	60	4C	2.929	3.164	4702	4038.00	85	343.23	
70	75	5A	2.828	2.971	2878				
70	75	5B	2.928	3.136	4156				
70	75	5C	2.886	3.084	3942	3658.67	87	318.30	
70	90	6A	2.819	2.888	1366				
70	90	6B	2.867	2.944	1546				
70	90	6C	2.814	2.898	1680	1530.67	86	131.64	
<b>Total</b>								<b>461</b>	<b>1716.96</b>

Tabla 0-24 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 30%, 2 Mpa, R3

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición						Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Solidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)			
50	15	1A	3.177	3.358	3622				
50	15	1B	3.368	3.576	4168				
50	15	1C	3.338	3.604	5328	4372.67	67	292.97	
50	30	2A	3.153	3.341	3752				
50	30	2B	3.376	3.611	4700				
50	30	2C	3.253	3.501	4964	4472.00	72	321.98	
60	45	3A	3.032	3.200	3348				
60	45	3B	3.205	3.436	4606				
60	45	3C	3.217	3.431	4280	4078.00	74	301.77	
60	60	4A	3.018	3.262	4884				
60	60	4B	3.163	3.475	6246				
60	60	4C	3.164	3.538	7472	6200.67	85	527.06	
70	75	5A	2.971	3.195	4476				
70	75	5B	3.136	3.392	5112				
70	75	5C	3.084	3.394	6212	5266.67	91	479.27	
70	90	6A	2.886	3.025	2796				
70	90	6B	2.944	3.109	3292				
70	90	6C	2.898	3.072	3472	3186.67	96	305.92	
<b>Total</b>								<b>485</b>	<b>2228.97</b>

Tabla 0-25 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 2 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición								
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escoorrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)		
50	15	1A	2.707	2.782	1500					
50	15	1B	2.710	2.784	1486					
50	15	1C	2.710	2.788	1562	1516.00	20	30.32		
50	30	2A	2.694	2.753	1182					
50	30	2B	2.692	2.750	1178					
50	30	2C	2.688	2.751	1260	1206.67	50	60.33		
60	45	3A	2.698	2.755	1150					
60	45	3B	2.719	2.776	1158					
60	45	3C	2.702	2.762	1188	1165.33	69	80.41		
60	60	4A	2.676	2.732	1118					
60	60	4B	2.704	2.761	1128					
60	60	4C	2.665	2.729	1278	1174.67	66	77.53		
70	75	5A	2.659	2.720	1232					
70	75	5B	2.707	2.770	1248					
70	75	5C	2.677	2.739	1232	1237.33	71	87.85		
70	90	6A	2.697	2.757	1208					
70	90	6B	2.694	2.755	1224					
70	90	6C	2.665	2.727	1256	1229.33	70	86.05		
<b>Total</b>								<b>346</b>	<b>422.49</b>	



Tabla 0-26 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 2 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	2						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50	15	1A	2.782	2.862	1602				
50	15	1B	2.784	2.871	1744				
50	15	1C	2.788	2.871	1650	1665.33	16	26.65	
50	30	2A	2.753	2.815	1234				
50	30	2B	2.750	2.817	1336				
50	30	2C	2.751	2.819	1366	1312.00	62	81.34	
60	45	3A	2.755	2.811	1124				
60	45	3B	2.776	2.834	1152				
60	45	3C	2.762	2.816	1098	1124.67	70	78.73	
60	60	4A	2.732	2.784	1024				
60	60	4B	2.761	2.813	1038				
60	60	4C	2.729	2.781	1030	1030.67	74	76.27	
70	75	5A	2.720	2.774	1076				
70	75	5B	2.770	2.824	1082				
70	75	5C	2.739	2.791	1034	1064.00	86	91.50	
70	90	6A	2.757	2.809	1028				
70	90	6B	2.755	2.802	928				
70	90	6C	2.727	2.777	998	984.67	87	85.67	
<b>Total</b>								<b>395</b>	<b>440.16</b>

