

UNIVERSIDAD DEL BÍO - BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Carmen González Labbé



INFLUENCIA DEL FUEGO EN LA EROSIÓN DE TALUDES DE SUELO TIPO ARENA LIMOSA.

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para
obtener el Título de Ingeniero Civil.

FRANCISCO JAVIER CIFUENTES JARA

Concepción, noviembre de 2019

“INFLUENCIA DEL FUEGO EN LA EROSIÓN DE TALUDES DE SUELO TIPO ARENA LIMOSA.”

Autor: Francisco Javier Cifuentes Jara.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

Francisco.cifuentes1401@alumno.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Carmen González Labbé

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

cgonzal@ubiobio.cl

RESUMEN

Concepción, es una ciudad ubicada en el centro sur de Chile, posee una gran cantidad de vegetación por lo que está constantemente expuesta a sufrir incendios de gran magnitud, esto lo respalda su registro histórico; los efectos que produce el fuego en la capa vegetal del suelo se estudia mundialmente, no así que sucede con la capa mineral inmediatamente bajo la capa vegetal, este trabajo consta de una simulación de incendio sobre un suelo mineral expuesto, para ver los efectos que tiene el calor en las propiedades del suelo y principalmente en la erosión.

Con el trabajo realizado se obtuvieron resultados que corroboran que el parámetro crítico en un suelo quemado es la infiltración, así también se obtuvieron registros de aumento tanto en la cantidad de material erodado, como un aumento en la cantidad de escorrentía superficial registrada.

Además de los aumentos tanto en la cantidad de material erodado como la escorrentía superficial, se encontró una dependencia en este aumento, según la duración del tiempo de exposición al fuego.

Palabras clave: Infiltración, escorrentía superficial, material erodado.

“INFLUENCE OF FIRE ON THE EROSION OF SILTY-SAND TYPE SOIL SLOPES.”

Author: Francisco Javier Cifuentes Jara.

Department of Civil and Environmental Engineering, University of the Bío-Bío
Francisco.cifuentes1401@alumno.ubiobio.cl

Teacher Guide: Carmen González Labbé

Department of Civil and Environmental Engineering, University of the Bío-Bío
cgonzal@ubiobio.cl

ABSTRACT

Concepción, is a city located in the center south of Chile, has a large amount of vegetation so it is constantly exposed to fires of great magnitude, this is supported by its historical record, the effects of fire on the topsoil is studied worldwide, not so that happens with the mineral layer immediately under the topsoil, this work consists of a fire simulation on an exposed mineral soil, to see the effects that heat has on soil properties and mainly in erosion.

With the work carried out, results were obtained that corroborate that the critical parameter in a burnt soil is infiltration, as well as records of an increase in both the amount of eroded material and an increase in the amount of surface runoff recorded.

In addition to increases in both the amount of erodate and surface runoff, there was a dependence on this increase, depending on the length of time of fire exposure.

Keywords: Infiltration, surface runoff, erodate material.

Tabla de contenidos

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	7
1.1.- JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.....	8
1.2.-OBJETIVOS.....	8
1.2.1.-Objetivo general.....	8
1.2.2.-Objetivos específicos.....	8
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES.....	8
2.1- Erosión de taludes.....	9
2.2- Erosión hídrica.....	9
2.2.1- Mecanismos que intervienen en el proceso de erosión hídrica.....	10
2.3- Formas de erosión hídrica.....	11
2.3.1- Erosión laminar.....	11
2.3.2- Erosión por surcos.....	12
2.3.3- Erosión por cárcavas.....	12
2.4- Succión matricial.....	12
2.4.1- Succión matricial en taludes.....	12
2.5- Modelos de evaluación de la erosión hídrica.....	13
2.5.1- Modelos de evaluación indirecta.....	13
2.6- Efectos del fuego en la estabilidad de taludes.....	15
2.6.1- Reacción del suelo frente al calor.....	15
2.6.2-Parametro crítico.....	17
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	18
3.1- Lisímetros.....	18
3.2- Simulador de lluvia.....	19
3.2- Diseño de fuente de calor.....	20
3.2.1- Protección del lisímetro.....	20
3.2.2- Fuente de calor.....	21
CAPÍTULO 4: ETAPA EXPERIMENTAL.....	22
4.1- Obtención de suelo.....	23
4.2- Modificación de lisímetros.....	23
4.3- Método de compactación del suelo en lisímetros.....	24
4.4- Extracción de testigos de suelo.....	25

4.5- Modificación sistema de lluvia	25
4.5.1- Calibración sistema de lluvia.....	25
4.6- Exposición del suelo.....	26
4.6.1 Quema de suelo.....	27
4.7- Simulación de lluvia.....	27
4.7.1 Recepción de material y escorrentía.....	28
4.8- Re perfilar lisímetros	28
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
5.1- Precipitación simulada.....	29
5.2- Análisis visual del suelo quemado	30
5.3- Variación de densidades	30
5.4- Escorrentía superficial.....	31
5.5- Material erodado	33
5.6- Efecto borde.....	35
5.6.1- Efecto borde escorrentía superficial.....	35
5.6.2- Efecto borde material erodado.....	36
5.7- Relación de material erodado y escorrentía superficial.....	37
5.8- Comparación con MUSLE.....	39
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	42
6.1- Con respecto a densidad se refiere	42
6.2- Con respecto a la cantidad de suelo erodado	42
6.2- Con respecto a la influencia del fuego en la erosión de taludes.....	43
BIBLIOGRAFÍA	44
Anexo A.....	46
A.1- Uniformidad de Distribución (UD)	46
A.2- Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU)	46
A.3- Coeficiente de Variación (CV).....	47
A.4- Resultados	47
Anexo B	48
B.1- Resultados	48
Anexo C	49
C.1- Resultados exposición 0.....	50

C.2- Resultados exposición 1	51
C.3- Resultados exposición 2.....	52

Índice de Figuras

Figura 1. Erosión hídrica.	Figura 2. Erosión eólica.	9
Figura 3. Proceso de erosión hídrica.....		10
Figura 4. Tipos de erosión hídrica producidas por escorrentía.....		11
Figura 5. Capa Repelente.		16
Figura 6. Capa Repelente.		17
Figura 7. Metodología.....		18
Figura 8. Proyección 3D de lisímetros.....		19
Figura 9. Simulador de lluvia		20
Figura 10. Papel aluminio cubriendo lisímetro.....		21
Figura 11. Carbón sobre papel aluminio		22
Figura 12. Extracción de suelo.		23
Figura 13: <i>Compactación con pisón</i>		24
Figura 14. Medidores de densidad.....		25
Figura 15. Calibración sistema de lluvia.....		26
Figura 16. Distribución de celdas y su tipo de exposición.....		27
Figura 17. Procedimiento de quema de suelo.....		27
Figura 18. Recepción de material erodado y escorrentía superficial		28
Figura 19. Reperfilación de lisímetro.....		29
Figura 20. Inspección visual del suelo quemado		30
Figura 21. Variación porcentual de densidad en celdas según su exposición		31
Figura 22. Escorrentía superficial en celdas según su exposición		32
Figura 23. Comparación de tendencias de escorrentía para cada exposición.....		33
Figura 24. Material erodado en celdas según su exposición		34
Figura 25. Comparación de tendencias de material erodado para cada exposición.....		35
Figura 26. Material erodado versus escorrentía superficial según tiempo de exposición		37
Figura 27. Comparación de tendencias material erodado vs escorrentía para cada exposición		38

Figura 28. Comparación de proyección MUSLE con resultados obtenidos para cada exposición... 40

Índice de Tablas

Tabla 1. Registro de precipitaciones 29

Tabla 2. Escorrentía superficial promedio por celda 36

Tabla 3. Material erodado promedio por celda..... 36

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

Chile se caracteriza por ser un país con una gran longitud, esto le permite poseer diferentes climas lo que produce también diferentes tipos de vegetación. Mucha de esta vegetación es forestal, lo que trae consigo estar constantemente expuesto a sufrir incendios forestales.

A lo largo de la historia Chile ha tenido que lidiar con grandes catástrofes producida por incendios, 383 incendios de gran magnitud (igual o mayor a 200 hectáreas) entre los años 1985 y 2018, en los últimos años se han acentuado estos problemas 29 incendios forestales en la temporada 2016-2017 solo en la región del Bío- Bío (CONAF, 2019), llegando a ser necesaria ayuda extranjera para poder controlar estos eventos de gran magnitud. Actualmente se ha estado trabajando en diversos tipos de planes preventivos y de alerta temprana en caso de incendios, pero no siempre será posible prevenir o controlar estos acontecimientos.

La erosión hídrica en Chile es un fenómeno que mantiene en estado de alerta principalmente a las zonas donde la precipitación media anual es alta (ONEMI, 2019), esto debido a que se tienen grandes precipitaciones en cortos periodos de tiempo, o una precipitación menor pero constante a lo largo de días, lo que produce escorrentías superficiales y con esto arrastre de material, al desplazarse material por un talud la estabilidad de este se ve condicionada o afectada, dependiendo la localización de este talud su colapso será más o menos perjudicial, las zonas más lluviosos del país son precisamente las zonas que poseen mucho terreno forestal. Si bien los terrenos están protegidos por diferentes tipos de plantaciones, al ocurrir un incendio todo cambia, el suelo queda expuesto o su vegetación queda debilitada, lo que propicia la erosión hídrica.

El presente proyecto de título pretende estudiar la influencia del fuego en la erosión de taludes desprotegidos producidas por lluvias posteriores a un incendio, mediante el análisis de micro parcelas y su interacción con simuladores de lluvia, finalmente se verificará el grado de validez del estudio para aplicar la ecuación universal de perdida de suelo modificada(MUSLE).

1.1.- JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

Los estudios realizados hasta la fecha se centran principalmente en el análisis de como se ve afectada la capa vegetal de un suelo frente al fuego, existen pocos estudios que hacen referencia a como se ve afectada la capa de suelo que se encuentra inmediatamente por debajo del suelo vegetal.

La finalidad de este trabajo es determinar si el fuego incide y de ser así de qué forma incide en la erosión hídrica en un talud producida por las primeras lluvias posteriores a un incendio, analizando la escorrentía superficial y el material erodado en un lisímetro. Para la realización de todos los análisis se utilizará un suelo tipo arena limosa sin cobertura vegetal.

1.2.-OBJETIVOS.

1.2.1.-Objetivo general.

Analizar la influencia del fuego en la erosión de taludes de suelo tipo arena limosa de la ciudad de Concepción.

1.2.2.-Objetivos específicos.

- Identificar las propiedades de un suelo que se ven afectadas al estar expuestas al fuego.
- Evaluar la importancia del tiempo de exposición al fuego en la erosión de un talud mediante análisis visual y variación de densidad.
- Medir cantidad de suelo erodado con análisis modular y expuesto al fuego.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES.

En este capítulo se realiza una revisión teórica de las características y parámetros fundamentales para entender el proceso de erosión hídrica, estabilidad de taludes, al igual que algunas características de los incendios forestales.

2.1- Erosión de taludes.

Los taludes se ven afectador principalmente por dos tipos de erosión, erosión hídrica (figura 1) y erosión eólica (figura 2), siendo la primera la que principalmente condiciona la estabilidad de un talud y la más perjudicial en cuanto a arrastre de material se refiere, estos daños se concentran principalmente en la época invernal, debido a que es el momento en el cual se concentra la mayor cantidad de precipitación anual.

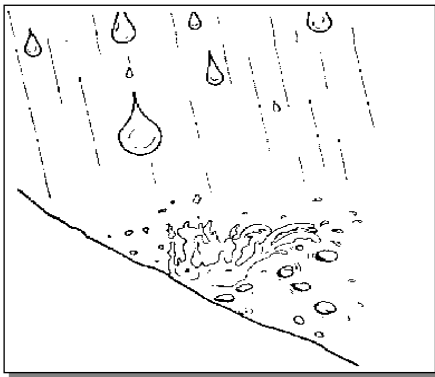


Figura 1. Erosión hídrica.

