

Máster en Ingeniería Agronómica

Curso Académico 2020-2021

Escuela Técnica de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

Evaluación de un suelo hidrofóbico tratado con un mejorador de suelo de uso agrícola frente a episodios de lluvia simulada



Autor: Raúl Serrano Hidalgo

Tutores: Sara Ibáñez Asensio y Héctor Moreno Ramón

Evaluación de un suelo hidrofóbico tratado con un mejorador de suelo de uso agrícola frente a episodios de lluvia simulada

Los incendios forestales son causantes de transformaciones súbitas en el ecosistema en el que ocurren, provocando profundas alteraciones tanto en la vegetación como en el suelo. Las altas temperaturas que se alcanzan en los primeros centímetros del suelo al ser afectado por fuegos de media y alta intensidad pueden ocasionar modificaciones tanto en sus propiedades físicas como en las químicas y biológicas, fomentando la erosión hídrica que ya era promovida por la desaparición de la cubierta vegetal. Una de las propiedades que más se modifica es la conductividad hidráulica debido a la degradación de los agregados entre partículas, la pérdida de materia orgánica y la aparición de hidrofobicidad. La hidrofobicidad, que es fruto de la degradación de los restos vegetales y la transformación de algunas moléculas orgánicas previamente presentes en el suelo, hace que el suelo sea repelente al agua, disminuyendo la infiltración y aumentando los procesos de erosión hídrica. Es por ello por lo que una medida de conservación del suelo frente a la degradación tras un incendio es el disminuir o eliminar la hidrofobicidad.

En el presente trabajo se ha evaluado un producto mejorador de uso agrícola de la empresa Optimasoil denominado Zytonic con este fin, puesto que entre los cambios que provoca en el suelo está el aumentar la capacidad de retención de agua. Para valorar si el producto es apto para este propósito se ha empleado un simulador de lluvia sobre el que se ha testado el comportamiento de un suelo normal (control); un suelo al que se le ha inducido una hidrofobicidad artificial mediante el producto Terrasil de la misma, y un suelo al que se le ha aplicado ambos productos. Además, se ha añadido otra variable y es si el suelo tras el incendio tiene una capa de ceniza o no, analizándose cómo funciona el Zytonic en ambos escenarios. Por último, para valorar la permanencia del Zytonic en el suelo se ha vuelto a hacer otra simulación pasando un mínimo de 30 días desde la primera.

También, para conocer cuáles son las propiedades que están implicadas en los cambios observados en las simulaciones se han analizado 3 de las propiedades físicas más relacionadas con la conductividad hidráulica: porosidad, estabilidad de agregados y capacidad de campo.

Los resultados concluyeron que el Zytonic sí es un producto que pueda usarse como enmienda con la finalidad de preservar el suelo de la erosión hídrica tras un incendio. En los suelos desnudos se ha observado que el Zytonic crea un sellado superficial que promueve una disminución de la disgregación de las partículas del suelo, de manera que, aunque la tasa de escorrentía sea más alta, la carga de sedimentos se ha reducido un 50.63% frente al suelo hidrofóbico. En suelos con ceniza este sellado no se forma, pero sí se observa que retiene mejor la ceniza en el suelo, ya que desde el primer periodo la diferencia de sedimentos perdidos por la escorrentía ha disminuido un 76.65% en los casos donde la ceniza presentaba el mayor porcentaje en peso.

Palabras clave: suelo, hidrofobicidad, erosión, incendio, conservación del suelo, respuesta hidrológica

Autor: Don Raúl Serrano Hidalgo

Valencia, septiembre de 2021

Tutor: Dña. Sara Ibáñez Asensio

Cotutor: Don Héctor Moreno Ramón

Evaluation of hydrophobic soil treated with a soil improver for agricultural use against episodes of simulated rain.

Forest fires cause sudden transformations in the ecosystem in which they occur, causing profound alterations in both vegetation and soil. The high temperatures reached in the first centimeters of the soil when affected by medium and high intensity fires can cause modifications in its physical, chemical, and biological properties, promoting water erosion that was already promoted by the disappearance of the vegetation cover. One of the properties that is most modified is hydraulic conductivity due to the degradation of inter-particle aggregates, the loss of organic matter and the appearance of hydrophobicity. Hydrophobicity, which is the result of the degradation of plant remains and the transformation of some organic molecules previously present in the soil, makes the soil repellent to water, reducing infiltration and increasing water erosion processes. For this reason, a soil conservation measure against degradation after a fire is to reduce or eliminate hydrophobicity.

In the present work, an agricultural soil improver product of the company Optimasoil called Zytonic has been evaluated for this purpose, since one of the changes it causes in the soil is to increase its water retention capacity. To assess whether the product is suitable for this objective, a rain simulator has been used to test the behavior of a normal soil (control); a soil to which an artificial hydrophobicity has been induced by means of the Terrasil product of the same company, and a soil to which both products have been applied. In addition, another variable has been added, which is whether the soil after the fire has a layer of ash or not, analyzing how Zytonic works in both scenarios. Finally, to assess the permanence of Zytonic in the soil, another simulation has been carried out again after a minimum of 30 days from the first one.

Also, in order to know which properties are involved in the changes observed in the simulations, 3 of the physical properties most related to hydraulic conductivity were analyzed: porosity, aggregate stability, and field capacity.

The results concluded that Zytonic is a product that can be used as an amendment to preserve the soil from water erosion after a fire. In bare soils it has been observed that Zytonic creates a surface seal that promotes a decrease in the disintegration of soil particles, so that, although the runoff rate is higher, the sediment load has been reduced by 50.63% compared to the hydrophobic soil. In soils with ash this seal is not formed, but it is observed that it retains the ash better in the soil, since from the first period the difference in sediment lost by runoff has decreased by 76.65% in the cases where the ash had the highest percentage by weight.

Keywords: soil, hydrophobicity, erosion, forest fire, soil conservation, hydrological response.

Author: Don Raúl Serrano Hidalgo

Valencia, September 2021

Tutor: Dña. Sara Ibáñez Asensio

Second tutor: Don Héctor Moreno Ramón

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1. LOS INCENDIOS FORESTALES Y SU GRAVEDAD ACTUAL EN ESPAÑA	1
2. EFECTOS DE LOS INCENDIOS SOBRE EL ECOSISTEMA Y EL SUELO	3
2.1. HIDROFOBICIDAD GENERADA EN EL SUELO	5
2.2. EROSIÓN GENERADA Y SU RELACIÓN CON LA HIDROFOBICIDAD.....	5
3. PROPIEDADES DEL SUELO RELACIONADAS CON LA EROSIÓN HÍDRICA.....	5
4. MÉTODOS PARA LA VALORACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA	6
5. MÉTODOS PARA LA CONSERVACIÓN DEL SUELO FRENTE A LA EROSIÓN HÍDRICA	6
II. OBJETO DEL TRABAJO	7
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
1. VALORACIÓN DEL PRODUCTO ZYTONIC COMO MEJORADOR DEL SUELO FRENTE LA EROSIÓN HÍDRICA (ESCORRENTÍA Y CARGA DE SEDIMENTOS).....	8
2. PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS DE SIMULACIÓN DE LLUVIA	9
2.1. MATERIALES	9
2.2. MATERIALES DE PARTIDA Y MUESTRAS DE SUELO	9
2.2.1. SUELO	9
2.2.2. TERRASIL (Producto Hidrofobizante)	9
2.2.3. ZYTONIC (Producto Mejorador)	9
2.2.4. CENIZA.....	9
2.3. PREPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS	10
2.3.1. APLICACIÓN DEL TERRASIL	10
2.3.1.1. MATERIAL.....	10
2.3.1.2. PROCEDIMIENTO	10
2.3.2. APLICACIÓN DEL ZYTONIC.....	10
2.3.2.1. MATERIALES	10
2.3.2.2. PROCEDIMIENTO	10
2.4. ELEMENTOS DEL SIMULADOR DE LLUVIA	11
2.4.1. MESA DE EROSIÓN Y DISPOSITIVO DE SIMULACIÓN DE LLUVIA.....	11
2.4.2. MONTAJE DE LAS BANDEJAS DE SUELO	12
2.5. PROCEDIMIENTO.....	12
2.5.1. DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA Y EROSIVA DEL SUELO FRENTE A LA APLICACIÓN POST-INCENDIO DEL ZYTONIC.....	12