Tabla 0-27 Datos: Tratamiento Compost + Arena, 15%, 2 Mpa, R3

Simulación	Muestreo	Repetición						
lluvia	Tiempo		3					
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)
50	15	1A	2.862	2.925	1256			
50	15	1B	2.871	2.905	680			
50	15	1C	2.871	2.903	634	856.67	32	27.41
50	30	2A	2.815	2.841	520			
50	30	2B	2.817	2.840	460			
50	30	2C	2.819	2.840	428	469.33	58	27.22
60	45	3A	2.811	2.828	334			
60	45	3B	2.834	2.851	338			
60	45	3C	2.816	2.835	378	350.00	78	27.30
60	60	4A	2.784	2.801	340			
60	60	4B	2.813	2.830	352			
60	60	4C	2.781	2.798	342	344.67	78	26.88
70	75	5A	2.774	2.793	374			
70	75	5B	2.824	2.837	262			
70	75	5C	2.791	2.811	400	345.33	80	27.63
70	90	6A	2.809	2.827	364			
70	90	6B	2.802	2.825	470			
70	90	6C	2.777	2.801	464	432.67	82	35.48
<b>Total</b>							<b>408</b>	<b>171.92</b>

Tabla 0-28 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 2 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición							
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escorrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	2.675	2.992	6340				
50		1B	2.685	3.212	10534				
50	15	1C	2.683	3.196	10256	9043.33	24	217.04	
50		2A	2.666	2.968	6030				
50		2B	2.663	3.098	8690				
50	30	2C	2.661	3.053	7838	7519.33	51	383.49	
60		3A	2.690	2.943	5056				
60		3B	2.708	3.098	7794				
60	45	3C	2.688	3.148	9194	7348.00	70	514.36	
60		4A	2.650	2.911	5218				
60		4B	2.698	3.029	6614				
60	60	4C	2.655	3.075	8396	6742.67	73	492.21	
70		5A	2.660	2.875	4296				
70		5B	2.707	3.095	7760				
70	75	5C	2.656	2.943	5726	5927.33	63	373.42	
70		6A	2.694	2.923	4584				
70		6B	2.698	3.078	7582				
70	90	6C	2.647	2.977	6602	6256.00	62	387.87	
<b>Total</b>								<b>343</b>	<b>2368.39</b>

Tabla 0-29 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 2 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición							
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	2.992	3.168	3524				
50		1B	3.212	3.431	4386				
50	15	1C	3.196	3.450	5080	4330.00	50	216.50	
50		2A	2.968	3.160	3846				
50		2B	3.098	3.364	5320				
50	30	2C	3.053	3.336	5662	4942.67	53	261.96	
60		3A	2.943	3.129	3722				
60		3B	3.098	3.418	6406				
60	45	3C	3.148	3.393	4898	5008.67	56	280.49	
60		4A	2.911	3.093	3630				
60		4B	3.029	3.232	4074				
60	60	4C	3.075	3.245	3404	3702.67	67	248.08	
70		5A	2.875	3.025	3000				
70		5B	3.095	3.225	2590				
70	75	5C	2.943	3.116	3472	3020.67	65	196.34	
70		6A	2.923	3.141	4348				
70		6B	3.078	3.278	4004				
70	90	6C	2.977	3.180	4062	4138.00	55	227.59	
<b>Total</b>								<b>346</b>	<b>1430.96</b>

Tabla 0-30 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 30%, 2 Mpa, R3

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición							
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	3.168	3.287	2368				
50		1B	3.431	3.652	4422				
50	15	1C	3.450	3.654	4090	3626.67	50	181.33	
50		2A	3.160	3.327	3336				
50		2B	3.364	3.568	4092				
50	30	2C	3.336	3.598	5226	4218.00	68	286.82	
60		3A	3.129	3.265	2730				
60		3B	3.418	3.606	3762				
60	45	3C	3.393	3.587	3894	3462.00	87	301.19	
60		4A	3.093	3.242	2986				
60		4B	3.232	3.436	4068				
60	60	4C	3.245	3.437	3832	3628.67	90	326.58	
70		5A	3.025	3.155	2608				
70		5B	3.225	3.431	4128				
70	75	5C	3.116	3.312	3908	3548.00	93	329.96	
70		6A	3.141	3.322	3624				
70		6B	3.278	3.632	7084				
70	90	6C	3.180	3.510	6600	5769.33	94	542.32	
<b>Total</b>								<b>482</b>	<b>1968.21</b>