Fuente: www.unesco.org.uy

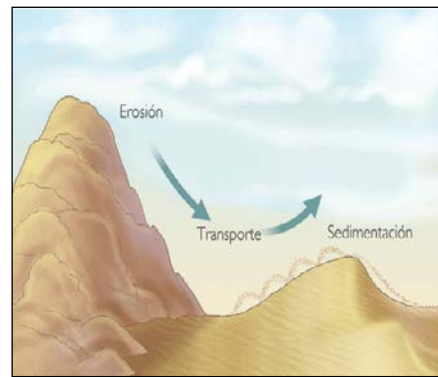


Figura 2. Erosión eólica.

Fuente: www.madrimasd.org

2.2- Erosión hídrica

La erosión hídrica es causada por la acción de las gotas, específicamente por la energía cinética que estas poseen al caer e impactar la superficie del terreno, este impacto produce la disgregación del suelo, esto significa que se separan las partículas de los agregados del suelo, la magnitud con que esto ocurre depende del tamaño y velocidad de las gotas de lluvia así también si el suelo está descubierto o no. Las partículas de suelo disgregado apoyan el sellado de huecos en el suelo lo que favorece el escurrimiento, gran parte del material disgregado es arrastrado posteriormente por la escorrentía superficial que se produce por el agua que no logra infiltrar.

2.2.1- Mecanismos que intervienen en el proceso de erosión hídrica

El agua de lluvia realiza su acción erosiva sobre el suelo mediante dos etapas principalmente, el impacto producido por las gotas de lluvia y la posterior escorrentía superficial producida por el agua que no logra infiltrar.

La figura 3 explica a grandes rasgos el proceso de erosión donde esta comienza por el impacto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo (A), sus agregados son desintegrados en partículas minúsculas (B), que tapan los poros formando una selladura superficial (C), provocando el escurrimiento superficial del agua de lluvia. El agua que escurre carga partículas de suelo que son depositadas en lugares más bajos cuando la velocidad de escurrimiento es reducida (D). (Derpsch, et al., 1991)

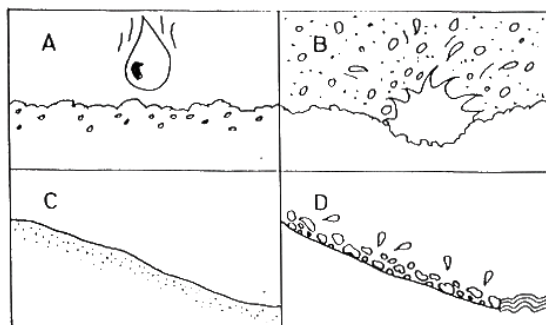


Figura 3. Proceso de erosión hídrica.

Fuente: <http://www.rolf-derpsch.com>

2.2.1.1- Erosión por impacto

Originada por la caída de gotas de lluvia sobre el suelo, su impacto está en función de la forma y tamaño de las gotas (erosividad), y de la resistencia del suelo a su poder erosivo (erodabilidad).

La gota al hacer contacto con la superficie del suelo lo disgrega, pequeñas partículas saltan a los alrededores algunas de estas se acumulan en huecos existentes tapándolos, esto propicia el posterior escurrimiento, producto también del impacto de la gota en el suelo esta comienza a infiltrarse rápidamente, llegado el momento en el cual la precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo se da inicio a la escorrentía superficial.

2.2.1.2- Erosión por escorrentía superficial

Cuando la precipitación supera la capacidad de infiltración de un suelo, se da origen a la escorrentía o escurrimiento superficial, este inicialmente arrastra las pequeñas partículas que están sueltas en la superficie así también las partículas producidas por la disgregación del suelo, a medida que la escorrentía aumenta es capaz de transportar partículas de mayor tamaño, si el curso del agua se canaliza por zonas específicas se producen surcos y cárcavas de erosión.

2.3- Formas de erosión hídrica

Según peralta (1976), el agua de escurrimiento se mueve en la superficie del suelo de dos formas: como una delgada lámina de agua en toda la superficie del suelo, o concentrada, lo que es también conocido como escurrimiento canalizado (Hernández 2011).

En la figura 4 se muestran los diferentes tipos de erosión hídrica.

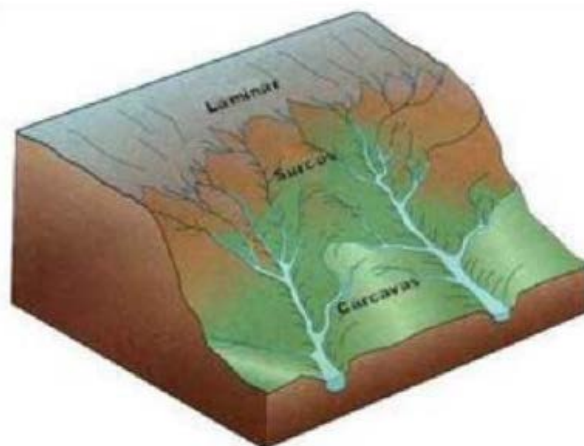


Figura 4. Tipos de erosión hídrica producidas por escorrentía.

Fuente: <http://www.wakefieldsoil.blogspot.com>

2.3.1- Erosión laminar

La erosión laminar se produce principalmente cuando el flujo de agua no ha alcanzado grandes velocidades, esto produce una capa de agua uniforme que va arrastrando las partículas más pequeñas del material superficial.

2.3.2- Erosión por surcos

Debido a irregularidades del terreno el agua no siempre se desplazará de forma uniforme, serán canalizadas poco a poco de forma natural por el estado del terreno, cuando el agua que escurre se canaliza es capaz de arrastrar mayor cantidad de material y partículas más grandes dando origen a los surcos, que son pequeños cortes en el suelo que dan origen a pequeños canales por donde se desplaza el agua.

2.3.3- Erosión por cárcavas

Las cárcavas se originan en un estado más avanzado de la erosión, se forman a partir de métodos de erosión anteriormente descritos, cuando el agua escurrida se canaliza en surcos comienza a avanzar a mayor velocidad, cuando esta escorrentía logra desprender material a mayor profundidad o varios surcos convergen en uno se da origen a una cárcava, que es una especie de canalización masiva de escurrimiento superficial la cual se agranda por efecto de la cantidad de agua que desplaza y por la velocidad que alcanza el agua.

2.4- Succión matricial

Diferencia entre la presión del aire y la presión del agua en los poros del suelo. Succión equivalente obtenida mediante la medición de la presión parcial del vapor de agua en equilibrio con el agua del suelo respecto a la presión parcial del vapor de agua en equilibrio con una solución idéntica en composición al agua del suelo. (Fredlund, & Rahardjo, 1993)

2.4.1- Succión matricial en taludes.

Los suelos al estar expuestos a precipitaciones varían su humedad y alguno también su volumen, cuando un talud se ve expuestos a estos cambios de humedad y volumen se ve alterada la estabilidad de este.

La influencia de la precipitación tiene un impacto directo en la humedad del suelo, por lo que un aumento de lluvia genera una disminución en el esfuerzo de succión, lo que provoca una disminución en el factor de seguridad del talud y un aumento en la probabilidad de falla. La succión, al no ser considerada en análisis convencionales, disminuye aproximadamente 8% el factor de seguridad. (Valverde, 2010)

2.5- Modelos de evaluación de la erosión hídrica

Para la estimación o medición del grado de erosión existente en el suelo se han desarrollado distintos métodos, los cuales se diferencian en dos tipos; los modelos cualitativos y los modelos cuantitativos, en este trabajo nos centraremos únicamente en los segundos.

Los modelos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión, pueden ser modelos de evaluación directa y modelos de evaluación indirecta, donde estos últimos son los de mayor aplicación en la actualidad.

2.5.1- Modelos de evaluación indirecta

Entre estos tipos de modelos se pueden distinguir modelos estadísticos, modelos físicos y modelos paramétricos.

Dentro de este último grupo se presenta el modelo revisado y modificado más empleado en cuanto a la cuantificación cualitativa de la pérdida de suelos producto de la erosión hídrica, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978); la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (RUSLE) (Renard et.al., 1991) y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (MUSLE) (Williams J., 1975), (Hernández 2011).

Siendo este último modelo el más idóneo para la experiencia que realizara en este trabajo.

2.5.1.1- Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (MUSLE)

La ecuación modificada de pérdida de suelo (MUSLE) es la extensión del modelo USLE, pero tiene diferencias sustanciales debido a que MUSLE; ya que no se trata de hacer una estimación promediada a largo plazo, sino de calcular el aporte de sedimentos de un evento singular aplicado a pequeñas cuencas hidrográficas, utilizando un factor de escurrimiento para reemplazar el factor de energía pluvial de la ecuación universal de pérdida de suelo. Esta ecuación se recomienda utilizar en cuencas que tengan una superficie alrededor de 100 Km^2 , cuando las cuencas presentan homogeneidad en los factores integrantes del modelo. En caso contrario se recomienda utilizar en pequeñas cuencas de 25 Km^2 . (Hernández 2011)

Su expresión es la siguiente:

$$Y = 11,8 * (Q * q_p)^{0,56} * K * L * S * C * P$$

Donde:

Y: Sedimento emitido por una tormenta específica (ton/ha)

Q: Volumen de escurrimiento por tormenta (m^3)

q_p : Caudal instantáneo máximo (m^3/s)

11,8: Factor de conversión

K: Erodabilidad del suelo, en (ton/ha/MJ*mm/ha/hr), calculado a través del nomograma de Wischmeier (1971).

Los factores (L, S, C y P) son los mismos empleados en la ecuación universal de la pérdida de suelo.

Donde los factores según USLE son:

L: factor longitud

Relación esperada de pérdida de suelo entre un terreno de longitud determinada cualquiera y la de una parcela de 22,13 m, bajo idénticas condiciones de manejo.

S: factor gradiente de la pendiente

Factor de pendiente que expresa la relación esperada de pérdida de suelo entre un terreno con pendiente determinada cualquiera y la de una ladera con 9%, bajo idénticas condiciones de uso y manejo.

Factor topografía (LS): El tipo de pendiente y su longitud produce una pérdida de suelo que suele incrementarse exponencialmente. El valor de este factor puede obtenerse según:

$$LS = \sqrt{f}(0,0138 + 0,0096s + 0,00138s^2)$$

Donde:

f : Longitud de la ladera (m)

s : Pendiente del terreno (%)

C: factor cobertura vegetal

Factor de cobertura y manejo del cultivo, definido como la relación esperada de pérdida de suelo entre un terreno con un cultivo cualquiera, bajo condiciones específicas de manejo y una parcela de idéntica superficie, pero en barbecho desnudo.

El factor de cobertura es obtenido por medio de valores ajustados a los entregados por Roose en 1975 (citado por Morgan, 1997).

P: factor prácticas de conservación de suelos y agua

Prácticas complementarias de control de erosión. Representa la relación esperada de pérdida de suelo entre un terreno con una práctica complementaria (terracea, cultivo en contorno y faja) y una parcela con el mismo cultivo e idénticas condiciones de suelo y topografía, pero sin dicha práctica complementaria.

Las prácticas complementarias de control de erosión se obtienen a través de lo establecido por Wischemeier y Smith (1978), Roose (1977), y Chan (1981) (citado por Morgan, 1997).

2.6- Efectos del fuego en la estabilidad de taludes

La erosión en un talud depende de la cantidad de precipitación, el tipo de suelo, la geometría del talud y la cobertura de este, si la vegetación que protege el suelo se quema este quedara descubierto, por lo cual será más propenso a la erosión hídrica, la cual con las lluvias posteriores al incendio arrastrara mayor cantidad de suelo vegetal o partículas de este, no se sabe con exactitud como se ve afectado el suelo bajo la capa de suelo vegetal al estar expuesta a altas temperaturas.

2.6.1- Reacción del suelo frente al calor.

Si bien los estudios realizados con fuego no se centran en lo que sucede con el suelo posicionado inmediatamente bajo la capa vegetal, a raíz del estudio del comportamiento de

la capa vegetal se han obtenido también algunos indicios de cómo reacciona el suelo mineral al estar expuesto al calor.

Hay estudios que hablan de como se ve afectada la erosión y la infiltración, así también de la aparición de una capa impermeable post fuego.

2.6.1.1- Erosión e infiltración post fuego.