3.	VALORACIÓN DE ZYTONIC COMO MEJORADOR DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO RELACIONADAS CON SU CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	13
3.1.	ESTABILIDAD DE MICROAGREGADOS	13
3.1.1.	MATERIALES	14
3.1.2.	PROCEDIMIENTO	14
3.2.	CAPACIDAD DE CAMPO	15
3.2.1.	MATERIALES	15
3.2.2.	PROCEDIMIENTO	15
3.3.	POROSIDAD	16
3.3.1.	MATERIALES	16
3.3.2.	PROCEDIMIENTO	16
4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	17
IV.	RESULTADOS	17
1.	INICIO DEL ENCHARCAMIENTO	17
2.	EVOLUCIÓN DEL FRENTE DE ESCORRENTÍA	19
3.	INICIO DE LA ESCORRENTÍA.....	20
4.	TASA DE ESCORRENTÍA.....	21
5.	ESTABILIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA (conductividad hidráulica del suelo)	22
6.	INICIO DE LA PERCOLACIÓN	23
7.	VOLUMEN DE ESCORRENTÍA.....	25
8.	CARGA DE SEDIMENTOS DE LA ESCORRENTÍA.....	29
9.	CARGA DE SEDIMENTOS DE LA SALPICADURA.....	30
10.	ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS.....	31
11.	CAPACIDAD DE CAMPO	33
12.	POROSIDAD	35
	CONCLUSIONES	36
V.	BIBLIOGRAFÍA.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolución del número de incendios, así como la superficie afectada desde 1968 a 2015. (Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, 2019)	2
Figura 2: a) Causas de los incendios durante el decenio 2006-20015; b) desglose de causas de fuegos intencionados durante el decenio 2006-2015. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019)	2
Figura 3: Climograma característico de la Comunidad Valenciana (Climate-data .org, s.f.)	3
Figura 4a: Imagen del simulador de lluvia. 4b: imagen de una bandeja de suelo colocada en el simulador.....	11
Figura 5: Imagen del instrumento utilizado para tamizar en húmedo las muestras de suelo ...	14
Figura 6a) Figura de la olla de baja presión utilizada para extraer el agua sobrante que el suelo es capaz de almacenar a -0.333 atm. 4b) Imagen de las bandejas sobre las que se colocan el suelo y que son capaces de extraer el agua que sobra de los cilindros de suelo	15
Figura 7: Porómetro de mercurio utilizado para la medición de la porosidad	16
Figura 8: Gráfica que muestra los diferentes valores de inicio de encharcamiento de los diferentes tratamientos, agrupando los valores observados en general (columna azul), el primer periodo (columna roja) y el segundo periodo (columna verde)	18
Figura 9: Gráfica que muestra la distancia del frente de escorrentía del colector tras 20 minutos de haber comenzado la experiencia	19
Figura 10 Gráfica de resultados del inicio de la escorrentía	20
Figura 11: Gráfica LSD del inicio de la escorrentía según el factor periodo	21
Figura 12: Comparación de la bandeja de simulación C2 antes de la 1ª simulación y antes de la 2ª simulación.....	21
Figura 13: Resultados de la tasa de escorrentía diferenciando el periodo.....	22
Figura 14: Resultados del momento de alcanzar la tasa de escorrentía diferenciando el periodo	23
Figura 15: Gráfica de los resultados de los diferentes tratamientos en general y ambos periodos del inicio de la percolación.....	24
Figura 16: Gráfica de barras que muestra los volúmenes de escorrentía de los diferentes tratamientos al minuto 60 y al minuto 110 durante el primer periodo	26
Figura 17: Gráfica LSD que muestra los valores de volumen de escorrentía a 60 minutos del primer periodo, siendo los tratamientos 1: C, 2: T, 3: TZ, 4: TCe, 5: TCeZ.....	26
Figura 18: Curva IDF (Intensiry-Duration-Frecuency). Las curvas IDF relacionan la intensidad con la duración de la tormenta, mostrando diferentes curvas de periodos de retorno que indican la probabilidad de que suceda un episodio de lluvias con una intensidad y duración determinada.....	27
Figura 19: Gráfica que muestra los valores de volumen de escorrentía del segundo periodo diferenciando los tratamientos y agrupándolos por el momento	28
Figura 20: Gráficas de escorrentía	28
Figura 21: Gráfica de los resultados de los diferentes tratamientos en general y ambos periodos del inicio de la percolación.....	30
Figura 22: Gráfica de los resultados de tasa de erosión por salpicadura	31
Figura 23: Resultados Estabilidad de los agregados	32
Figura 24: Gráfica LSD de la estabilidad de agregados en el 2º Periodo	32

Figura 25: Diferencia entre una parcela con ceniza sin Zytonic (izquierda) y con Zytonic (derecha)	33
Figura 26: Resultados de la Capacidad de Campo	34
Figura 27: Gráfico LSD de la Capacidad de Campo según el tratamiento.....	34
Figura 28: Gráfica resultados de la porosidad	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla resumen resultados de Inicio de Encharcamiento	18
Tabla 2: Tabla resumen de los resultados de la evolución de la escorrentía mostrando los datos recogidos de la distancia del frente de escorrentía al colector tras 20' tras comenzar la experiencia. Debido a que los datos del 2º periodo son todos 0, los valores observados en las primeras filas describiendo los tratamientos son solo del 1º periodo.	19
Tabla 3: Resultados del inicio de la escorrentía según el tratamiento y el periodo	20
Tabla 4: Resultados de la tasa de escorrentía según el tratamiento y el periodo.....	22
Tabla 5: Tabla resumen resultados del momento en el cual se estabiliza la escorrentía	23
Tabla 6: Tabla resumen de los resultados generales del momento de inicio de la percolación .	24
Tabla 7: Tabla resumen de los resultados de volumen de escorrentía del primer periodo	25
Tabla 8: Tabla resumen de los resultados de volumen de escorrentía del segundo periodo	27
Tabla 9: Tabla resumen de los resultados de la carga de sedimentos de la escorrentía.....	29
Tabla 10: Tabla resumen de los resultados de tasa de erosión de los diferentes tratamientos, así como los periodos.....	30
Tabla 11: Resumen resultados de estabilidad de los agregados mostrando el valor medio, la desviación estándar y el rango de valores	32
Tabla 12: Resumen resultados de la Capacidad de Campo	33
Tabla 13: Tabla resumen de los resultados de Porosidad	35

I. INTRODUCCIÓN

1. LOS INCENDIOS FORESTALES Y SU GRAVEDAD ACTUAL EN ESPAÑA

Los incendios forestales son fenómenos cuya causa puede ser natural o antrópica originando cambios en el ecosistema, siendo algunos tan evidentes que pueden observarse a simple vista, como la degradación de la vegetación, y otros más sutiles como la alteración de algunas de las propiedades del suelo (Mataix-Solera y Cerdà, 2009).

Su presencia en los ecosistemas terrestres se remonta muy en el pasado, siendo considerados como un factor ecológico de gran importancia para la formación de los que existen hoy en día (Bond y Keeley, 2005) y más en climas como el mediterráneo pues su vegetación se ha adaptado de forma que muchas de las plantas han desarrollado estrategias de supervivencia y recolonización de la vegetación, confiriéndole una estabilidad en la vegetación pese a las consecuencias a corto plazo que el incendio produce (Naveh, 1974; 1975).

La problemática de la alta intensidad y frecuencia de los incendios forestales que se observó a partir del siglo pasado en España, así como en otros países de clima mediterráneo como Portugal, Estados Unidos (California), o Australia. se debe a una variación en como el hombre se ha relacionado con el medio rural y el empleo del fuego como herramienta.

Desde que el ser humano fue capaz de utilizar el fuego en el Paleolítico (James, 1989), lo ha utilizado sobre todo como método para mejorar la producción de alimentos y para suministrar energía, estrategia denominada “fire-stick farming” por Bird, *et al.* (2008). Este empleo del fuego como herramienta hizo que este tuviese un mayor peso como factor ecológico sobre todo en ecosistemas donde se asentó el humano a partir del Neolítico donde su uso se extendió, aumentando con ello el número de incendios. Evento registrado al observar un aumento de la sedimentación de carbones durante este periodo (Power, 2008).

Pese a esto los incendios no eran muy extensos o de una grave intensidad. Este tipo de incendios surgieron a partir de la industrialización y el éxodo rural que trajo consigo, pues eso desarrolló una menor atención al medio rural y el estado de los bosques, dejando acumular mucha cantidad de combustible, que mientras hubo un control sostenible de los bosques con incendios controlados no ocasionaba problemas, pero con la desatención mostró como resultado ese aumento de la intensidad de los incendios. (Mataix-Solera y Cerdà, 2009) Estadísticamente se puede observar en los informes del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) de España, un aumento considerable del número de incendios y la extensión de estos a partir de la década de los 70, época en la que ocurrió el mayor éxodo rural de la historia reciente (figura 1), también se observa que las causas más frecuentes de los incendios son del grado intencionados y accidentes/negligencias, que a partir de quemas supuestamente controladas o accidentes el fuego se extiende hasta descontrolarse (figura 2a y 2b).

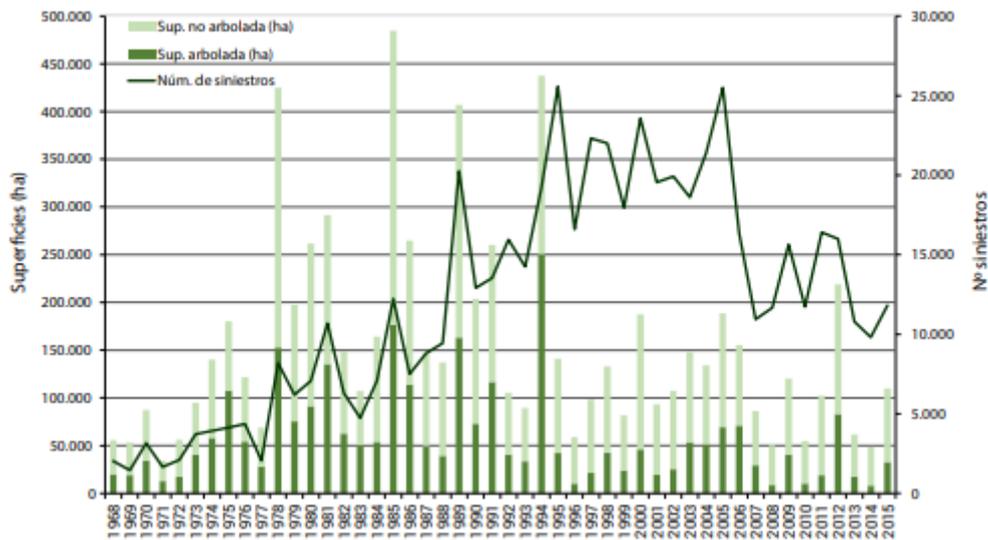


Figura 1: Evolución del número de incendios, así como la superficie afectada desde 1968 a 2015. (Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, 2019)

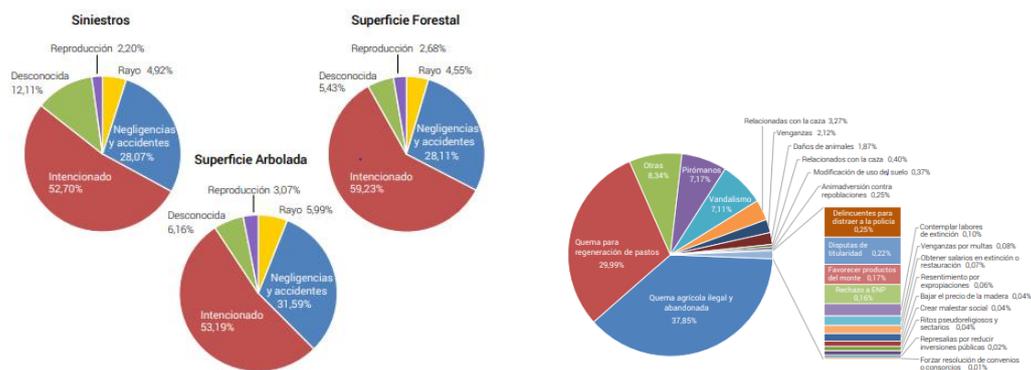


Figura 2: a) Causas de los incendios durante el decenio 2006-2015; b) desglose de causas de fuegos intencionados durante el decenio 2006-2015. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019)

También otros factores que han fomentado el incremento de los incendios en España y son las medidas políticas de reforestación con vegetación pirolítica como los pinos y la política de 0 incendio pese al gran abandono de tierras rurales, pues una de las medidas que más han ayudado al control de los incendios se ha visto que han sido las quemas controladas para evitar la gran acumulación de combustible en los bosques. Pero una mayor concienciación de los peligros de los incendios ha conseguido disminuir el número de incendios desde 2009.