Tabla 0-31 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 2 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición							
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escoorrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	2.925	3.116	3814				
50		1B	2.905	3.264	7166				
50	15	1C	2.903	3.222	6394	5791.33	49	283.78	
50		2A	2.841	3.026	3698				
50		2B	2.840	3.044	4082				
50	30	2C	2.840	3.109	5372	4384.00	62	271.81	
60		3A	2.828	2.960	2630				
60		3B	2.851	3.007	3118				
60	45	3C	2.835	3.010	3484	3077.33	69	212.34	
60		4A	2.801	2.911	2212				
60		4B	2.830	2.956	2514				
60	60	4C	2.798	2.930	2640	2455.33	66	162.05	
70		5A	2.793	2.897	2094				
70		5B	2.837	2.976	2780				
70	75	5C	2.811	2.962	3020	2631.33	54	142.09	
70		6A	2.827	2.926	1980				
70		6B	2.825	2.949	2474				
70	90	6C	2.801	2.921	2402	2285.33	74	169.11	
<b>Total</b>								<b>374</b>	<b>1241.18</b>

Tabla 0-32 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 2 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repeticón								
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escoorrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)		
50		1A	3.116	3.230	2280					
50		1B	3.264	3.380	2330					
50	15	1C	3.222	3.358	2724	2444.67	52	127.12		
50		2A	3.026	3.141	2302					
50		2B	3.044	3.187	2844					
50	30	2C	3.109	3.243	2676	2607.33	65	169.48		
60		3A	2.960	3.032	1444					
60		3B	3.007	3.085	1570					
60	45	3C	3.010	3.081	1422	1478.67	80	118.29		
60		4A	2.911	2.981	1402					
60		4B	2.956	3.032	1516					
60	60	4C	2.930	3.006	1524	1480.67	80	118.45		
70		5A	2.897	2.966	1366					
70		5B	2.976	3.049	1458					
70	75	5C	2.962	3.033	1428	1417.33	81	114.80		
70		6A	2.926	2.991	1314					
70		6B	2.949	3.017	1374					
70	90	6C	2.921	2.989	1366	1351.33	81	109.46		
<b>Total</b>								<b>439</b>	<b>757.61</b>	

Tabla 0-33 Datos: Tratamiento Cemento + Arena, 15%, 2 Mpa, R3

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición							
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	3.230	3.290	1200				
50		1B	3.380	3.473	1848				
50	15	1C	3.358	3.439	1620	1556.00	62	96.47	
50		2A	3.141	3.204	1256				
50		2B	3.187	3.266	1594				
50	30	2C	3.243	3.315	1436	1428.67	71	101.44	
60		3A	3.032	3.058	516				
60		3B	3.085	3.113	560				
60	45	3C	3.081	3.118	752	609.33	84	51.18	
60		4A	2.981	3.014	650				
60		4B	3.032	3.062	604				
60	60	4C	3.006	3.040	668	640.67	83	53.18	
70		5A	2.966	2.998	638				
70		5B	3.049	3.083	676				
70	75	5C	3.033	3.060	550	621.33	86	53.43	
70		6A	2.991	3.020	566				
70		6B	3.017	3.048	602				
70	90	6C	2.989	3.012	470	546.00	81	44.23	
<b>Total</b>								<b>467</b>	<b>399.93</b>



Tabla 0-34 Datos: Control, 30%, 2 Mpa, R1

Simulación Lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	1						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escorrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	3.017	3.280	5248				
50		1B	3.073	3.380	6126				
50	15	1C	3.073	3.779	14120	8498.00	74	628.85	
50		2A	2.983	3.245	5246				
50		2B	3.081	3.415	6684				
50	30	2C	3.046	3.385	6772	6234.00	78	486.25	
60		3A	2.937	3.133	3924				
60		3B	3.041	3.383	6836				
60	45	3C	3.039	3.356	6336	5698.67	92	524.28	
60		4A	2.964	3.162	3960				
60		4B	3.044	3.311	5328				
60	60	4C	2.978	3.200	4436	4574.67	95	434.59	
70		5A	2.943	3.132	3768				
70		5B	3.024	3.278	5092				
70	75	5C	3.052	3.313	5218	4692.67	98	459.88	
70		6A	2.994	3.250	5118				
70		6B	3.061	3.474	8254				
70	90	6C	3.026	3.471	8904	7425.33	96	712.83	
<b>Total</b>								<b>533</b>	<b>3246.69</b>