Según Badía y Martí (2008), la quema aumenta significativamente la tasa de erosión del suelo: 18.5 veces con baja energía de lluvia y 33.6 veces con alta energía de lluvia. Se ha encontrado un comportamiento similar para los parámetros de concentración de sedimentos. Además, aseguran que la quema disminuye la infiltración del suelo: 1.5 veces con lluvia fina y 3 veces con lluvia gruesa.

El aumento en la erosión y la disminución en la infiltración se explican en la figura 5 donde (A) la saturación de la superficie del suelo humectable; (B) una falla en el límite entre capas humectables y repelentes al agua; (C) pérdida de la capa superficial humectable, con el flujo de agua sobre la capa repelente al agua; (D) erosión de la capa repelente al agua; (E) erosión a través de la capa repelente al agua e infiltración en el suelo humectable subyacente; y (F) desarrollo de un riachuelo bien definido (adaptado de Wells, 1987).

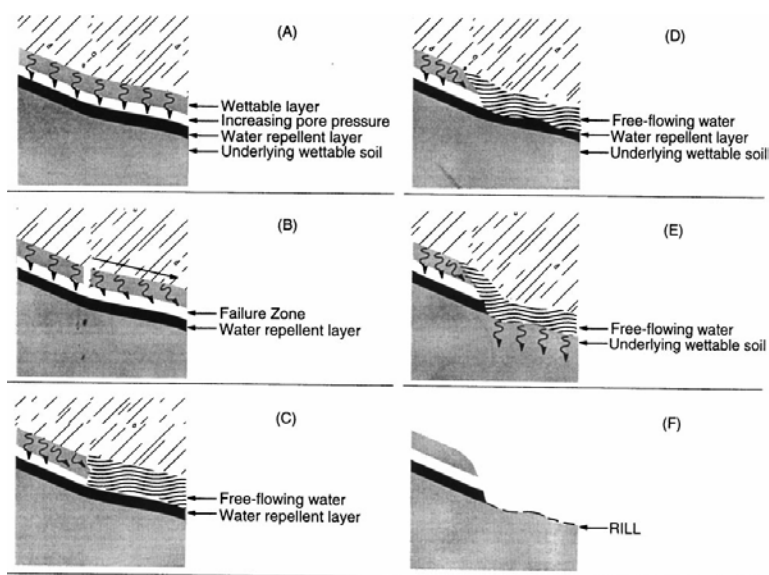


Figura 5. Capa Repelente.

Fuente: DeBano 2000

2.6.1.2- Capa impermeable post fuego.

Según DeBano (2000) posterior al incendio se forma una capa impermeable paralela y a escasos centímetros del suelo mineral, la cual posee la característica de ser impermeable.

Como se muestra en la figura 5. (A) La repelencia al agua del suelo en los matorrales no quemados se encuentra en las capas de lecho, duff y suelo mineral inmediatamente debajo de las plantas arbustivas. (B) Cuando el fuego arde, las sustancias hidrofóbicas se vaporizan, moviéndose hacia abajo a lo largo de los gradientes de temperatura. (C) Después de que el fuego haya pasado, una capa hidrófuga está presente debajo y paralela a la superficie del suelo en el área quemada. (adaptado de DeBano, 1981).

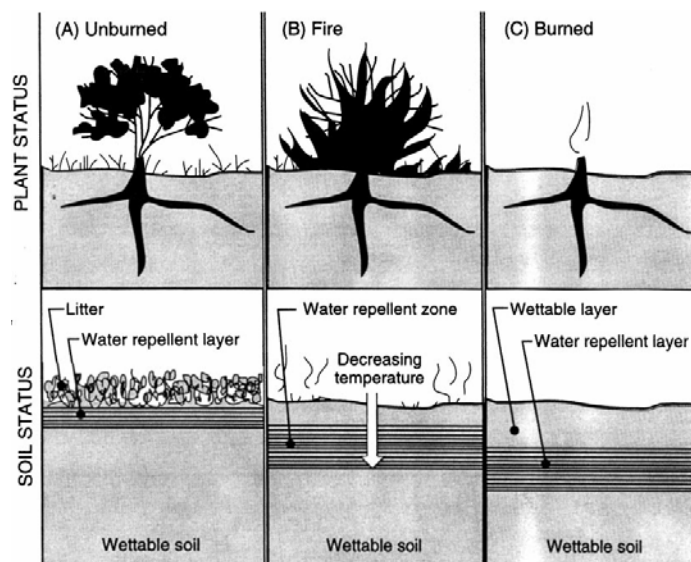


Figura 6. Capa Repelente.

Fuente: DeBano 2000

2.6.2-Parametro crítico.

Con estos antecedentes se puede determinar que la variable critica de estudio será la infiltración, debido a que esta es la que se ve principalmente afectada por la temperatura, en este trabajo se estudiara esta variable de manera indirecta, por medio del aumento o disminución de la escorrentía superficial y el material erodado.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.

La principal problemática para el estudio de los efectos del fuego en el suelo, es que se necesita de un evento catastrófico para poder obtener datos, pero en base a los estudios realizados por Riquelme en el 2010 y Hernández en el 2011, es posible el plantear un estudio del suelo expuesto al calor a una menor escala, siguiendo con el estudio realizado por los antes mencionados, y siendo posible realizar una serie de repeticiones para obtener datos estadísticamente confiables.



Figura 7. Metodología.

Fuente: Elaboración propia.

3.1- Lisímetros

Riquelme en el 2010 realizó un trabajo en el cual propone el diseño de 3 lisímetros para estudiar erosión hídrica, estos varían principalmente en la pendiente que poseen (Figura 6), el plantea 3 pendientes 5%, 25% y 60%, con estas permite estudiar la escorrentía superficial, la cantidad de agua infiltrada y el material erodado.

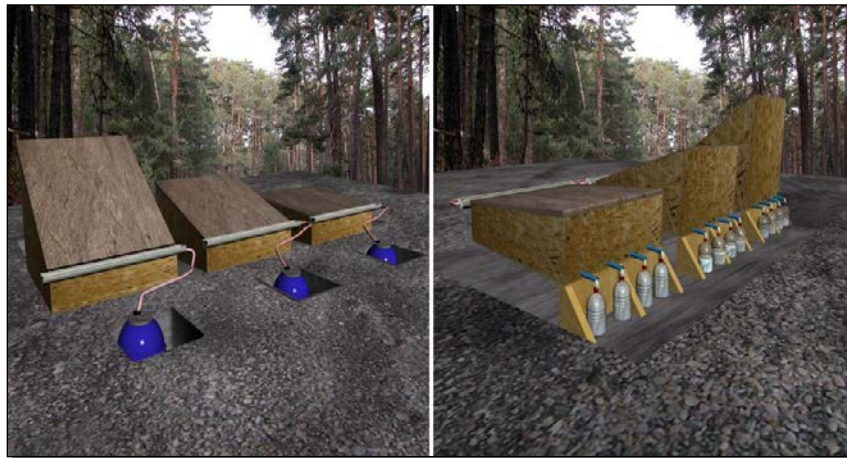


Figura 8. Proyección 3D de lisímetros.

Fuente: Riquelme, 2010

3.2- Simulador de lluvia

Para poder estudiar la erosión hídrica se necesita de las precipitaciones, pero es muy difícil el predecir donde, cuando y cuanta precipitación se tendrá en un lugar específico, tampoco la duración que tendrá dicha precipitación. Es por esto que se necesita de un simulador de lluvia para poder de forma artificial generar las condiciones óptimas y poder controlar algunos parámetros para realizar experiencias de las cuales se puedan obtener datos confiables, además de esto, si es posible controlar los parámetros significa que se podrá repetir la experiencia, esto implica el poder obtener datos y resultados más confiables.

Si bien existen diferentes tipos de simuladores de lluvia, ya sea por agua a presión o gravedad, para este estudio se construirá un sencillo simulador de 3,2 m de alto, para un área efectiva de 1m². Su materialización se enfocó en la economía, movilidad y simplicidad del montaje (Hernández, 2011).

El simulador de lluvia propuesto por Hernández se puede ver en la figura 6 y consta de 5 partes: 1) Manguera de alimentación; 2) Bifurcación; 3) Manómetro; 4) Estructura soportante; 5) Sistema de aspersion.



Figura 9. Simulador de lluvia

Fuente: Hernández 2011

3.2- Diseño de fuente de calor

Simular un incendio trae una serie de peligros, pero al estar realizando una experiencia a escala en un área controlada, no es imposible entregar altas temperaturas a un área reducida. Si bien para generar un incendio en un suelo cualquiera se necesita de vegetación, debido a que esta será la fuente de combustible para que el fuego se propague, pero al estar estudiando un suelo descubierto se deberá realizar una modificación a la experiencia para encontrar una forma de entregar calor al suelo, para esto se propone la utilización de carbón natural como principal fuente de temperatura.

3.2.1- Protección del lisímetro

El diseño de lisímetro propuesto por Riquelme en el 2010, está compuesto básicamente por estructuras de madera, esto impide el generar fuego sobre ella sin que esta salga dañada, para esto se propone utilizar papel aluminio (Figura 7) el cual cumplirá dos funciones, en primer lugar será un material de protección para el lisímetro, para que este no quede en contacto

directo con el fuego y así no se comprometa la estabilidad estructural, así también al ser un material conductor térmico, entregara el calor de forma homogénea por sobre toda la área superficial del suelo, simulando las ondas de calor que penetran la capa vegetal y llegan al suelo mineral.

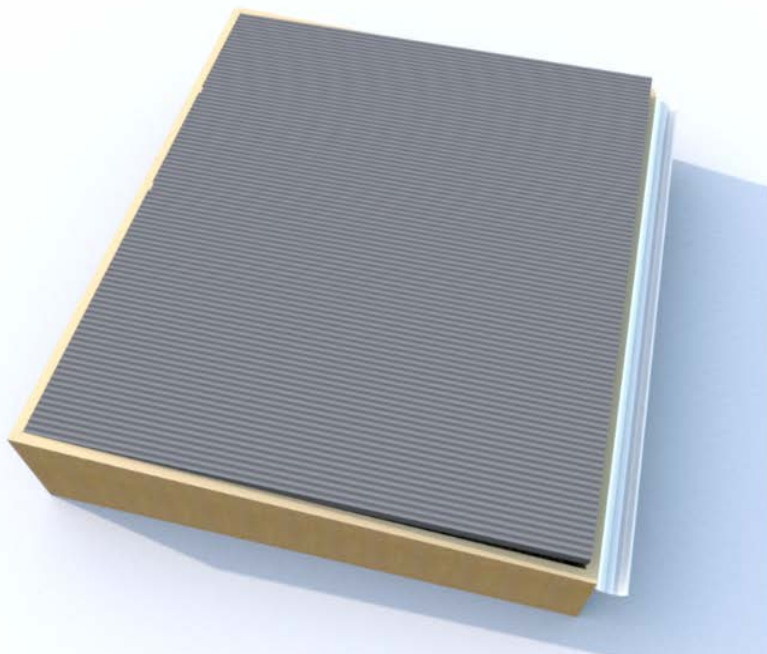


Figura 10. Papel aluminio cubriendo lisímetro

Fuente: Elaboración propia

3.2.2- Fuente de calor

En incendios forestales el principal combustible es la vegetación, si bien en este estudio se analizara un suelo descubierto, el combustible que se utilizara para generar calor será carbón vegetal, este alcanza temperaturas entre 400°C y 600°C, lo cual es ideal para el estudio que se realizara, debido a que el papel aluminio resiste temperaturas de hasta 650°C, esto ratifica que es un material idóneo para proteger el lisímetro y distribuir la temperatura por todo el suelo.

El carbón se preparará en un punto externo a los lisímetros cuando esté completamente encendido se procederá a esparcir por sobre todo el suelo de la forma más homogénea posible

(Figura 8), y se mantendrá sobre el suelo en distintos intervalos de tiempo para poder obtener resultados frente a diferentes tiempos de exposición al calor.