2. EFECTOS DE LOS INDENCIOS SOBRE EL ECOSISTEMA Y EL SUELO

Los incendios generan una gran cantidad de cambios en el ecosistema, tanto beneficiosos como perjudiciales, siendo los dos efectos más notorios la eliminación de la vegetación y el aumento de la erosión hídrica.

Los daños en la vegetación suelen aparecer solo a corto plazo si la frecuencia de los incendios no es muy alta. Ya que la mayoría de los casos donde la vegetación está acostumbrada a los incendios, por ejemplo, las aclimatadas al clima mediterráneo, las especies leñosas pueden reaparecer a partir de los 2 años, llegando a aparecer como el estado inicial a partir de los 6-8 años (Casal, 2010). Es en esa parte donde cobra importancia la vegetación con que reforestar el ecosistema tras el incendio y un claro ejemplo, lo muestran A. Cerdà y J. Mataix-Solera en el prefacio de su libro “Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España” (2010) donde hay una foto comparativa entre brotes de *Quercus coccifera* y *Pinus halepensis* y se observa un mayor desarrollo en la primera especie. Ahí se muestra que pese a la gran degradación del paisaje las especies aclimatadas al clima mediterráneo tienen una gran capacidad de recuperación. El problema de la frecuencia de los incendios es que si esta es muy rápida la reserva de bulbos y semillas en el suelo se pierden y la reaparición de esa especie se dificulta aún más dando la oportunidad que se introduzcan especies que pueden generar muchos restos vegetales que pueden ser un combustible muy rico para posteriores incendios al igual que ocurre con una mala gestión de reforestación.

En cuanto a la erosión hídrica, esta se ve favorecida por la desaparición de la cubierta vegetal incrementando la tasa de escorrentía y la pérdida de suelo durante las futuras lluvias. Este problema empeora en el clima mediterráneo debido a su climatología pues las lluvias más intensas ocurren durante el otoño tras pasar un verano que se caracteriza por coincidir la temporada seca y la temporada de más altas temperaturas de manera que el riesgo de mayores incendios sea muy alto (figura 3).

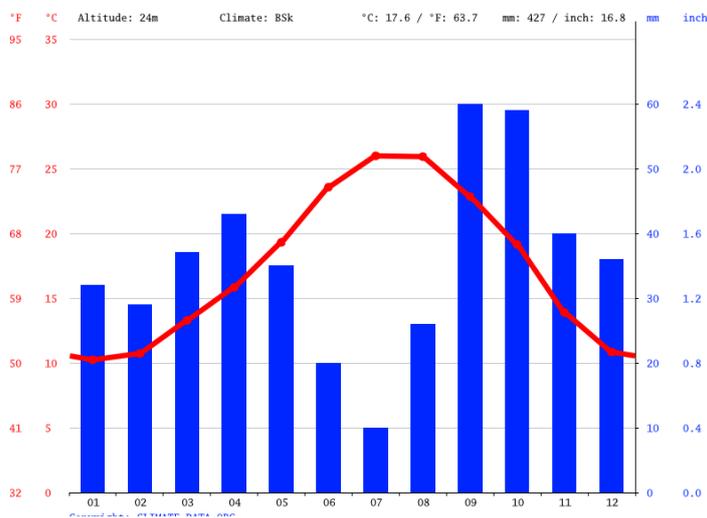


Figura 3: Climograma característico de la Comunidad Valenciana (Climate-data .org, s.f.)

Pese a esto, hay situaciones, donde los incendios que producen un gran contenido de ceniza muestran una escorrentía inferior a cuando estaba desnudo, sobre todo aquellos de intensidad más baja que producen una capa de ceniza de más espesa (Pereira, *et al*, 2012). Debido principalmente a que la ceniza tiene la capacidad de retener humedad y con ello bajar la escorrentía al potenciar la infiltración, al menos durante el periodo que la ceniza se absorbiendo agua, pues a partir del momento en que se satura la escorrentía vuelve a depender de la conductividad hidráulica del suelo (Bodí, *et al*, 2010).

Esta protección que ejerce la ceniza se ve degradada muy rápidamente debido a las lluvias y el viento, observándose en algunos experimentos una reducción desde los 12cm justo después del incendio a 4mm 45 días después, que pese a ser una duración de tiempo muy corta le da al ecosistema el tiempo suficiente para que puedan germinar las plantas y volver a restaurarse la flora sin que el hombre tenga que ejercer ninguna intervención (Pereira, *et al*, 2012)

Aunque, por otro lado, otros autores comentan que la ceniza puede ser perjudicial por mostrar el efecto adverso, una mayor repelencia al agua. Sobre todo, en bosques del mediterráneo donde la vegetación principal es *Pinus halepensis* y *Eucalyptus radiata* pues sus restos vegetales contienen una gran cantidad de moléculas orgánicas hidrófobas. (Bodí, *et al*, 2012)

Este efecto de la ceniza como mecanismo de protección frente a la erosión no es la única de las contradicciones encontradas en bibliografía sobre las consecuencias que ocasionan los incendios, pues algunos autores dicen que los incendios además aumentan la estabilidad de agregados, mientras otros hablan de una mayor inestabilidad (Úbeda y Bernia, 2005). Es por ello por lo que hay que relacionar las consecuencias de los incendios sobre el suelo y la intensidad del fuego.

Comenzando con los incendios de baja intensidad, sus efectos son los más favorables para el suelo, teniendo la cubierta protectora frente a la erosión hídrica y además de ser un compuesto con un alto contenido en carbono orgánico que se mineraliza rápidamente pasando a ser una reincorporación de nutrientes retenidos por la vegetación (Mataix-Solera y Cerdà, 2010). Siguiendo con los incendios de intensidad moderada, se muestra una de los mayores efectos perjudiciales que aumentan la erosión hídrica y es la hidrofobicidad. Esta característica se describirá en el siguiente punto para poder explicarla en mayor detalle, es por ello por lo que se pasará a comentar ahora los incendios de intensidad más alta.

En los incendios de mayor intensidad las consecuencias son una disminución de la materia orgánica y una tendencia de un cambio textural a una textura más arenosa debido principalmente a la erosión. Esto ocasiona un empeoramiento de la estructura a perderse los dos elementos la mejoran por la formación de agregados (la materia orgánica y las arcillas) y ocasionando a su vez una mayor inestabilidad de los agregados (Mataix-Solera y Cerdà, 2010). De esta manera, el suelo sufre un cambio en propiedades como la porosidad y la conductividad hidráulica fomentando la escorrentía y dificultando la infiltración. La única mejora con respecto los incendios de intensidad moderada es la desaparición de la hidrofobicidad pues esta depende de la materia orgánica del suelo, de manera que incendios de intensidad elevada donde el suelo alcanza temperaturas elevadas donde toda la materia orgánica se degrada no se observa hidrofobicidad.

2.1. HIDROFOBICIDAD GENERADA EN EL SUELO

La hidrofobicidad es una propiedad del suelo causada por la presencia de aceites vegetales hidrofóbicos que causan una gran repelencia al agua en el suelo, empeorando consigo en gran medida la erosión hídrica. Esta propiedad es común en algunos suelos apareciendo de forma natural como ocurre sobre todo en Australia, Nueva Guinea y algunas zonas de España pues uno de los árboles cuyos restos vegetales ocasionan una fuerte hidrofobicidad es el eucalipto (*Eucalyptus spp.*).

La aparición de esta propiedad tras los incendios se debe a una transformación de la materia orgánica desde compuestos hidrófilos a hidrofóbicos cuando estos se exponen a un rango de temperaturas de entre 175 y 280 °C (Benito *et al*, 2009). En España como se mencionó en el párrafo anterior esta propiedad se muestra más en las zonas donde los restos vegetales aporten al suelo compuestos hidrófobos, pero como consecuencia de un incendio puede producirse en cualquier zona que cumpla con el rango de temperaturas anteriormente mencionado y su grado de severidad varía desde ligera y moderada en suelos previamente hidrófilos y fuerte y severa en suelos que ya mostraban hidrofobicidad de manera natural (Benito, *et al*, 2009)

2.2. EROSIÓN GENERADA Y SU RELACIÓN CON LA HIDROFOBICIDAD

Es por tanto algo seguro decir que los incendios de intensidades moderadas altas producen una gran degradación en el entorno no solo en la cubierta vegetal sino también en otras propiedades que la FAO relaciona con la desertificación como la disminución de materia orgánica en el suelo y erosión hídrica (FAO, 1984).