Tabla 0-35 Datos: Control, 30%, 2 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición							
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	3.280	3.469	3782				
50		1B	2.668	2.876	4170				
50	15	1C	2.645	2.873	4560	4170.67	64	266.92	
50		2A	3.245	3.509	5276				
50		2B	2.699	3.098	7974				
50	30	2C	2.681	2.873	3848	5699.33	70	398.95	
60		3A	3.133	3.281	2966				
60		3B	3.383	3.563	3606				
60	45	3C	3.356	3.524	3358	3310.00	82	271.42	
60		4A	3.162	3.316	3070				
60		4B	3.311	3.551	4800				
60	60	4C	3.200	3.407	4142	4004.00	81	324.32	
70		5A	3.132	3.278	2924				
70		5B	3.278	3.495	4326				
70	75	5C	3.313	3.501	3772	3674.00	88	323.31	
70		6A	3.250	3.409	3176				
70		6B	3.474	3.657	3670				
70	90	6C	3.471	3.623	3040	3295.33	77	253.74	
<b>Total</b>								<b>462</b>	<b>1838.67</b>

Tabla 0-36 Datos: Control, 15%, 2 Mpa, R1

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	1						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	2.695	2.857	3238				
50		1B	2.698	2.889	3826				
50	15	1C	2.690	2.854	3286	3450.00	51	175.95	
50		2A	2.679	2.810	2622				
50		2B	2.683	2.855	3456				
50	30	2C	2.677	2.852	3488	3188.67	69	220.02	
60		3A	2.683	2.820	2752				
60		3B	2.690	2.888	3966				
60	45	3C	2.682	2.881	3976	3564.67	83	295.87	
60		4A	2.737	2.844	2138				
60		4B	2.740	2.891	3034				
60	60	4C	2.710	2.858	2964	2712.00	86	233.23	
70		5A	2.728	2.814	1728				
70		5B	2.747	2.881	2672				
70	75	5C	2.755	2.885	2600	2333.33	91	212.33	
70		6A	2.774	2.871	1944				
70		6B	2.768	2.914	2908				
70	90	6C	2.740	2.879	2794	2548.67	93	237.03	
<b>Total</b>								<b>473</b>	<b>1374.43</b>

Tabla 0-37 Datos: Control, 15%, 2 Mpa, R2

Simulación lluvia	Muestreo Tiempo	Repetición	2						
Int/Dur (mm/hr)	Min	Muestra	Peso plato (g)	Peso Plato + Sólidos(g)	Concentración Sólidos(mg/L)	Promedio Sol Tot (mg/L)	Escurrentía (L) c/15min	Sedimentos (g)	
50		1A	2.857	3.017	3202				
50		1B	2.889	3.073	3680				
50	15	1C	2.854	3.073	4374	3752.00	53	198.86	
50		2A	2.810	2.983	3446				
50		2B	2.855	3.081	4516				
50	30	2C	2.852	3.046	3890	3950.67	69	272.60	
60		3A	2.820	2.937	2330				
60		3B	2.888	3.041	3046				
60	45	3C	2.881	3.039	3158	2844.67	82	233.26	
60		4A	2.844	2.964	2410				
60		4B	2.891	3.044	3064				
60	60	4C	2.858	2.978	2394	2622.67	86	225.55	
70		5A	2.814	2.943	2584				
70		5B	2.881	3.024	2852				
70	75	5C	2.885	3.052	3326	2920.67	89	259.94	
70		6A	2.871	2.994	2452				
70		6B	2.914	3.061	2942				
70	90	6C	2.879	3.026	2932	2775.33	92	255.33	
<b>Total</b>								<b>471</b>	<b>1445.53</b>

## 8.4. Ilustraciones de Pruebas

En esta sección se presentan fotografías tomadas durante distintas evaluaciones que ejemplifican las pruebas realizadas.



Ilustración 0-4 Prueba: Tratamiento Compost+Arena, 15%, Suelo Suelto



Ilustración 0-5 Prueba: Tratamiento Cemento+Arena, 15%, Suelo Suelto





**Ilustración 0-6 Prueba: Control, 30%, Suelo Suelto**



**Ilustración 0-7 Prueba: Control, 15%, Suelo Suelto**





Ilustración 0-8 Prueba: Tratamiento Compost+Arena, 30%, Suelo Compacto



Ilustración 0-9 Prueba: Tratamiento Compost+Arena, 15%, Suelo Compacto



**Ilustración 0-10 Prueba: Tratamiento Cemento+Arena, 15%, Suelo Compacto**



**Ilustración 0-11 Prueba: Control, 15%, Suelo Compacto**