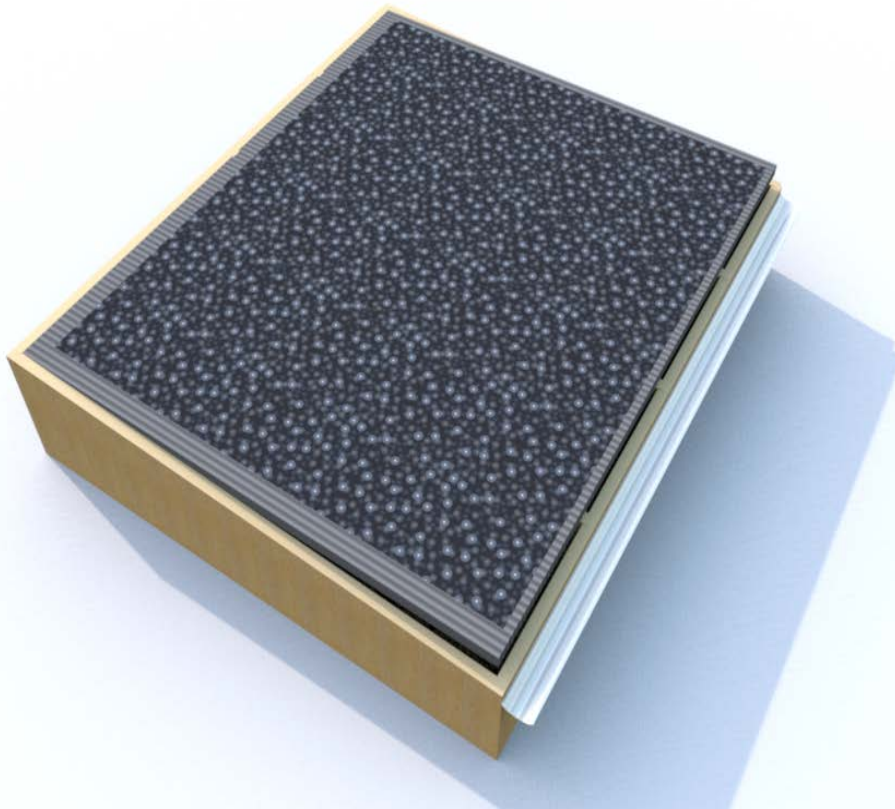


Figura 11. Carbón sobre papel aluminio

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4: ETAPA EXPERIMENTAL

La etapa experimental se realizó en la Universidad del Bío-Bío, en el laboratorio de geotecnia y medio ambiente (LAGEMA), bajo condiciones ambientales normales en meses de primavera, las muestras fueron procesadas en el laboratorio de suelos de la Universidad del Bío-Bío.

Se buscó definir procedimientos estandarizados, para que los resultados de las repeticiones fueran lo más homogéneos posible.

4.1- Obtención de suelo

Para realizar la experiencia se utilizó suelo tipo maicillo (Arena limosa), la cual se encontró en el sector oeste del gimnasio de la universidad (ver figura 11), se realizaron los ensayos correspondientes en laboratorio y las características del suelo utilizado son las siguientes:

Clasificación: Arena limosa (SM)

Dmcs: 2065 Kg/m³

Humedad: 16,98%



Figura 12. Extracción de suelo.

Fuente: Elaboración propia

4.2- Modificación de lisímetros

Los lisímetros utilizados se basan en el diseño de Riquelme (2010), en esta ocasión al ser la infiltración el parámetro crítico se utilizó el lisímetro de pendiente 5%, debido a que este es el que proporciona la mayor infiltración de los tres propuestos (Hernández, 2011). Las medidas del lisímetro fueron alteradas, se proponen lisímetros de 1x1 metro, en este caso el largo se mantiene y se ensancha en 20 centímetros quedando lisímetros de 1x1,2 metros, así también estos se subdividen en 4 al igual que los receptores de material erodado, las paredes divisoras de los lisímetros están cubiertas por fibrocemento, ya que este material permite aislar el calor para que cada celda no se vea afectada por la temperatura de su celda continua, como se ve en la figura 11.



Figura N°11. Modificaciones de lisímetros

Fuente: Elaboración propia

4.3- Método de compactación del suelo en lisímetros

La compactación de cada celda se realizó de forma manual por medio de un pisón que posee una masa de 9,8 kg y un área efectiva de $0,045\text{m}^2$ (ver figura 12), siguiendo la metodología de Hernández en 2011 se definió una cantidad de 200 golpes por capa para alcanzar niveles de compactación entre un 60% y 80% de la D_{mcs} (2065 Kg/m^3), dejando caer el pisón desde una altura de 30 cm. La metodología de compactación antes mencionada es válida para lisímetros de baja pendiente.



Figura 13: Compactación con pisón

Fuente: Elaboración propia

4.4- Extracción de testigos de suelo

Uno de los parámetros de estudio es la medición de la densidad antes y después de exponer el suelo al calor, debido a la cantidad de mediciones a realizar se optó por la metodología utilizada por Hernández en 2011 que consta de la utilización de tubos de PVC, dicha metodología posee un error de un 5%.

En cada repetición se registra una densidad de cada tipo de celda (Sin exposición, 15 minutos de exposición y 30 minutos de exposición).



Figura 14. Medidores de densidad

Fuente: *Hernández 2011*

4.5- Modificación sistema de lluvia

Realizando la metodología de confección de sistema de lluvia utilizado por Hernández en 2011, se precedió a modificar únicamente las dimensiones del sistema de lluvia debido a la previa modificación de las dimensiones de los lisímetros, pasando de unas dimensiones propuestas 1,2x1,2m a 1,2x1,4m dimensiones utilizadas en esta experiencia.

4.5.1- Calibración sistema de lluvia

El sistema de lluvia se utilizará para replicar una lluvia en específico, idealmente la ocurrida en Concepción en el año 2006, o parte de esta. Para ello se utilizará una presión de 1 bar y 5 minutos de duración.

Para obtener un dato real de la cantidad de lluvia producida por el sistema, se precedió a realizar mediciones de cantidad de agua caída mediante 12 vasos ubicados bajo el sistema de lluvia a una altura media de 20cm (ver figura 15), repitiendo esta medición en 5 ocasiones para obtener un resultado más confiable.



Figura 15. Calibración sistema de lluvia

Fuente: Elaboración propia

4.6- Exposición del suelo

Para realizar la experiencia de exponer el suelo al calor se estableció una metodología antes mencionada, el proceso de quema se realizó alternando los tiempos de exposición de cada celda utilizando la nomenclatura siguiente:

- 0: Suelo no expuesto directamente al calor.
- 1: Suelo expuesto durante 15 minutos al calor.
- 2: suelo expuesto durante 30 minutos al calor.

La distribución de las celdas se realizó alternando los tiempos de exposición entre cada cajón y entre cada repetición (ver figura 16), esto para evitar que las celdas siempre recibieran la misma exposición y así también que los resultados no se vieran afectados por la ubicación de la celda estudiada. La experiencia se realizó 8 veces por cada cajón.



Figura 16. Distribución de celdas y su tipo de exposición

Fuente: Elaboración propia

4.6.1 Quema de suelo

Para realizar la quema de suelo este se recubre con papel aluminio, posteriormente se enciende carbón en una parrilla para luego poder esparcir el carbón ya encendido sobre las celdas, la temperatura alcanzada por el carbón en su etapa de preparación en la parrilla es de 400°C, una vez sobre las celdas alcanza temperaturas de 350°C y ya terminando la experiencia pasado los 30 minutos baja a temperaturas de 300°C.



Figura 17. Procedimiento de quema de suelo

Fuente: Elaboración propia

4.7- Simulación de lluvia

Posterior a la quema del suelo se posiciona sobre cada lisímetro el sistema de lluvia, este generara una lluvia de 5 minutos de duración y utilizando 1 bar en el sistema, se conecta la manguera al sistema de alimentación y se comienza a registrar el tiempo una vez cae la primera gota sobre el lisímetro, una vez terminada la experiencia se desconecta inmediatamente la manguera para liberar la presión dentro del sistema.

4.7.1 Recepción de material y escorrentía

Simultánea a la simulación de lluvia se está recepcionando material erodado mediante canaletas plásticas ubicadas en el frente del lisímetro y escorrentía superficial mediante botellas plásticas conectadas mediante una manguera a las canaletas.

Debido a que las celdas son de un ancho pequeño se realizaron pequeñas canaletas, las cuales al no quedar completamente pegadas al lisímetro el borde superior se rellenó con papel aluminio para permitir el paso del material erodado y la escorrentía superficial hacia la canaleta (ver figura 18).



Figura 18. Recepción de material erodado y escorrentía superficial

Fuente: Elaboración propia

4.8- Re perfilar lisímetros

Luego de realizada la quema y posterior simulación de lluvia a cada lisímetro, se procede a quitar la capa superior de suelo a una profundidad de 4cm (ver figura 19) para ubicar en su lugar un suelo con características similares a las iniciales, esto se realiza después de cada repetición. Para obtener las densidades necesarias, el nuevo suelo se coloca en dos capas de 2cm cada una, con el mismo proceso de compactación inicial pero esta vez dando únicamente 50 golpes por capa.



Figura 19. Reperfilación de lisímetro

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se exponen y posteriormente discuten los resultados y observaciones acerca de los efectos que produce el fuego a taludes compuestos de suelo tipo arena limosa. Dichos resultados fueron obtenidos mediante una serie de ensayos realizados sobre lisímetros diseñados por Riquelme 2010.

5.1- Precipitación simulada

Luego de la calibración del sistema de lluvia y realizando las mediciones en 5 ocasiones se registran resultados similares en cada medición, donde se obtiene un registro promedio de 24,1 mm/vaso y una intensidad promedio de 289,7 mm/hr. Los resultados obtenidos son reflejados en la tabla N°1, para mayor detalle ver Anexo A.

	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	General
Altura promedio(mm)	23,8	24,8	26,1	23	23	24,1
Intensidad Promedio(mm/hr)	285,6	297,8	313,4	276	276	289,7

Tabla 1. Registro de precipitaciones

Fuente: Elaboración propia

5.2- Análisis visual del suelo quemado

Posterior a la experiencia de quemar las distintas celdas según un tiempo de exposición previamente establecido se procedió a realizar la primera inspección visual de los efectos del fuego sobre un suelo descubierto (ver figura 20)



Figura 20. Inspección visual del suelo quemado

Fuente: Elaboración propia

Como primera fuente de información se pudo ver que efectivamente algo sucede en el suelo al exponerlo al fuego, en zonas se noto una pérdida de humedad al encontrar suelo más claro y seco en la superficie, en otras zonas enrojecimiento en partes de la celda, si bien no entrega información suficiente para realizar un veredicto, si se puede decir que visualmente el suelo se ve afectado por el calor.

5.3- Variación de densidades

Para obtener la variación de densidades de las celdas con distintas exposiciones se realizaron mediciones antes y después de realizar la quema del suelo los resultados se muestran a continuación para cada caso (ver figura 20).

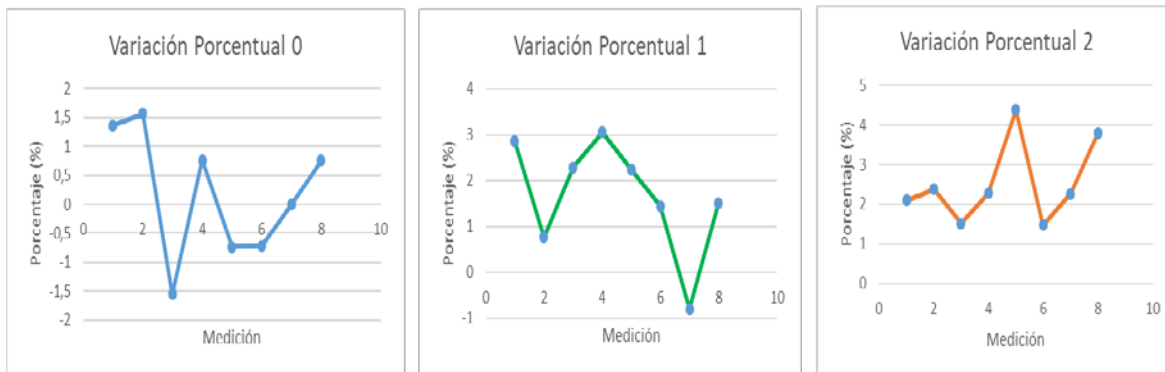


Figura 21. Variación porcentual de densidad en celdas según su exposición

Fuente: Elaboración propia

La variación de humedad en promedio es de un 0,3%; pero las densidades en general se ven aumentadas salvo en el caso de exposición 0 en el cual se ven registros de disminución de las densidades, en general en las celdas estudiadas con exposición tipo 0 la densidad se ve aumentada en promedio en un 0,18% con una desviación de 1,04%; para el caso de celdas con exposición tipo 1 la densidad se ve aumentada en promedio en un 1,67% con una desviación de 1,17% y finalmente las celdas con exposición tipo 2 la densidad se ve aumentada en promedio en un 2,52% y una desviación de 0,98% (ver Anexo B).