De los tres procesos mencionados el más preocupante y que más degrada el suelo es la erosión hídrica pudiéndose observar en la mayoría de los casos un aumento de la escorrentía y la pérdida de suelo. Los motivos de este incremento de la erosión tienen relación con la desaparición de la cubierta vegetal y el empobrecimiento de la estructura del suelo al haber mayor inestabilidad de los agregados (Cerdà, *et al*, 2009). La disminución de la cubierta vegetal favorece la tasa de escorrentía debido, en primer lugar, al efecto de la salpicadura, pues el impacto directo de la gota de lluvia sobre el suelo ejerce una presión capaz de afectar negativamente la porosidad dificultando la infiltración e incrementando a su vez la escorrentía que transcurre libremente sin la resistencia de la vegetación vegetal. Este flujo de agua superficial por tanto tiene la fuerza necesaria de arrastrar consigo las partículas más finas del suelo como son las cenizas y las partículas de arcilla debido a que estas están más libres al degradarse la estabilidad de los agregados.

La aparición de la repelencia al agua implica un aumento de la erosión hídrica a causa de una alteración en la conductividad hidráulica del suelo, dificultando en gran medida la infiltración del agua debido a los compuestos hidrofóbicos y promoviendo la escorrentía, de modo que el suelo será más susceptible a ser erosionado requiriéndose lluvias menos intensas para ocasionar la misma tasa de escorrentía que en un suelo humectable.

3. PROPIEDADES DEL SUELO RELACIONADAS CON LA EROSIÓN HÍDRICA

La erosionabilidad de un suelo fue definida por Kibler y Busby (1970) como la susceptibilidad inherente de las partículas del suelo de separarse del mismo y ser transportadas por las gotas de lluvia y la escorrentía. Según un estudio realizado por William J. Veon y Arthur C. Miller en 1997 donde relacionaron diferentes propiedades del suelo con la erosionabilidad, las propiedades que tienen un mayor peso en la erosión son: la textura, la estructura, la permeabilidad, el porcentaje de pirofosfatasas C-Na y el contenido en materia orgánica.

Relacionando esto con los cambios en las propiedades producidos por los incendios se puede observar el por qué estos aumentan tanto la erosionabilidad de los suelos sin considerar el factor de la pérdida de la cubierta vegetal. Comenzando con la textura, ya se ha comentado que los incendios de gran intensidad son los que ocasionan un mayor cambio en la textura, ocasionando pérdidas de material arcilloso con las primeras lluvias, dejando consigo un suelo más limoso y arenoso, suelos que Veon y Miller observaron cómo más erosionables. Lo mismo ocurre con la estructura, pese a que los incendios de baja intensidad puedan mantener o mejorar su estructura a incorporarse materia orgánica, los de intensidad media y alta ocasionan justo lo contrario, una disminución drástica de la materia orgánica y consigo una peor estructura además de deberse a una mayor inestabilidad de los agregados. Por último, la permeabilidad también se ve reducida sobre todo los de temperaturas medias con la aparición de la hidrofobicidad.

4. MÉTODOS PARA LA VALORACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA

Existen muchos métodos para valorar la erosión hídrica pudiéndose distinguir dos grandes de bloques de métodos de valoración. Una primera más directa y práctica que se basa en el empleo de simuladores de lluvia en campo o laboratorio y observar el comportamiento del suelo frente a episodios de lluvia naturales o controlados. El otro tipo de métodos son más indirectos basados en predicciones basadas en ecuaciones (métodos cuantitativos) o por medio de evaluaciones categóricas de determinados factores (métodos cualitativos).

Los dos métodos de valoración de la erosión hídrica más utilizados son.; la ecuación universal de pérdidas de suelo o por sus siglas en inglés (USLE), método indirecto cuantitativo que estima la pérdida de suelo por procesos de erosión hídrica a partir de la modelización de la respuesta natural del suelo frente a la precipitación pluvial contemplando diferentes factores ambientales, edáficos y culturales (Ibáñez, Moreno y Gisbert, 2012a); el otro método es el uso de simuladores de lluvia. Los simuladores de lluvia son instrumentos que buscan copiar las características de la precipitación pluvial lo más fielmente posible, pudiéndose estudiar directamente la erosión hídrica ya sea en campo o en laboratorio, así como posibles métodos de conservación de suelos y aguas (Ibáñez, Moreno y Gisbert, 2012b)

5. MÉTODOS PARA LA CONSERVACIÓN DEL SUELO FRENTE A LA EROSIÓN HÍDRICA

La erosión hídrica se caracteriza por dos fases, primera la disgregación de las partículas de suelo debido al impacto de las gotas de lluvia y la siguiente es su transporte por la escorrentía. Por tanto, las medidas de conservación del suelo van dirigidas a mitigar los daños causados por estos de procesos.

Las prácticas conservadoras se pueden clasificar en 4 tipos:

- Prácticas vegetativas
- Prácticas mecánicas
- Prácticas agronómicas
- Prácticas para casos especiales

Las prácticas vegetativas son las más comunes junto a las mecánicas, estas se basan en cubrir el suelo con un manto vegetativo, mulch o enmiendas que reciba el impacto de las gotas de lluvia. Además, de ejercer una resistencia a la escorrentía debido a que dificulta el trascurso del agua por la ladera, fomenta la infiltración del agua al mejorar la infiltración del suelo mediante las raíces de las plantas o la incorporación de sustancias contenidas en las enmiendas.

Las prácticas mecánicas son aquellas que implican movimientos de tierras con el propósito de evitar las pérdidas de suelo y agua por escorrentía, un ejemplo de este tipo de prácticas son el abanalamiento del terreno sobre laderas de una montaña. Este tipo de prácticas se basan en disminuir el daño producido por la escorrentía, pero no evita la disgregación de las partículas de suelo debido a la salpicadura.

Las prácticas agronómicas se basan en mejorar las propiedades del suelo para que este sea menos erosionable, ya sea mediante la adición de enmiendas o por la aplicación de técnicas de cultivo. (Ibáñez, Moreno y Gisbert, 2012c)

II. OBJETO DEL TRABAJO

El principal objetivo del presente trabajo es evaluar la efectividad del producto mejorador Zytonic como enmienda capaz de mejorar la respuesta del suelo frente al proceso de erosión hídrica post-incendio agravada por la hidrofobicidad.

Además, el trabajo contempla dos objetivos secundarios. El primero es evaluar si hay diferencia entre usar el producto en el suelo desnudo y aplicarlo en suelos cubiertos todavía con una capa de ceniza procedente de la combustión del ramaje forestal.

El segundo es observar que propiedades físicas del suelo están relacionadas con los cambios en la erosionabilidad del suelo producidos por el Zytonic con el fin de saber que modificaciones causa que expliquen las posibles diferencias de comportamiento del suelo bajo los diferentes tratamientos propuestos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. VALORACIÓN DEL PRODUCTO ZYTONIC COMO MEJORADOR DEL SUELO FRENTE LA EROSIÓN HÍDRICA (ESCORRENTÍA Y CARGA DE SEDIMENTOS)

Para valorar la capacidad del Zytonic para revertir la escorrentía y la erosión hídrica causadas por la hidrofobicidad post-incendio se ha empleado como metodología la simulación de lluvia, que consiste en someter una muestra de suelo a una precipitación de duración e intensidad controlada y valorar el comportamiento de dicha muestra frente a ese escenario.

Las muestras de suelo empleadas han sido las siguientes: a) un control, el cual consiste en una mezcla de tierra vegetal y arena de sílice sin ningún tratamiento; b) un suelo al que se le ha aplicado un producto hidrofobizante, y servirá como testigo de lo que le ocurre al suelo cuando aumenta su hidrofobicidad; por último, c) otra muestra hidrofóbica a la que se le ha aplicado el producto mejorador Zytonic. A su vez se han planteado dos escenarios sobre los cuales testar la eficacia del producto mejorador: el primero es que el suelo está desnudo tras el incendio, o por no haber generado mucha ceniza o por haber desaparecido ésta a causa del viento, lluvia, etc.; y el otro, que el incendio ha generado una gran cantidad de ceniza y por lo tanto el suelo presenta una capa de ceniza que cubre su superficie.

Por lo tanto y a modo de resumen las muestras de suelo que se van a testar son las siguientes:

- suelo control (C)
- suelo desnudo hidrofóbico (T)
- suelo desnudo hidrofóbico y tratado con Zytonic (TZ)
- suelo cubierto de ceniza e hidrofóbico (TCeZ)
- suelo cubierto de ceniza e hidrofóbico tratado con Zytonic. (TCeZ)

Además, para tratar los resultados mediante procesos estadísticos y minimizar errores a causa de posibles datos anómalos, se han hecho 3 repeticiones de cada ensayo.

Por último, otra de las propiedades que se ha querido estudiar es el comportamiento del suelo tras transcurrir unos 30 días desde un primer episodio de lluvia, para conocer si la aplicación del producto reduce o no su eficacia tras una primera lluvia. Para ello se ha hecho un segundo ensayo pasado al menos un mes de la primera prueba para asegurar que las muestras se han secado.

Las variables medidas durante los ensayos de simulación de lluvia han sido las siguientes:

- Inicio de encharcamiento (minutos)
- Avance del frente de escorrentía (minutos)
- Inicio de la escorrentía en la parte baja de la parcela (minutos)
- Tasa de escorrentía (mm/h)
- Volumen de escorrentía (ml)
- Tasa de erosión (gr/l)

2. PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS DE SIMULACIÓN DE LLUVIA

2.1. MATERIALES

- Muestras de suelo y productos (hidrofobizante y mejorador)
- Simulador de lluvia
- Bandejas
- Recipientes para recoger la escorrentía y la salpicadura
- Papel de filtro

2.2. MATERIALES DE PARTIDA Y MUESTRAS DE SUELO

2.2.1. SUELO

El suelo utilizado en la experiencia se preparó mezclando tierra vegetal y arena de sílice en una proporción de 2.5:1 o, expresado en porcentaje, 62.5% tierra vegetal y 37.5% arena de sílice. Se eligió esta mezcla en base a los resultados de un microensayo previo realizado para testar la hidrofobicidad de diferentes mezclas (ver ANEXO 2). En esta prueba se determinó tanto la textura como el grado de hidrofobicidad de una serie de posibles mezclas, que abarcan desde una proporción de arena del 5% al 75

La textura del suelo se determinó mediante el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1936) y el grado de hidrofobicidad mediante una adaptación del método del impacto de la caída de la gota (Young, 1984) y el método WDPT (Water Drop Penetration Time (Bisdorn, *et al*, 1993; Chenu, *et al*, 2000; King, 1981). Como resultado se obtuvo que la mezcla 2.5:1 es la que mantenía una textura más acorde a la tierra vegetal mostrando un grado de hidrofobicidad severo.

El primer paso para la obtención del suelo que se va a usar en los ensayos es tamizar la tierra vegetal utilizando un molino de bolos; posteriormente se mezclan la tierra vegetal y la arena de sílice mediante una hormigonera.

2.2.2. TERRASIL (Producto Hidrofobizante)

Es un producto desarrollado por la empresa Optimasoil que modifica los suelos debido a su composición basada en organosilanos que le confieren al suelo la capacidad de repeler el agua, limitando el hinchamiento y la absorción. Es un producto utilizado como impermeabilizante de suelos. Se ha utilizado este producto para causar la hidrofobicidad por recomendación de la misma empresa que ha solicitado la valoración del Zytonic como producto mejorador postincendio (Optimasoil s.f.).

2.2.3. ZYTONIC (Producto Mejorador)

Producto desarrollado por la misma empresa (Optimasoil) enfocado principalmente a la agricultura como enmienda pero que también mejora las propiedades físicas del suelo, modificando su comportamiento frente al avance del agua al, por ejemplo, incrementar su porosidad o capacidad de retención del agua.

2.2.4. CENIZA

Dos de los escenarios planteados para la simulación requieren que la superficie del suelo este cubierta de ceniza, para ello se quemó en chimenea restos vegetales comunes en la Comunidad Valenciana y posteriormente se aplicaron 560g por bandeja.

2.3. PREPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

2.3.1. APLICACIÓN DEL TERRASIL

2.3.1.1. MATERIAL

- Terrasil
- Agua destilada
- Arena de Sílice

2.3.1.2. PROCEDIMIENTO

Para hidrofobizar el suelo, el producto se ha de aplicar directamente sobre la arena de sílice y ésta, una vez hidrofobizada, mezclarla con la tierra vegetal. El proceso para hidrofobizar la arena es el siguiente:

Primero se ha de diluir el producto en proporción 1:100, es decir un mL de Terrasil por 100 mL de disolución total y posteriormente aplicar esta solución en la arena en cantidad correspondiente al 10% de la arena que se quiera tratar. Por último, la arena ha de secarse en estufa o al aire para poder mezclarse con el suelo

2.3.2. APLICACIÓN DEL ZYTONIC

2.3.2.1. MATERIALES

Por cada bandeja se necesitan:

- 1.53g de Zytonic
- 947mL Agua destilada
- Dispensador de mano a presión

2.3.2.2. PROCEDIMIENTO

La aplicación del Zytonic se realiza sobre las bandejas de suelo ya colocadas en el simulador de lluvia pues la respuesta del suelo al aplicársele el producto es formar una fina costra altamente humectable. En caso de que el producto se aplique fuera del simulador y luego se transporte a éste provoca que la costra se rompa, de manera que el suelo no mostraría las propiedades que se observarían en campo

La cantidad de Zytonic que se utilizó fue la dosis de 3g por metro cuadrado recomendada por la empresa, o bien en polvo (forma base con la que viene el producto) o bien diluido en agua destilada en una proporción 1:100. La forma escogida en este ensayo ha sido la diluida por principalmente porque es la forma que consigue una mayor uniformidad de aplicación. De esta forma, por cada simulación se utilizaron 1.53g de Zytonic en 153 mL de solución. En caso de respetar la proporción 1:100 y aplicar solo 135mL por bandeja la profundidad a la que llegaría el producto sería nula y por lo tanto para asegurar que el producto funcionase al menos en una profundidad de 5-7cm se volvió a diluir con agua destilada hasta que la cantidad de solución que se aplicase por bandeja sea de 1L.

Para la aplicación del producto se utilizó un pulverizador a presión de mano.

2.4. ELEMENTOS DEL SIMULADOR DE LLUVIA

2.4.1. MESA DE EROSIÓN Y DISPOSITIVO DE SIMULACIÓN DE LLUVIA

Para los ensayos de simulación de lluvia se aplica una precipitación de características controladas (intensidad y energía cinética de impacto) sobre una mesa de erosión situada a 2 metros de distancia (Poesen, 1986 a y b).-El sistema consta de una estructura de hierro forjado sobre la cual se colocan bandejas de acero perforado de 0.51m² (0.68m x 0.75m) y 10cm de profundidad, de forma que el suelo que se coloque reproduzca el topsoil de un terreno natural. En los laterales y en la parte trasera la estructura incluye unas alas que permiten recoger la salpicadura. La estructura puede inclinarse aumentando o disminuyendo la pendiente mediante un mecanismo manual situado en la parte trasera (figura 4a y 4b).



Figura 4a: Imagen del simulador de lluvia. 4b: imagen de una bandeja de suelo colocada en el simulador

La escorrentía se recoge en un colector situado en la parte baja de la mesa, de manera que recibe toda el agua de escorrentía y sedimentos generados en la parcela o bandeja de erosión.

Respecto al origen de la lluvia, se empleó un equipo de regulador de presión de PVC y una boquilla de pulverización de la empresa HARDI (ref. nº 1553-10) calibrada en situación de presión de trabajo constante (ref. Cerdá e Ibáñez). Para 2.5kg/cm² el agua cae en forma de cono con una intensidad de 41.23mm/h \pm 1mm/h y un coeficiente de uniformidad entre el 64 y 68%. Los datos relativos a la distribución de la intensidad y al coeficiente de uniformidad se pueden ver con mayor detalle en el ANEXO 1 “Calibración del simulador de lluvia”

El equipo consta de una grúa que permite levantar y bajar las bandejas de suelo para encajarlas en la mesa de erosión.

2.4.2. MONTAJE DE LAS BANDEJAS DE SUELO

Toda la base y los laterales de las bandejas se recubrieron, respectivamente, con una tela y tiras de fibra de vidrio comprimidas con el objetivo de retener el suelo sin impedir la evacuación a través de las perforaciones de la chapa.

El suelo que se encuentra en las bandejas se ha dispuesto en dos capas, una primera compuesta por la mezcla de tierra vegetal y arena de 7,5cm de espesor, y una capa superior de 2,5cm rellenos únicamente con tierra vegetal. De esta forma se consigue simular con mayor detalle el efecto que tiene la hidrofobicidad del suelo provocada por los incendios, ya que como se ha descrito en la introducción ésta solo suele afectar hasta una profundidad de 7-7.5cm. Para completar los 10cm de profundidad de la bandeja se dispusieron en su base 3 cm de tierra vegetal sin mezcla.

Finalmente se enterraron 6 pequeños cilindros para la toma de muestras inalteradas de suelo en la parte superior de cada una de las bandejas.

2.5. PROCEDIMIENTO

2.5.1. DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA Y EROSIVA DEL SUELO FRENTE A LA APLICACIÓN POST-INCENDIO DEL ZYTONIC

Las simulaciones de lluvia se basan en simular una lluvia controlada sobre un suelo previamente caracterizado con el objetivo de observar el comportamiento del suelo en cuanto a la escorrentía generada y la cantidad de suelo desagregado y transportado por la misma hasta la parte baja de la parcela de ensayo donde se ubica el colector de recogida.

Las condiciones que modifican tanto la escorrentía como la erosión generada, independientes de las características intrínsecas al suelo, son esencialmente la intensidad de la precipitación y la pendiente de la parcela o bandeja de erosión. En el caso de la experiencia objeto del presente trabajo, gracias al regulador de presión y el elevador del simulador se pueden mantener constantes ambas variables, de forma que todas las simulaciones están sometidas a las mismas condiciones de partida las cuales son las siguientes:

- Intensidad de la precipitación: 41.23 mm/h
- Pendiente: 15%

Durante el ensayo transcurren o se producen una serie de etapas que deberemos controlar. La primera etapa se basa en que el suelo durante este periodo está acumulando el agua en su espacio poroso hasta que se comienza a ver un encharcamiento en superficie. En ese momento comienza la segunda etapa con el avance del “frente de escorrentía”, que transcurre desde el inicio del encharcamiento hasta que el agua llega al final de la bandeja.

La tercera y última fase comienza cuando el frente de escorrentía llega al final de la bandeja y comienza a caer agua en el colector de recogida. Esta fase evoluciona desde una escorrentía pequeña hasta un valor final estable, debido a que al inicio no todo el suelo está saturado y no toda la bandeja está produciendo escorrentía, de manera que ésta irá aumentando hasta que se dé esa condición y la escorrentía alcance su valor máximo. Cuando se hayan registrado 3 lecturas de escorrentía iguales se puede dar por hecho que la escorrentía es estable y se puede dar por finalizado el ensayo.

Es durante esta última fase donde se recogen volúmenes de escorrentía a tiempos e intervalos constantes con el fin de que los volúmenes de escorrentía registrados puedan ser comparados entre muestras. En este ensayo se han elegido intervalos de 5 minutos, o tiempos múltiplos de 5.

Para valorar el comportamiento del suelo durante las dos primeras fases se han tomado como indicadores el tiempo de inicio del encharcamiento y la distancia al final de la bandeja del frente de escorrentía al minuto 10, 20 y 30.