Con esto se puede ver que en general la densidad del suelo se ve aumentada a pesar de que disminuye la humedad, los valores máximos alcanzados de variación son -1,55 y +4,38; los resultados obtenidos mediante esta metodología de extracción de testigos poseen un error de casi un 5% (Hernández 2011), lo que significa que todos los datos obtenidos quedan dentro del rango de error de la medición con este tipo de metodología, esto no permite concluir en base a estos resultados, debido a que también la reducción en la humedad es baja para alterar considerablemente las densidades.

5.4- Escorrentía superficial

Para analizar la variación de escorrentía superficial según el tiempo de exposición de cada celda, se separó cada receptor de lluvia para que el escurrimiento de cada celda no afectará a su aledaña, los resultados de escorrentía se muestran en la figura 21.

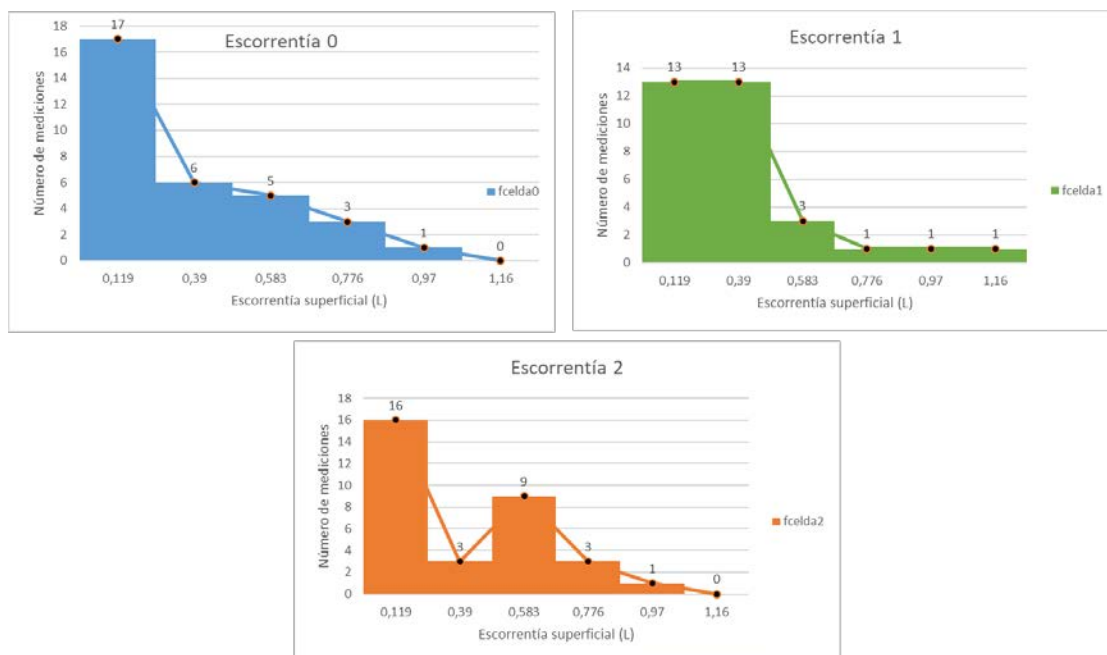


Figura 22. Escorrentía superficial en celdas según su exposición

Fuente: Elaboración propia

Al comparar las gráficas no se ven grandes diferencias entre sí, pero si se analiza más en profundidad se puede ver que en las celdas que no están expuestas a calor las escorrentías se mantienen en torno a los 0,2 (L) teniendo picos superiores a 0,6 (L); por otra parte las celdas de exposición 1 de igual manera presentan picos superiores a los 0,6 (L) pero su escorrentía se concentra cercana a los 0,3 (L); finalmente las celdas de exposición 2 presentan concentraciones cercanas a 0,2(L) pero en este caso la cantidad de mediciones que supera los 0,6 (L) es considerablemente mayor.

Mirando la tendencia (ver figura 22) de las escorrentías se puede ver que la variación existe pero no se ve tan claramente de forma gráfica, pero si se revisan las escorrentías promedio se encuentra un aumento en las celdas que se encontraron expuestas al calor, obteniendo así en las celdas de exposición 0 una media de 0,37 (L) y una desviación de 0,22 (L); en las celdas de exposición 1 se obtiene una media de 0,38 (L) y una desviación de 0,25 (L), finalmente con la celdas de exposición 2 se ve un aumento aun mayor llegando a una media de 0,42 (L) y desviación de 0,23(L).

Con esto se puede ver un aumento de un 1% en la escorrentía de las celdas de exposición 1 respecto a las celdas de exposición 0, y un aumento de un 9,7% en la escorrentía de celdas con exposición 2 respecto a celdas de exposición 0.

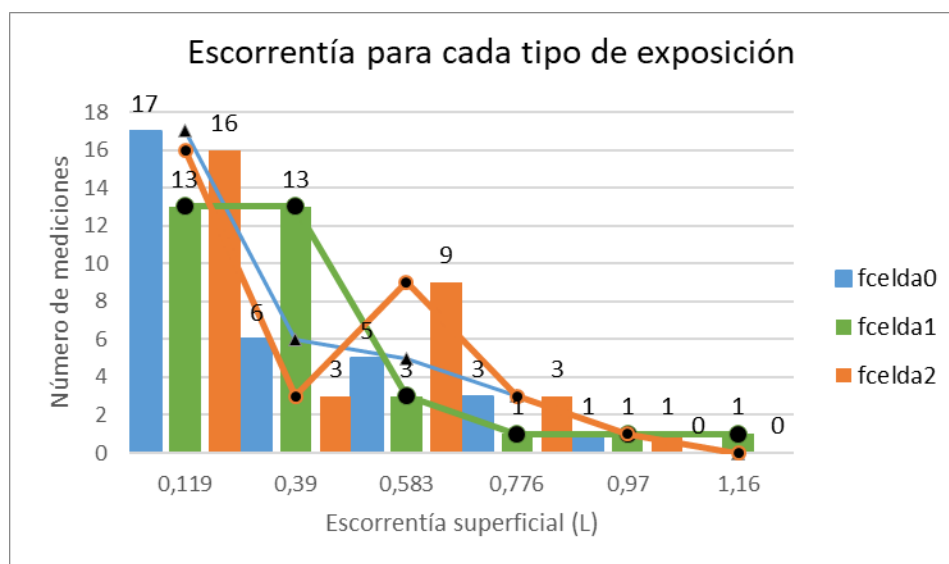


Figura 23. Comparación de tendencias de escorrentía para cada exposición

Fuente: Elaboración propia

5.5- Material erodado

El material erodado lo componen dos fuentes, en primer lugar se encuentra el material erodado recepcionado por las canaletas, al cual se le determino su humedad promedio para así obtener los resultados correspondientes al material erodado seco, por otra parte se encuentra el material erodado que es recepcionado por la botella que contiene la escorrentía superficial, para poder determinar la cantidad de material erodado presente en la escorrentía, esta se pesa y luego se mide en litros, para finalmente hacer la relación con el peso específico del agua y poder determinar el material erodado presente en la escorrentía, permitiendo así obtener el material erodado total por cada celda independiente su tipo de exposición al calor, los resultados de material erodado se muestran en la figura 23.

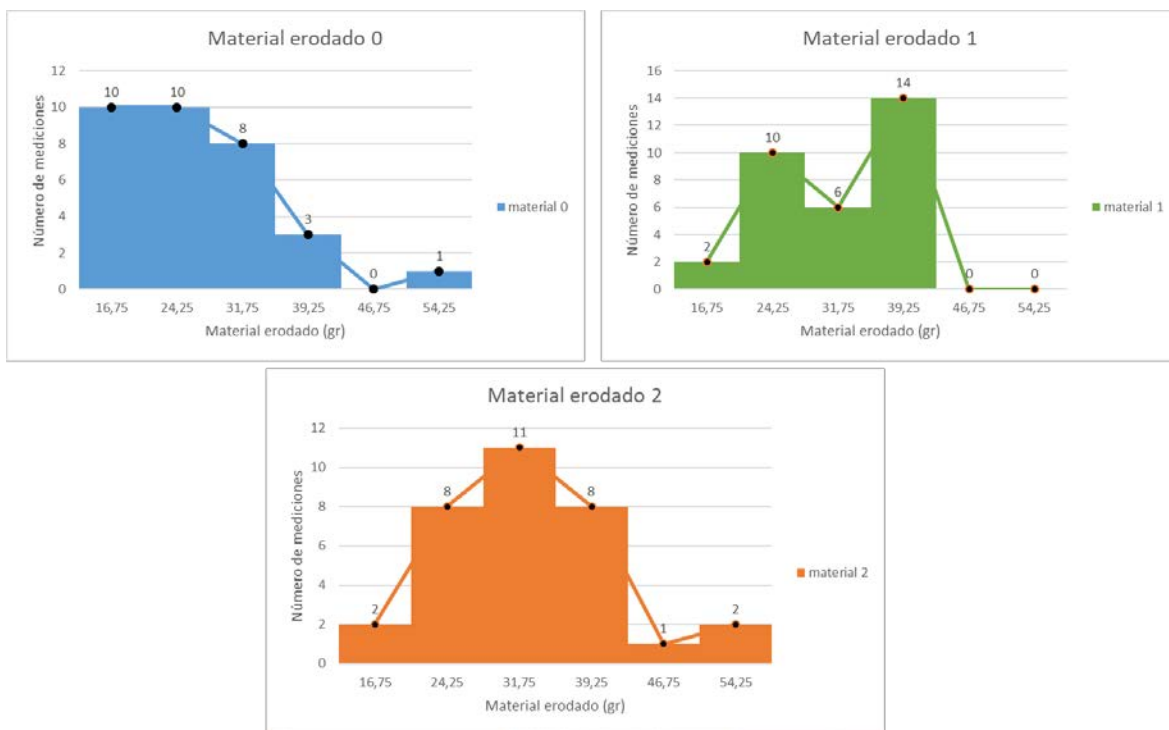


Figura 24. Material erodado en celdas según su exposición

Fuente: Elaboración propia

El material erodado aumenta al igual que la escorrentía en las celdas expuestas al calor, las celdas de exposición 0 poseen cantidades de materia erodado entorno a los 25 (gr), mientras que las celdas de exposición 1 y 2 llegan a cantidades en torno a 30 (gr) y 35 (gr) respectivamente.

Si se analiza la tendencia de material erodado por cada tipo de celda se obtiene una clara superioridad de las celdas de exposición 1 y 2 (ver figura 24), en un análisis estadístico se obtiene que las celdas de exposición 0 obtienen una media de material erodado de 25,6 (gr) y una desviación de 8,9 (gr); las celdas de exposición 1 alcanzan una media de 32,2 (gr) y una desviación de 7,5 (gr), finalmente las celdas de exposición 2 poseen una media de 33,3 (gr) y una desviación de 9 (gr).