Además, para valorar la cantidad de suelo erosionado total se ha medido el volumen de salpicadura que recogen las alas laterales y trasera de la mesa de erosión con la ayuda de dos recipientes colocados bajo las mismas. El agua recogida por dichos recipientes no será únicamente la originada por la salpicadura ya que la boquilla también impacta directamente sobre las alas de modo que el volumen registrado es la suma de la salpicadura y el agua que cae directamente sobre las alas.

La cantidad de suelo erosionado se mide a partir del sedimento acumulado en los recipientes de recogida de escorrentía llenados durante el ensayo, tras filtrar el agua por un papel de porosidad estándar previamente tarado en condiciones de 0 humedad; terminado de filtrar el agua el papel de filtro se pasa nuevamente 24 h por estufa a 105 °C, y al volver a pesar se determina la cantidad de suelo que contenía el recipiente de agua de escorrentía, es decir, la cantidad de suelo que se ha perdido durante ese intervalo de tiempo en el que se estuvo recogiendo escorrentía.

3. VALORACIÓN DE ZYTONIC COMO MEJORADOR DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO RELACIONADAS CON SU CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

Además de observar el comportamiento hidrológico y erosivo del suelo frente a episodios de precipitaciones controladas, también se busca determinar qué propiedades explican las posibles diferencias de comportamiento entre los diferentes tratamientos. Las propiedades elegidas han sido las siguientes:

- Estabilidad de microagregados
- Porosidad
- Capacidad de Campo

Para la estabilidad de agregados se han utilizado muestras alteradas de las bandejas de suelo, mientras que para la porosidad y la capacidad de campo se han utilizado los cilindros colocados, pues para valorar dichas propiedades se requiere una muestra inalterada. De los 6 cilindros instalados en la parte superior de las bandejas, 3 se extrajeron después de la primera simulación y los otros 3 se extrajeron después de la segunda.

3.1. ESTABILIDAD DE MICROAGREGADOS

Para la determinación de la estabilidad de microagregados se ha utilizado el método de tamizado en húmedo (Ikenna, 2018). Este método consiste en cuantificar cuántas partículas de suelo pasan por un tamiz de 0.25mm al entrar en contacto con el agua (con y sin dispersante) simulando el efecto que tiene esta en el suelo durante el proceso de erosión hídrica (imagen 5)



Figura 5: Imagen del instrumento utilizado para tamizar en húmedo las muestras de suelo

3.1.1. MATERIALES

- 4g de suelo
- Tamices de 0.25mm
- Agitador
- 100mL de Agua destilada
- 100mL Hexametáfosfato de sodio
- Recipientes
- Estufa
- Balanza de precisión
-

3.1.2. PROCEDIMIENTO

Para realizar el método de tamizado en húmedo el primer paso ha sido recoger muestras de suelo de las bandejas, secarlas en estufa 1 día a 105°C y tamizarlas a 2mm tomando posteriormente 12 gramos de suelo por triplicado.

Para determinar la estabilidad de microagregados se colocan 4 gramos de suelo en un cuenco de cerámica pequeño. Posteriormente se ha preparado el agitador colocando los tamices de 0.25mm en los huecos preparados para estos y por debajo situando los moldes con 100 mL de agua destilada. Esta es la primera fase y una vez preparada se colocan los 4 gramos de suelo en un tamiz del agitador y se deja agitar durante 3 minutos. La forma con la que se agitan los tamices es subiendo y bajando una plataforma de manera que el tamiz entre y salga del contacto con el agua, de esta forma la fuerza que ejerce el agua suspendiendo las partículas del suelo mientras este esté en contacto del agua y posteriormente la fuerza con la que cae al tamiz cuando este sale del agua hace que las partículas del suelo que fácilmente se disgreguen o que no forman parte de ningún agregado salgan del tamiz y vayan al recipiente con agua situado abajo.

Pasado este tiempo comienza la segunda fase que consiste en cambiar el recipiente situado en la parte baja y cambiarlo por uno que en vez de llevar 100mL de agua destilada, lleve 100mL de Hexametáfosfato sódico de forma que mediante el mismo mecanismo mencionado anteriormente fomente la disgregación de todos los microagregados y pasen todas las partículas de diámetro menor a 0.25mm.

Por último, la última fase es limpiar el contenido del tamiz en un tercer recipiente que el cual contendrá las partículas que tengan un diámetro superior a 0.25mm que serán esencialmente arenas y fragmentos gruesos.

Posteriormente todos los recipientes se vuelven a secar a estufa durante 1 día a 105°C para poder pesarlos y ver qué porcentaje en peso de la muestra inicial tiene cada uno de los recipientes. El tercer recipiente sirve para restar aquella parte de la muestra que no tiene que ver con la formación de agregados pues los fragmentos y arenas gruesos no intervienen con este proceso, mientras que los recipientes 1 y 2 sí indican la estabilidad de agregados, siendo el recipiente 1 el que recoge los agregados inestables o las partículas no agregadas, mientras que el recipiente 2 recoge las partículas de los agregados estables

Por tanto, la ecuación que modela la estabilidad de agregados según este método es la siguiente:

$$\frac{\text{Agregados Estables}}{\text{Agregados Estables} + \text{Agregados Inestables}} \times 100$$

3.2. CAPACIDAD DE CAMPO

Para determinar esta propiedad se han utilizado los cilindros instalados en las bandejas. La manera por la cual se ha determinado la capacidad de campo es mediante una olla de baja presión (0.3 atm) que contenga los cilindros con suelo de manera que, a causa de la baja presión, el agua se va extrayendo del suelo y de la olla hasta llegar a un equilibrio donde el suelo contenga el agua retenida con la suficiente fuerza para que no se extraiga. (Kumar *et al*, 2017). La imagen de la olla y las bandejas sobre las que se colocan los cilindros que promueven que los cilindros pierdan el agua se pueden observar en las figuras 6a y 6b



Figura 6a) Figura de la olla de baja presión utilizada para extraer el agua sobrante que el suelo es capaz de almacenar a -0.333 atm. 4b) Imagen de las bandejas sobre las que se colocan el suelo y que son capaces de extraer el agua que sobra de los cilindros de suelo

3.2.1. MATERIALES

- Olla de baja presión
- Cilindros de plástico
- Muestras de suelo
- Balanza de precisión
- Estufa industrial

3.2.2. PROCEDIMIENTO

El primer paso para poder determinar la capacidad de campo ha sido llevar a saturación las muestras de suelo mediante un baño en agua destilada en un contenedor el cual está lleno hasta una altura equivalente a ¾ de los cilindros.

Cuando se llega al punto de saturación, las muestras de suelo pasan a la olla de baja presión para extraer el agua hasta llegar al nivel de capacidad de campo. Una vez llegado a este punto, el cual se sabe porque la olla deja de extraer agua se sacan los cilindros y se pesan registrando la marca del peso de los cilindros con agua al nivel de Capacidad de campo. Posteriormente se dejan secar durante un día en la estufa a 105° y volver a pesar el suelo registrando la marca del cilindro a 0% de humedad, dando la capacidad de campo como la diferencia de ambos pesos entre el peso seco

3.3. POROSIDAD

Para la determinación de la porosidad se ha utilizado un porómetro de mercurio (figura 7). La técnica se basa en medir el volumen de aire que llena el espacio poroso de una muestra seca de un volumen conocido.



Figura 7: Porómetro de mercurio utilizado para la medición de la porosidad

La determinación de porosidad mediante el porómetro se basa en colocar las muestras de suelo en una cámara donde se ejerce el vacío. Una vez esto una columna de mercurio registra el volumen de sólidos presentes en la cámara, de esta forma teniendo la tara del cilindro se puede saber el volumen de sólidos de la muestra y con ella la porosidad pues el volumen del interior del cilindro es conocido (Ibáñez. S., Moreno. H.R., Gisbert. J.M., 2012d)

3.3.1. MATERIALES

- Porómetro de mercurio
- Cilindro con muestras inalteradas de suelo

3.3.2. PROCEDIMIENTO

Para llevar a cabo este procedimiento es requerido que las muestras de suelo no contengan agua en su espacio poroso; para ello se han secado en una estufa a 105°C durante 24 y posteriormente se ha dejado enfriar en una campana exenta de aire húmedo. Posteriormente, se pesan los cilindros con suelo, así como un blanco

Una vez conseguido esto es posible comenzar con el procedimiento:

El primer paso es tarar el porómetro utilizando un cilindro el cual se sepa el volumen de sólidos debido que para ejercer el vacío se baja un dispositivo de control del nivel de mercurio a través de una columna situada a la izquierda y es necesario marcar el máximo y el mínimo de la columna para una correcta medición de los datos. El máximo superior se establece cuando la columna de mercurio está enrasada en el 0 y el mínimo cuando la columna de mercurio llega hasta 60 cuando se está tarando el cilindro de volumen conocido.

Una vez tarado el porómetro, el procedimiento es colocar los cilindros con muestra de suelo en la campana, aislarla del entorno, ejercer el vacío y observar el nivel de mercurio.

Ese nivel marca el volumen de sólidos y sabiendo el volumen del cilindro se puede calcular la porosidad tanto aparente como real mediante la siguiente ecuación:

$$\rho r = \frac{mss}{V_t}$$

$$\rho a = \frac{mss}{V_s}$$

$$\rho (\%) = \frac{V_e}{V_t}$$

Siendo ρr la porosidad real y ρa la porosidad aparente; mss = masa de sólidos y V_t volumen total, V_e volumen espacio poroso y V_s volumen de sólidos.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico se ha utilizado el programa STATGRAPHICS 18 utilizando las herramientas de ANOVA para las variables normales y las pruebas paramétricas de Kruskal Wallis y Mann Whitney para las no normales.