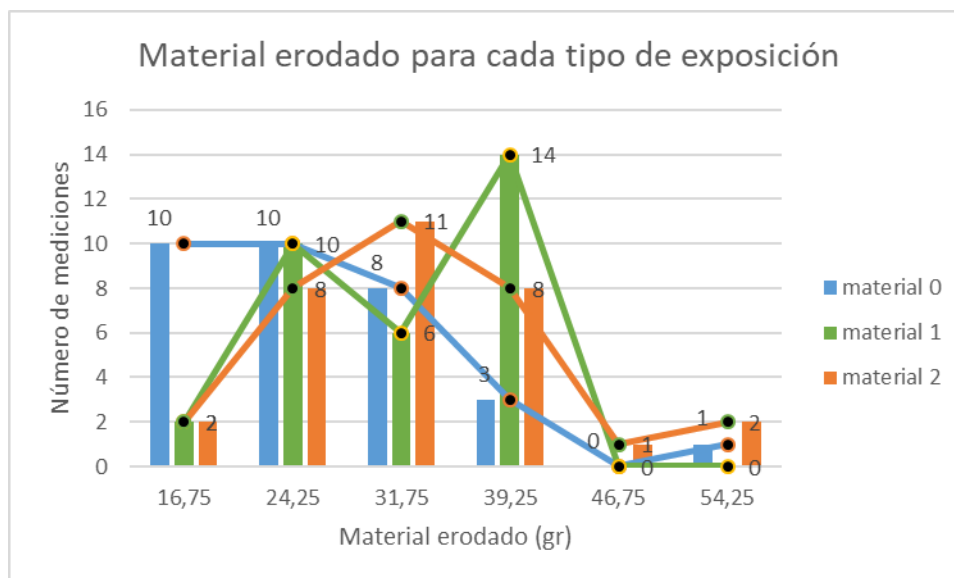


Figura 25. Comparación de tendencias de material erodado para cada exposición

Fuente: Elaboración propia

Si bien el material erodado de las celdas expuestas a calor aumenta en relación a las celdas que no poseen exposición directa, la variación entre la celdas de exposición 1 y 2 es baja, lo cual da a entender que el material erodado aumenta en suelos quemados, pero no es influyente el tiempo de exposición al fuego, a pesar de que el material erodado sigue aumentando con el paso del tiempo de exposición, se deberá comparar con ensayos de mayor tiempo de exposición para ver si la duración es un factor determinante en la cantidad de material erodado.

5.6- Efecto borde

Del análisis anterior se puede observar un aumento en escorrentía y material erodado de las celdas expuestas al calor, pero si bien el procedimiento se realiza de forma estandarizada para cada celda, existe la posibilidad que los resultados tengan variación según la ubicación de la celda estudiada, para esto se realizó un análisis de borde con la finalidad de comparar los resultados de las celdas de los extremos respecto a las celdas centrales.

5.6.1- Efecto borde escorrentía superficial

El sistema de lluvia fue previamente calibrado para lograr resultados homogéneos, la uniformidad de la distribución alcanza un 60% lo que implica que existen zonas dispares en cuanto a recepción de lluvia se refiere.

	Celda Izquierda(I)	Celda Central Izquierda(CI)	Celda Central Derecha (CD)	Celda Derecha (D)	Celdas I-D	Celdas CI-CD
Escorrentía promedio (L)	0,417	0,639	0,299	0,23	0,323	0,469

Tabla 2. Escorrentía superficial promedio por celda

Fuente: Elaboración propia

La escorrentía superficial es menor en las celdas central derecha y derecha, siendo la celda central izquierda la que posee mayores registros de escorrentía seguida por la celda izquierda; si bien el sistema esta previamente calibrado, la uniformidad alcanzada es de un 60%, esto explica en parte la diferencia entre celdas, no obstante no explica que la escorrentía se centre principalmente en la zona izquierda, este fenómeno se ve atribuido por los vientos presentes los días de ensayo, los cuales alcanzaron velocidades máximas de 24 km/hr y dirección Noroeste (Meteored, 2019), estos datos contrastados con la ubicación de los lisímetros desprende el factor faltante para la disparidad de mediciones de escorrentía.

La diferencia de escorrentía entre las celdas externas en comparación a las internas es de un 31% más de escorrentía en las celdas internas, ahora la diferencia de escorrentía entre la celda con mayor recepción y la de menor recepción alcanza un 64%.

5.6.2- Efecto borde material erodado

El material erodado se compone del material almacenado por las canales más el material obtenido de la recepción de escorrentía superficial.

	Celda Izquierda (I)	Celda Centro Izquierda (CI)	Celda Centro Derecha (CD)	Celda Derecha (D)	Celdas I-D	Celdas CI-CD
Material erodado promedio (gr)	31,46	34,46	29,92	26,96	29,21	32,19

Tabla 3. Material erodado promedio por celda

Fuente: Elaboración propia

A diferencia de la escorrentía superficial, la cantidad de material erodado por celda no difiere mucho según la ubicación de la celda, esto demuestra una homogeneidad en las mediciones, tanto en la metodología de recepción de material erodado como a la preparación previa ya sea por medio de compactación o lluvias generadas.

La diferencia entre los registros obtenidos de celdas externas respecto a celdas internas es de un 9%, por otra parte, la diferencia de material erodado medido en la celda de mayor registro respecto a la de menor es de un 22%, lo cual arroja resultados con menor dispersión en comparación a la escorrentía superficial.

5.7- Relación de material erodado y escorrentía superficial

La finalidad de esta experiencia es encontrar de qué manera se ve afectado el suelo al exponerse a las altas temperaturas producidas por un incendio, dentro de los parámetros estudiados se encuentra el material erodado y la escorrentía superficial, los cuales fueron medidos en diferentes condiciones arrojando los datos representados en la figura 25.

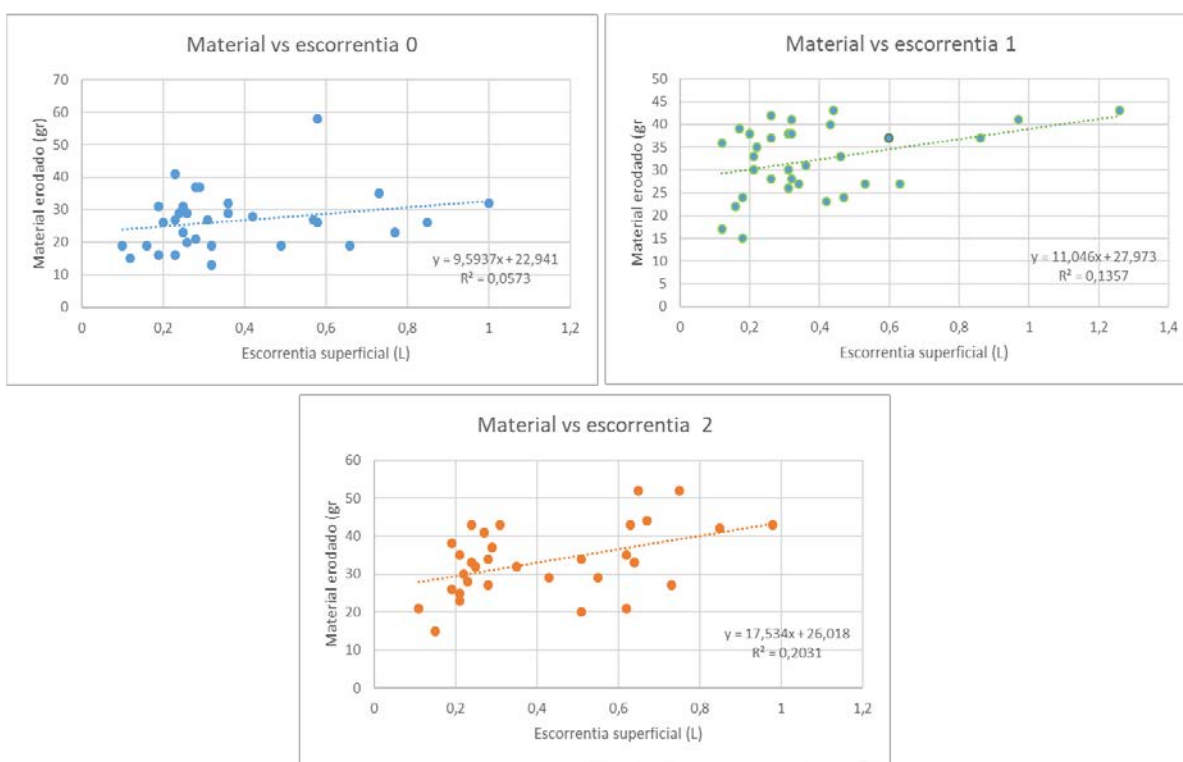


Figura 26. Material erodado versus escorrentía superficial según tiempo de exposición

Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre material erodado versus escorrentía superficial en las celdas de exposición 1 y 2 respecto a las celdas de exposición 0 es clara, existe un aumento al exponer el suelo al calor, la forma de las gráficas es similar, y hace necesario ver sus líneas de tendencia para poder ver la variación existente en los valores registrados (ver figura 26).

El impacto de las gotas de lluvia después del incendio puede romper los agregados, de manera que las fracciones más finas obturan los poros, modificando la porosidad. La respuesta de los agregados al paso del fuego es compleja de evaluar. En la literatura científica encontramos numerosos estudios en los que se dice que la estabilidad de agregados disminuye, sobre todo, por la pérdida de materia orgánica del suelo, pero también hay trabajos donde se ha observado un aumento de estos (Mataix-Solera y Doerr, 2004; Arcenegui et al., 2008) por diferentes razones. En algunos trabajos se ha observado un aumento de agregados a causa de un crecimiento de la materia orgánica en incendios de intensidad baja.

En otros estudios se ha observado que las fusiones térmicas que se producen en determinados tipos de suelos con una proporción importante de óxidos y de hidróxidos de hierro y aluminio en su fracción arcilla pueden incrementar la estabilidad de los agregados. Además, la presencia de sustancias hidrofóbicas generadas durante la combustión puede producir un aumento de la estabilidad de agregados, ya que actúan como una fina película que rodea parcial o totalmente el agregado, y, por tanto, actúan también como sustancias cimentantes (Arcenegui et al., 2008). Por todo ello, la estabilidad de agregados es un parámetro sintético que permite cuantificar el efecto del incendio sobre la calidad del suelo (Arcenegui, 2011)

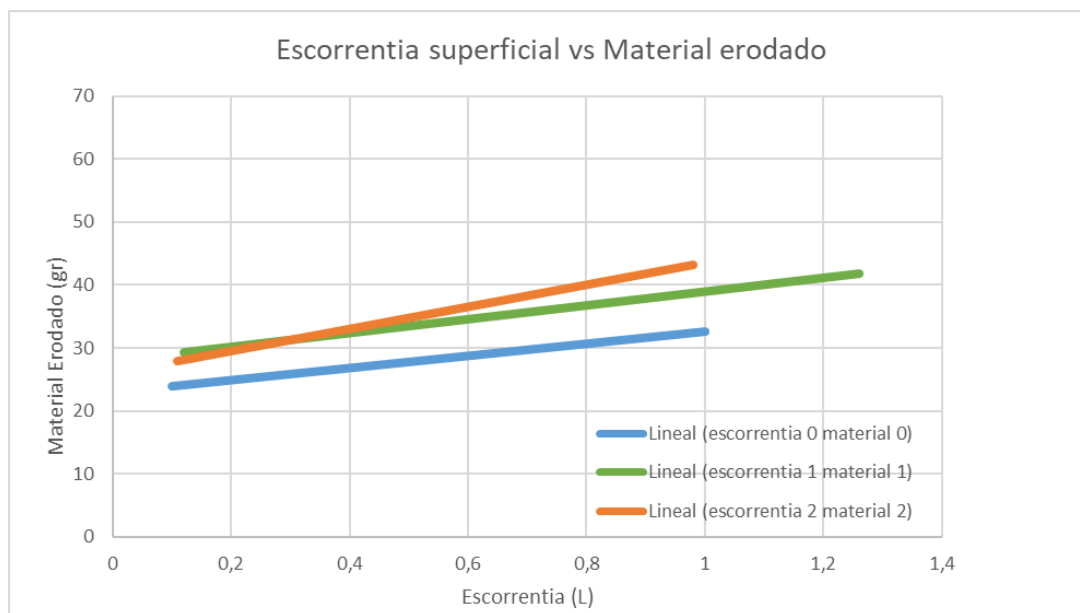


Figura 27. Comparación de tendencias material erodado vs escorrentía para cada exposición

Fuente: Elaboración propia

Existe un aumento en la relación escorrentía versus material erodado a medida aumenta el tiempo de exposición; a pesar de esto el material erodado no necesariamente aumenta con el aumento de escorrentía. Esto se debe a que no existe claridad respecto a que sucede internamente en el suelo, al ser expuesto al calor pierde humedad por lo que sus partículas superficiales quedarían sueltas para propiciar el posterior arrastre del agua; por otra parte al ser un lisímetro de baja pendiente no permite que la escorrentía superficial alcance velocidades suficientes para arrastrar partículas más grandes lo que explicaría el no aumento de material erodado respecto al aumento de escorrentía; existe también la posibilidad de que las partículas de suelo se aglomeren en la superficie al estar expuestas al calor conformando partículas más grandes que dificultan el ser arrastradas por el agua.

Si bien existen varias posibilidades para explicar los resultados obtenidos, no es posible decantarse por alguna debido a la falta de información respecto al tema.

5.8- Comparación con MUSLE

Luego de realizar numerosas mediciones se obtuvieron valores de escorrentía superficial y material erodado para diferentes casos, la finalidad de este punto es ver cuán próximo a los valores medidos in situ son las proyecciones de material erodado propuestas en MUSLE.

Las comparaciones de resultados obtenidos versus los proyectados están representadas en la figura 27.

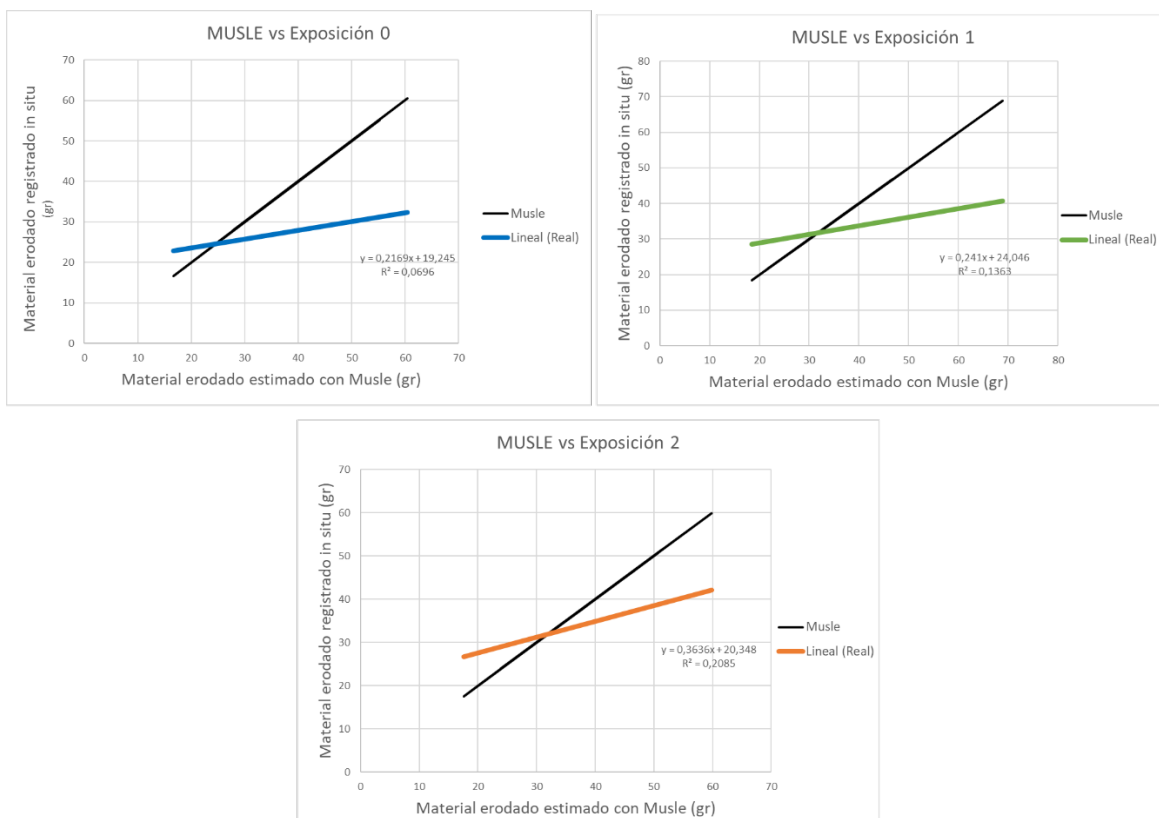


Figura 28. Comparación de proyección MUSLE con resultados obtenidos para cada exposición

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos reflejan que como bien señalo Hernández en 2011, el lisímetro de pendiente 5% se aproxima de buena manera a los resultados proyectados con MUSLE, esto en comparación a lisímetros de mayor pendiente.

En este caso en particular se analiza como se ve afectada la proyección de MUSLE para los diferentes casos de exposición del suelo, los parámetros utilizados se encuentran con mayor detalle en el Anexo C.

Para suelos que no han sido expuestos a altas temperaturas MUSLE proyecta menor cantidad de material erodado en comparación a la registrada in situ, lo mismo pasa en los tres casos de diferente exposición; por el contrario, para mayores escorrentías superficiales MUSLE proyecta cantidades de material erodado superiores a las registradas in situ, obteniendo menores diferencias a medida que el suelo esta expuesto durante mayor tiempo al calor. Las proyecciones realizadas respecto a los datos obtenidos entregan un error promedio de 28,9%

para celdas de exposición 0; 27,4% para celdas de exposición 1 y un 24% para celdas de exposición 2.

En comparación a los resultados obtenidos por Hernández, estos registros de datos y relación con MUSLE entregan un menor error, debido a que en sus mediciones encontró un error entre los valores medidos in situ versus los proyectados es de un 44%.

A medida que el tiempo de exposición del suelo ante el calor aumenta se hace más pequeña la diferencia respecto a la proyección de MUSLE, esto se debe principalmente a que dado lo estudiado con anterioridad el calor afecta en la cantidad de escorrentía superficial y material erodado de un talud.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La experiencia basada en la implementación de una metodología para quemar y posteriormente analizar los efectos del calor en el suelo, permiten realizar un análisis cuantitativo en cuanto a densidades, escorrentía superficial y material erodado se refiere.

6.1- Con respecto a densidad y propiedades del suelo

El calor efecto las propiedades del suelo, y esto se ve reflejado visualmente debido a las variaciones del aspecto del suelo, así también como en su composición estructural, basándonos en la variación de los parámetros medidos.

No se puede realizar un análisis en cuanto a los efectos del calor sobre la densidad de un suelo se refiere, debido principalmente a la metodología utilizada para realizar esta experiencia, pero al encontrarse los datos dentro de un rango de error de un 5% no se considera relevante esta medición en el estudio; dicho esto se recomienda para quienes si quieren estudiar este fenómeno, la utilización de una metodología más exacta como el ensayo del cono de arena para la obtención de las densidades.

6.2- Con respecto a la cantidad de suelo erodado

El calor produce un aumento en la erosión del suelo, esto se ve reflejado en un aumento del material erodado, específicamente un 17% para celdas de exposición 1 y un 20% para celdas de exposición 2 respecto a celdas de exposición 0; así también la escorrentía superficial se ve afectada, debido a que se registran aumentos de alrededor de 1% y 10% para celdas de exposición 1 y 2 respectivamente, en comparación a celdas de exposición 0.

Al realizar el análisis escorrentía superficial versus material erodado, se ve un aumento en las celdas expuestas al calor, pero no se puede concluir en relación al tipo de comportamiento que presentan los datos debido a la poca información que se tiene del tema, existen estudios que no llegan a acuerdo respecto a lo que le sucede al suelo, es por esto que, si bien se presenta un aumento en las variables medidas, no es posible atribuir estos resultados a algo en concreto.

El material erodado medido se aproxima de buena manera a la proyección realizada por MUSLE, el error entre los datos medidos in situ y la proyección alcanza en promedio un 27%, con respecto a la proyección MUSLE se puede decir que subestima e escorrentías bajas y sobreestima en escorrentías altas, en comparación a los datos medidos.

6.2- Con respecto a la influencia del fuego en la erosión de taludes

Existe un aumento claro en la erosión de taludes expuestos a altas temperaturas, específicamente un aumento de un 17% para suelos expuestos a 15 minutos de calor y un aumento de un 20% para suelos expuestos a 30 minutos de calor, todo esto respectos a un mismo tipo de suelo sin ser expuesto al calor.

Así también al obtener un aumento de escorrentía superficial en suelos expuestos a altas temperaturas, se puede concluir que efectivamente el parámetro crítico de estudio en suelos quemados es la infiltración, la infiltración del suelo se ve disminuida con el calor lo que produce un aumento en la escorrentía superficial debido a que la cantidad de agua precipitada supera en mayor cantidad a la capacidad de succión que posee un suelo al no estar quemado. Con la finalidad de aumentar el conocimiento respecto a este tema se propone un análisis con tiempos de exposición mayores, para ver de forma más clara la variación de los parámetros para distintos tiempos de exposición; así también un estudio para entender que pasa química y estructuralmente con el suelo al ser quemado.

BIBLIOGRAFÍA

- Riquelme C. (2010). “Diseño de lisímetros para estudiar la erosión hídrica en taludes a escala”. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
- Hernández C: (2011). “influencia de la pendiente y la precipitación en la erosión de taludes desprotegidos”. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
- DeBano, L. F. (1991). The effect of fire on soil properties. In: Harvey, Alan E.; Neuenschwander, Leon F., compilers. Proceedings-management and productivity of western-montane forest soils; 1990 April 10-12; Boise, ID. Gen. Tech. Rep. INT-280. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. p. 151-156., 280, 151-156.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143(1), 1-10.
- DeBano, L. F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of hydrology*, 231, 195-206.
- Arcenegui, V., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mayoral, A. M., & Morales, J. (2007). Factors controlling the water repellency induced by fire in calcareous Mediterranean forest soils. *European Journal of Soil Science*, 58(6), 1254-1259.
- Badia, D., & Marti, C. (2008). Fire and rainfall energy effects on soil erosion and runoff generation in semi-arid forested lands. *Arid Land Research and Management*, 22(2), 93-108.
- Arcenegui, V., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mataix-Beneyto, J., & García-Orenes, F. (2008). Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena*, 74(3), 219-226.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143(1), 1-10.
- CONAF. (2019). Estadísticas históricas. 26/08/2019, de CONAF Sitio web: <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>

- ONEMI. (2019). Alertas. 26/08/2019, de ONEMI Sitio web: <https://www.onemi.gov.cl/alertas/anio/2019/mes/08/>
- Valverde-Ruiz, E. A. (2010). Análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y la estabilidad de un talud.
- García J. (1999). La erosión hídrica: Mecanismos y modelos. Curso: Evaluación y Control de erosión. España.

Anexo A

La pluviosidad se caracterizó a través de los coeficientes que señalados a continuación.

A.1- Uniformidad de Distribución (UD)

Este término fue introducido por Merriam y Keller en 1978, y podemos definirlo como:

$$UD(\%) = \frac{\text{altura media de agua recogida en el 25\% del área menos regada} \times 100}{\text{Altura media de agua recogida}}$$

Normalmente, el aplicar riegos que produzcan ligeros déficits en las zonas menos regadas, por falta de uniformidad, suelen conducir al óptimo económico. Así, para cultivos de valor medio o alto se tiende a que la altura media de agua aplicada (dosis neta) sea igual al "déficit permisible de manejo (DPM)" o que coincida con la media del 25% del área menos regada. De esta forma, sólo el 12,5% del área estará infrarregada.

A.2- Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU)

El Coeficiente de Uniformidad fue desarrollado por Christiansen (1942). Es una representación estadística de la uniformidad, utilizado principalmente en los sistemas de aspersión; es el parámetro de uniformidad de uso más generalizado. En sistemas de riego por aspersión estacionario se recomiendan valores de CU mayores al 80% (aunque depende de la velocidad del viento (Tarjuelo 1995, Tarjuelo et al 1992). Se expresa en % mediante la expresión siguiente:

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum |x - \bar{x}|}{\sum x} \right)$$

Donde:

x = altura de agua recogida por cada pluviómetro.