Las variables diagnosticadas como no normales y que se han evaluado estadísticamente mediante las pruebas paramétricas han sido:

- Inicio de la escorrentía (minutos)
- Volumen escorrentía (ml recogidos a los 60 min)
- Carga de Sedimentos (gr/l)

IV. RESULTADOS

1. INICIO DEL ENCHARCAMIENTO

Los datos del inicio del encharcamiento muestran que durante las primeras lluvias el encharcamiento apareció antes en los suelos modificados que, en el control, observándose que los peores resultados (el encharcamiento aparece antes) se producen en los suelos hidrofóbicos (muestras T, con un valor medio de 3.6 minutos). La adición del Zytonic retrasa el fenómeno hasta los 7.25 minutos (ver tabla 1 y figura 8). En cuanto a los suelos con ceniza, el valor medio para el suelo sin Zytonic es de 5.675 minutos y con la adición del Zytonic se retrasa hasta los 7.7 minutos, siendo estas diferencias estadísticamente significativas. Además, este valor muestra una correlación positiva y significativa con el inicio de la escorrentía. De esta forma se podría decir que la adición del Zytonic retrasa la erosión, aunque habría que ver los datos de carga de sedimentos de escorrentía y salpicadura, pues hay autores que han registrado que el encharcamiento reduce la erosión por salpicadura al recibir el agua el impacto de la gota de lluvia y no el suelo (Zambon *et al*, 2021).

En las segundas lluvias se sigue observando que el tratamiento T muestra un adelanto del encharcamiento con respecto al resto de situaciones, con 1.7 ± 0.4243 minutos frente a los 3.2 ± 1.4142 minutos del control; el Zytonic retrasa el encharcamiento a 2.37 minutos, aunque dichas variaciones no son estadísticamente significativas. Las variaciones significativas se observan entre el suelo hidrofóbico desnudo (T) y los suelos con ceniza en superficie (TCe) y (TCeZ) mostrándose retardos de entre 55 y 58% al pasar de los 1.7 ± 0.4243 minutos en el tratamiento T a 4.05 ± 0.07 y 3.82 ± 0.564 en el tratamiento TCe y TCeZ respectivamente. Esto se relaciona con la mayor capacidad de almacenar agua de la ceniza (Bodi *et al*, 2010), de manera que la capa superficial del suelo cubierta de ceniza tarda más en saturarse al seguir acumulando agua durante más tiempo, retrasando por tanto el encharcamiento.

Tabla 1: Tabla resumen resultados de Inicio de Encharcamiento (min)

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo
C	7.6025	3.20	5.1647	2.2	12.5
T	2.8460	1.70	1.0969	1.4	4.0
TZ	4.3220	2.40	2.6797	2.3	7.4
TCe	4.8625	4.05	0.9758	4.0	6.0
TCeZ	6.1480	3.82	2.3107	3.4	9.1
Periodo					
1a	6.98 a	7.0	2.9174	12.5	3.3
2b	2.97 b	2.4	1.0366	4.24	1.4

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

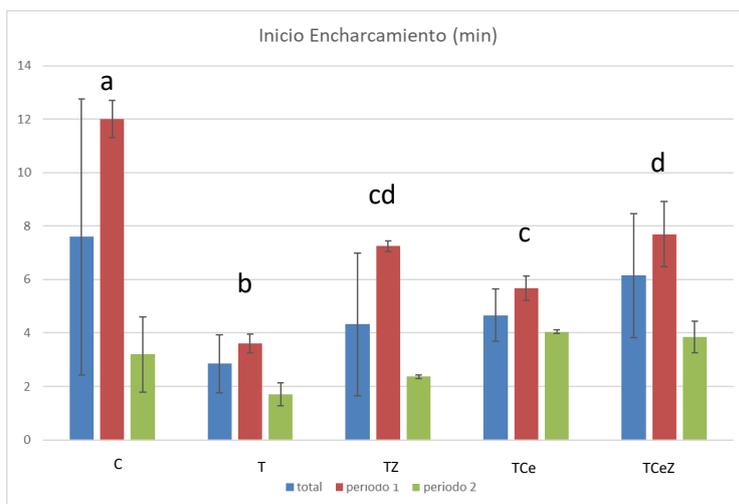


Figura 8: Gráfica que muestra los diferentes valores de inicio de encharcamiento de los diferentes tratamientos, agrupando los valores observados en general (columna azul), el primer periodo (columna roja) y el segundo periodo (columna verde)

2. EVOLUCIÓN DEL FRENTE DE ESCORRENTÍA

La evolución del frente de escorrentía (ver tabla 2 y figura 9) no ha mostrado diferencias significativas entre los diferentes tratamientos ni en el primer periodo de simulaciones ni en el segundo, tanto en la medición de los 10 minutos como en la de 30 minutos, pero sí se encuentran en la medición a los 20 minutos durante las primeras simulaciones. Lo que se observa es que el frente de escorrentía está mucho más cerca del colector en el tratamiento T (2º), mostrando diferencias significativas con el control, reduciéndose desde los 11 cm de media a 0. Al aplicar el Zytonic el avance del frente de escorrentía se va ralentizando, estando a 7.67 cm del colector a los 20' de iniciado el ensayo, valor muy parecido al observado en el suelo hidrofóbico con ceniza (TCe) el cual tiene un valor medio de 6.33 cm. Los casos en los que se ha aplicado el Zytonic sobre la ceniza sí muestran que el frente de escorrentía se retrasa aún más hasta valores similares al control, con un promedio de 13 cm. Este efecto del mantillo como medida de protección ya lo observaron Gholomi, Hamidreza y Homaee (2013) de manera que la rugosidad del mantillo aumenta el microrrelieve del suelo de la parcela, dificultando el paso del agua y ralentizando con ello la escorrentía

En el segundo periodo no se mostraron diferencias significativas entre los tratamientos ya que en todos la escorrentía comenzó muy pronto, pasando de una distancia de 6.98 ± 2.9173 centímetros a estar ya en el borde de la bandeja.

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo
C	11.00 a	12.00	1.73	9	12
T	0 b	0.00	0.00	0	0
TZ	7.66 ab	7.66	4.93	2	11
TCe	6.33 ab	6.33	6.02	0	12
TCeZ	13.00 b	13.00	6.08	9	20
Periodo					
1a	7.60 a	7.60	5.99	20	0
2b	0.00 b	0.0	0.00	0	0

Tabla 2: Tabla resumen de los resultados de la evolución de la escorrentía mostrando los datos recogidos de la distancia del frente de escorrentía al colector tras 20' tras comenzar la experiencia. Debido a que los datos del 2º periodo son todos 0, los valores observados en las primeras filas describiendo los tratamientos son solo del 1º periodo. (min)

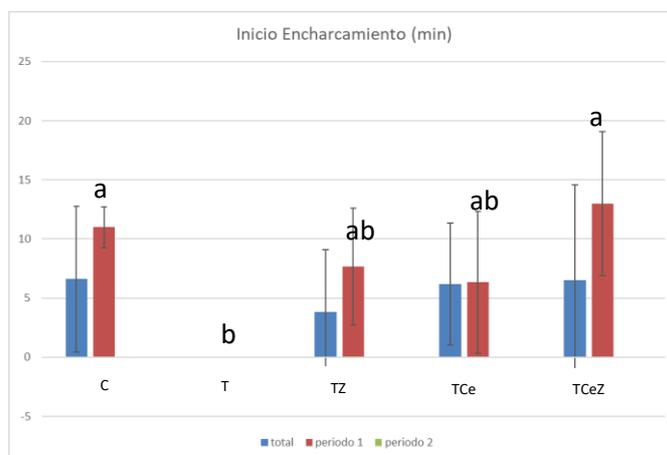


Figura 9: Gráfica que muestra la distancia del frente de escorrentía del colector tras 20 minutos de haber comenzado la experiencia

3. INICIO DE LA ESCORRENTÍA

Los datos de inicio de escorrentía se recogen en la tabla 1 y en la figura 10. Tras tratarse estadísticamente mediante las pruebas de Kruskal Wallis y Mann Whitney no se han encontrado diferencias significativas en cuanto al tratamiento, pero sí en el periodo, mostrando una aceleración en la segunda simulación del 37.84% al pasar de un valor medio de 28.83 ± 9.18 a 17.92 ± 4.17 minutos, observándose gráficamente en la figura 11. Los tratamientos que más acusan este cambio son los correspondiente a las bandejas con producto mejorador (TZ y TCeZ) disminuyendo el tiempo desde 32 ± 9.17 min a 14.05 ± 2.10 min y de 27.2 ± 0.75 minutos a 19.335 ± 0.94 minutos respectivamente. Una posible explicación es que el Zytonic fomente la formación de un sellado de manera que reduzca la permeabilidad sobre todo durante los primeros minutos de la experiencia. Este sellado se ha registrado con ceniza blanca originada de incendios de alta intensidad, la cual es una ceniza de granulometría muy fina que ocupa la porosidad superficial del suelo, formando ese sellado, que podría llegar a ser beneficioso como indican Zambon *et al* (2021) ya que el agua se queda en la superficie del suelo como una película de manera que el agua impacta sobre el agua y no sobre el suelo originando una menor erosión al haber menos partículas de suelo disgregadas y fácilmente erosionables.:

Tabla 3: Resultados del inicio de la escorrentía según el tratamiento y el periodo (min)

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo
C	31.25	28.00	12.45	15.00	41.00
T	18.23	14.48	2.71	14.45	21.70
TZ	23.03	25.92	11.49	11.83	40.00
TCe	23.71	28.00	8.51	16.00	40.00
TCeZ	23.27	23.20	4.59	18.67	27.73
Periodo					
1a	28.83	29.00	9.18	17.00	41.00
2b	17.92	19.92	4.17	11.83	28.00