\bar{x} = altura media de agua recogida en el total de los pluviómetros.

n = número total de pluviómetros que intervienen en la evaluación.

A.3- Coeficiente de Variación (CV)

Es el cociente entre la desviación estándar y la media aritmética, muestra para bajos valores una alta concentración de los datos. Su expresión es dada por:

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}}$$

Donde, son la media y la desviación estándar, respectivamente, para una misma población.

En ocasiones se suele presentar la información mediante el por ciento, sobre todo al momento de comparar dos muestras, por lo que el coeficiente suele presentarse como:

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100$$

Su utilidad radica en que podemos determinar la variabilidad existe entre dos muestras en las que inclusive las informaciones no tienen las mismas unidades.

A.4- Resultados

A continuación, se muestran los registros utilizados para la calibración del sistema de lluvia.

vaso	medición 1	medición 2	medición 3	medición 4	medición 5
1	26	24	25	19	21
2	17	26	26	16	18
3	17	16	13	14	16
4	18	22	26	26	16
5	65	13	22	26	28
6	16	18	26	66	65
7	24	16	21	21	17
8	42	55	61	19	38
9	17	55	37	31	16
10	16	21	18	12	14
11	15	16	23	14	16
12	13	16	16	12	12
promedio (mm)	23,8	24,8	26,2	23	23
intensidad (mm/hr)	285,6	297,6	313,2	276	276

	medición 1	medición 2	medición 3	medición 4	medición 5
UD	61,54	60,4	59,87	55,07	60,65
CU	56,88	59,28	70,91	58,69	55,42
CV	0,61	0,56	0,46	0,62	0,62

Anexo B

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la medición de densidad antes y después de realizada la experiencia, los resultados son divididos según el tipo de exposición que tuvieron.

Dada la metodología empleada, todos los resultados aquí presentados poseen un porcentaje de error de hasta un 5%.

B.1- Resultados

caso	exposición	Dinicial	%dmcs	Dfinal	%variación
1	0	1,45	70,2179177	1,47	1,36054422
2	0	1,26	61,0169492	1,28	1,5625
3	0	1,31	63,4382567	1,29	-1,5503876
4	0	1,3	62,9539952	1,31	0,76335878
5	0	1,38	66,8280872	1,37	-0,72992701
6	0	1,41	68,2808717	1,4	-0,71428571
7	0	1,28	61,9854722	1,28	0
8	0	1,32	63,9225182	1,33	0,7518797
				promedio	0,1804603
				desviación	1,03843021

caso	exposición	Dinicial	%dmcs	Dfinal	%variacion	
1	1	1,36	65,8595642	1,4	2,85714286	
2	1	1,3	62,9539952	1,31	0,76335878	
3	1	1,28	61,9854722	1,31	2,29007634	
4	1	1,27	61,5012107	1,31	3,05343511	
5	1	1,31	63,4382567	1,34	2,23880597	
6	1	1,36	65,8595642	1,38	1,44927536	
7	1	1,27	61,5012107	1,26	-0,79365079	
8	1	1,3	62,9539952	1,32	1,51515152	
					promedio	1,67169939
					desviación	1,17236319

caso	exposición	Dinicial	%dmcs	Dfinal	%variacion	
1	2	1,4	67,7966102	1,43	2,0979021	
2	2	1,23	59,5641646	1,26	2,38095238	
3	2	1,3	62,9539952	1,32	1,51515152	
4	2	1,29	62,4697337	1,32	2,27272727	
5	2	1,31	63,4382567	1,37	4,37956204	
6	2	1,33	64,4067797	1,35	1,48148148	
7	2	1,3	62,9539952	1,33	2,2556391	
8	2	1,27	61,5012107	1,32	3,78787879	
					promedio	2,52141183
					desviación	0,96709903

Anexo C

A continuación, se presentan los parámetros y resultados obtenidos, en la comparación de resultados medidos in situ y los proyectados por MUSLE.

C.1- Resultados exposición 0

ensayo	Q(m3)	qp(m3/s)	k	ls	c	p	Y(gr)	material 0	error
1	0,00029	0,0001101	0,4	0,101	1	1	30,2	37	0,22
2	0,0001	0,0001101	0,4	0,101	1	1	16,66	19	0,14
3	0,0002	0,0001101	0,4	0,101	1	1	24,56	26	0,06
4	0,001	0,0001101	0,4	0,101	1	1	60,49	32	0,47
5	0,00025	0,0001101	0,4	0,101	1	1	27,82	23	0,17
6	0,00073	0,0001101	0,4	0,101	1	1	50,71	35	0,31
7	0,00058	0,0001101	0,4	0,101	1	1	44,58	58	0,3
8	0,00016	0,0001101	0,4	0,101	1	1	21,67	19	0,12
9	0,00036	0,0001101	0,4	0,101	1	1	34,13	32	0,06
10	0,00032	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,95	13	0,59
11	0,00012	0,0001101	0,4	0,101	1	1	18,45	15	0,19
12	0,00023	0,0001101	0,4	0,101	1	1	26,56	41	0,54
13	0,00042	0,0001101	0,4	0,101	1	1	37,21	28	0,25
14	0,00023	0,0001101	0,4	0,101	1	1	26,56	27	0,02
15	0,00032	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,95	19	0,41
16	0,00085	0,0001101	0,4	0,101	1	1	55,22	26	0,53
17	0,00036	0,0001101	0,4	0,101	1	1	34,13	29	0,15
18	0,00058	0,0001101	0,4	0,101	1	1	44,58	26	0,42
19	0,00049	0,0001101	0,4	0,101	1	1	40,56	19	0,53
20	0,00019	0,0001101	0,4	0,101	1	1	23,86	16	0,33
21	0,00028	0,0001101	0,4	0,101	1	1	29,65	37	0,25
22	0,00028	0,0001101	0,4	0,101	1	1	29,65	21	0,29
23	0,00023	0,0001101	0,4	0,101	1	1	26,56	16	04
24	0,00019	0,0001101	0,4	0,101	1	1	23,86	31	0,3
25	0,00026	0,0001101	0,4	0,101	1	1	28,44	20	0,7
26	0,00026	0,0001101	0,4	0,101	1	1	28,44	29	0,02
27	0,00024	0,0001101	0,4	0,101	1	1	27,20	29	0,07
28	0,00077	0,0001101	0,4	0,101	1	1	52,25	23	0,56
29	0,00031	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,39	27	0,14
30	0,00066	0,0001101	0,4	0,101	1	1	47,93	19	0,6
31	0,00057	0,0001101	0,4	0,101	1	1	44,15	27	0,39
32	0,00025	0,0001101	0,4	0,101	1	1	27,83	31	0,11

C.2- Resultados exposición 1

ensayo	Q(m3)	qp(m3/s)	k	ls	c	p	Y(gr)	material 1	error
1	0,00126	0,0001101	0,4	0,101	1	1	68,84	43	0,38
2	0,0002	0,0001101	0,4	0,101	1	1	24,56	38	0,55
3	0,00012	0,0001101	0,4	0,101	1	1	18,45	17	0,08
4	0,00063	0,0001101	0,4	0,101	1	1	46,7	27	0,42
5	0,00031	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,39	26	0,17
6	0,00012	0,0001101	0,4	0,101	1	1	18,45	36	0,95
7	0,00021	0,0001101	0,4	0,101	1	1	25,24	30	0,19
8	0,00043	0,0001101	0,4	0,101	1	1	37,71	40	0,06
9	0,00022	0,0001101	0,4	0,101	1	1	25,91	35	0,35
10	0,00046	0,0001101	0,4	0,101	1	1	39,16	33	0,16
11	0,00031	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,39	30	0,04
12	0,00018	0,0001101	0,4	0,101	1	1	23,15	15	0,35
13	0,00086	0,0001101	0,4	0,101	1	1	55,59	37	0,33
14	0,00026	0,0001101	0,4	0,101	1	1	28,45	37	0,3
15	0,00018	0,0001101	0,4	0,101	1	1	23,15	24	0,04
16	0,00053	0,0001101	0,4	0,101	1	1	42,39	27	0,36
17	0,00036	0,0001101	0,4	0,101	1	1	34,13	31	0,09
18	0,00026	0,0001101	0,4	0,101	1	1	28,45	42	0,48
19	0,00031	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,39	38	0,21
20	0,00047	0,0001101	0,4	0,101	1	1	39,63	24	0,39
21	0,00032	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,96	41	0,28
22	0,00032	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,96	28	0,12
23	0,00034	0,0001101	0,4	0,101	1	1	33,06	27	0,18
24	0,00016	0,0001101	0,4	0,101	1	1	21,68	22	0,01
25	0,00097	0,0001101	0,4	0,101	1	1	59,46	41	0,31
26	0,00032	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,96	38	0,19
27	0,00021	0,0001101	0,4	0,101	1	1	25,24	33	0,31
28	0,0006	0,0001101	0,4	0,101	1	1	45,44	37	0,19
29	0,00042	0,0001101	0,4	0,101	1	1	37,21	23	0,38
30	0,00017	0,0001101	0,4	0,101	1	1	22,42	39	0,74
31	0,00026	0,0001101	0,4	0,101	1	1	28,45	28	0,02
32	0,00044	0,0001101	0,4	0,101	1	1	38,19	43	0,13

C.3- Resultados exposición 2

ensayo	Q(m3)	qp(m3/s)	k	ls	c	p	Y(gr)	material 2	error
1	0,00023	0,0001101	0,4	0,101	1	1	26,56	28	0,05
2	0,00085	0,0001101	0,4	0,101	1	1	55,23	42	0,24
3	0,00021	0,0001101	0,4	0,101	1	1	25,24	25	0,01
4	0,00051	0,0001101	0,4	0,101	1	1	41,49	20	0,52
5	0,00073	0,0001101	0,4	0,101	1	1	50,71	27	0,47
6	0,00055	0,0001101	0,4	0,101	1	1	43,28	29	0,33
7	0,00011	0,0001101	0,4	0,101	1	1	17,57	21	0,2
8	0,00015	0,0001101	0,4	0,101	1	1	20,91	15	0,28
9	0,00098	0,0001101	0,4	0,101	1	1	59,81	43	0,28
10	0,00019	0,0001101	0,4	0,101	1	1	23,87	38	0,59
11	0,00022	0,0001101	0,4	0,101	1	1	25,91	30	0,16
12	0,00024	0,0001101	0,4	0,101	1	1	27,2	43	0,58
13	0,00035	0,0001101	0,4	0,101	1	1	33,6	32	0,05
14	0,00065	0,0001101	0,4	0,101	1	1	47,52	52	0,09
15	0,00025	0,0001101	0,4	0,101	1	1	27,83	32	0,15
16	0,00062	0,0001101	0,4	0,101	1	1	46,28	35	0,24
17	0,00064	0,0001101	0,4	0,101	1	1	47,11	33	0,3
18	0,00062	0,0001101	0,4	0,101	1	1	46,28	21	0,55
19	0,00021	0,0001101	0,4	0,101	1	1	25,24	35	0,39
20	0,00021	0,0001101	0,4	0,101	1	1	25,24	23	0,09
21	0,00075	0,0001101	0,4	0,101	1	1	51,49	52	0,01
22	0,00031	0,0001101	0,4	0,101	1	1	31,39	43	0,37
23	0,00028	0,0001101	0,4	0,101	1	1	29,65	27	0,09
24	0,00024	0,0001101	0,4	0,101	1	1	27,2	33	0,21
25	0,00028	0,0001101	0,4	0,101	1	1	29,65	34	0,15
26	0,00067	0,0001101	0,4	0,101	1	1	48,34	44	0,09
27	0,00029	0,0001101	0,4	0,101	1	1	30,24	37	0,22
28	0,00043	0,0001101	0,4	0,101	1	1	37,71	29	0,23
29	0,00051	0,0001101	0,4	0,101	1	1	41,49	34	0,18
30	0,00063	0,0001101	0,4	0,101	1	1	46,7	43	0,08
31	0,00019	0,0001101	0,4	0,101	1	1	23,87	26	0,09
32	0,00027	0,0001101	0,4	0,101	1	1	29,06	41	0,41