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

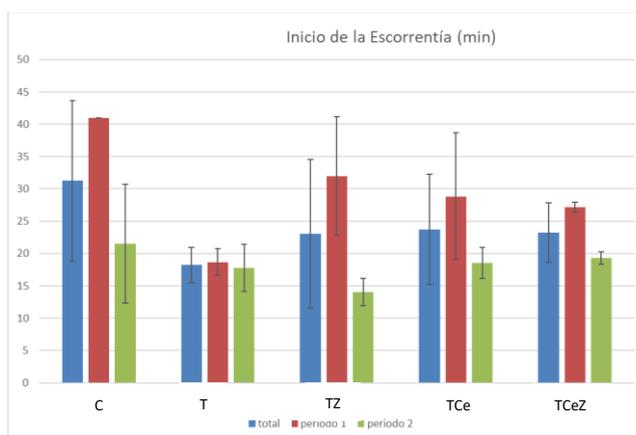


Figura 10 Gráfica de resultados del inicio de la escorrentía

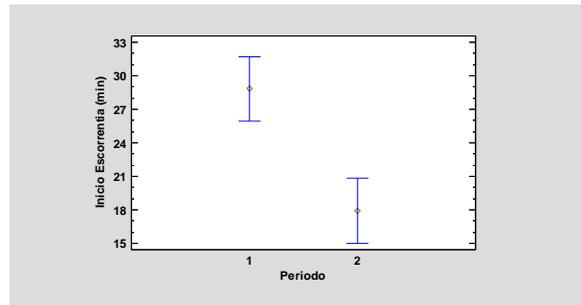


Figura 11: Gráfica LSD del inicio de la escorrentía según el factor periodo

Estos resultados también pueden relacionarse con el proceso de asentamiento de los suelos de las bandejas después de haber sufrido cambios por el proceso de humectación y secado posteriores al primer ensayo. Esto se puede observar en la figura 12. El efecto del impacto de las gotas de agua y la rápida humectación y secado del suelo han generado una costra superficial que puede tener un espesor de entre 1 y 10mm, con una reducción considerable de la porosidad (Miedema 1997).



Figura 12: Comparación de la bandeja de simulación C2 antes de la 1ª simulación y antes de la 2ª simulación

4. TASA DE ESCORRENTÍA

En cuanto a la tasa de escorrentía, si se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, observando una mayor escorrentía en el suelo tratado con Zytonic frente a los suelos desnudos, y una mejoría en los suelos con ceniza, siendo el mejor tratamiento el suelo cubierto con ceniza y tratado con Zytonic (tabla 1). Pero, si se observan los resultados diferenciándolos según el periodo, se observa que la diferencia en el tratamiento 3 se encuentra en el periodo 1, pero en el periodo 2 los 3 tratamientos con suelo desnudo no muestran diferencias significativas aun cuando hay una clara tendencia a un aumento de la tasa de escorrentía en suelo hidrofóbico frente al control, pero una mejoría tras tratarse con el Zytonic al volver a valores medios similares al control. En cambio, los suelos con ceniza muestran diferencias significativas respecto al resto (P -valor $0.02 < 0.05$), mejorando el valor hasta un 50% al disminuir la tasa de escorrentía desde 21.165 mm/h en el control a 11.47 mm/h en el suelo con ceniza y tratado con Zytonic (figura 13).

La explicación del aumento de la tasa de escorrentía en el periodo 1 del tratamiento TZ es la formación de una pequeña costra derivada de la aplicación del Zytonic, de la misma forma que se desarrolla un pequeño sellado de la superficie del suelo tras algunos episodios de lluvias en zonas árida al formarse una costra de escasos milímetros causada por el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, reduciendo su porosidad y con ello la permeabilidad, dificultando la conductividad hidráulica y fomentando la escorrentía. (Garmi y Berlier, 2008). Pese a esto, la formación de la costra superficial ha resultado favorable para los suelos cubiertos con ceniza no solo por mostrar una mejoría del tratamiento TCeZ frente al TCe tanto en la tasa de escorrentía disminuyendo un 20% de media sino también como un método de retener la ceniza tal y como se observa en los resultados de carga de sedimentos (ver apartado IV.5).

Dicha costra desaparece tras la primera simulación, mostrando los suelos sin ceniza las mismas condiciones de compactación.

Tabla 4: Resultados de la tasa de escorrentía según el tratamiento y el periodo (mm/H9)

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo
C _a	19.73	19.70	2.3446	17.64	21.76
T _a	19.29	19.30	2.7165	16.00	22.59
TZ _b	21.16	20.77	1.6384	18.86	22.67
TCe _c	17.84	18.51	2.7336	15.33	21.69
TCeZ _d	14.08	14.31	3.2861	10.59	18.04
Periodo					
1a	19.37	29.00	2.6678	15.32	22.67
2b	17.65	19.92	3.7214	10.59	22.59

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

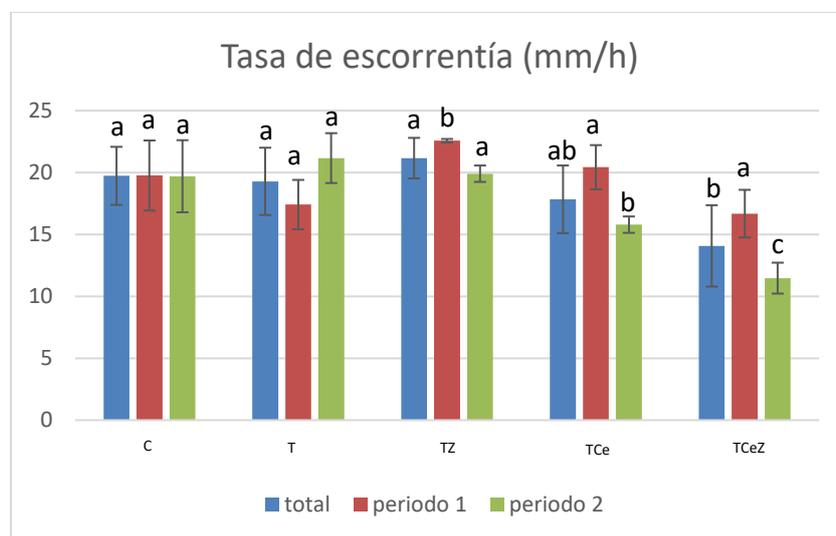


Figura 13: Resultados de la tasa de escorrentía diferenciando el periodo

5. ESTABILIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA (conductividad hidráulica del suelo)

Respecto a cuándo se estabiliza la escorrentía, se encuentran diferencias significativas en general mostrando un retraso en el momento en que la escorrentía se estabiliza en los tratamientos TZ y TCeZ (tabla 5 y figura 14).

Mediante un estudio más profundo diferenciando los resultados según el periodo se puede observar que durante las primeras simulaciones fueron los suelos desnudos y tratados con Zytonic los que tardaron de media 28 minutos más en alcanzar la estabilización de la escorrentía, es decir, la conductividad hidráulica o tasa de infiltración del suelo a saturación (73.33 ± 2.8868 a 100 ± 7.0711), seguido de los suelos con ceniza y tratados con Zytonic con un retraso de 15 minutos (89 ± 1.7321), ambos con diferencias significativas respecto al control, En cuanto al segundo periodo las diferencias significativas se encuentran entre los suelos con ceniza y el control, mostrando que en los suelos con ceniza la escorrentía se estabiliza antes, en concreto en el tratamiento TCe se estabiliza 20 minutos antes que el control (66.66 ± 3.5355 respecto 87.5 ± 10.6066) y en el tratamiento TCeZ lo que se produce es un retraso en la estabilización, tardando 20 minutos más que el control y 40 minutos más que el tratamiento TCe (107.5 ± 3.5355). Esto se puede observar mejor con las barras verdes de la figura 13.

Tabla 5: Tabla resumen resultados del momento en el cual se estabiliza la escorrentía (min)

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo
C _a	79.0	82.5	9.617	70	95
T _a	72.5	72.5	8.803	60	85
TZ _{ab}	84.0	82.5	17.103	60	105
TCe _a	72.0	72.5	8.718	60	85
TCeZ _b	96.4	98.5	10.359	87	110
Periodo					
1	81.00	82.5	12.0064	60	105
2	79.23	85.0	15.7911	60	110

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

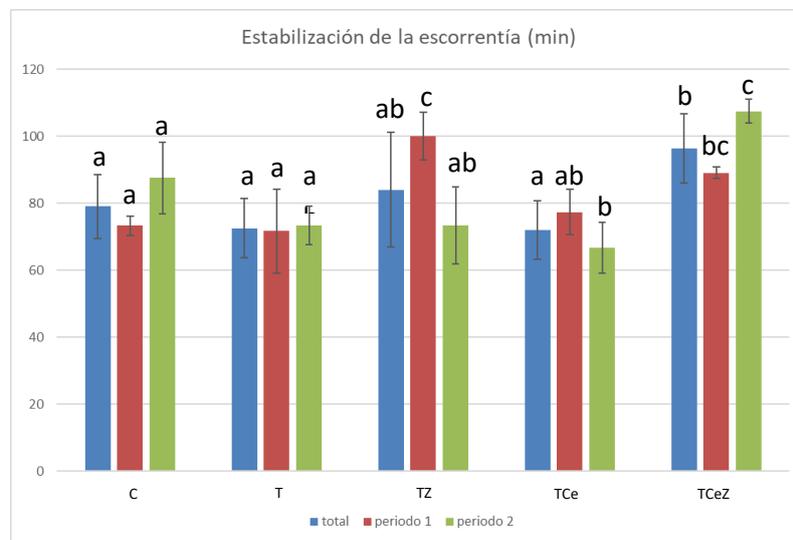


Figura 14: Resultados del momento de alcanzar la tasa de escorrentía diferenciando el periodo

6. INICIO DE LA PERCOLACIÓN

Los resultados medios del tiempo de inicio de la percolación se pueden observar en la tabla 6. Más en concreto, diferenciando entre periodos se ha observado que en el periodo 1 el suelo hidrofóbico sin ceniza ha comenzado antes la percolación que el resto de los tratamientos (adelanto desde los 45 ± 2 minutos a los 30 ± 0.707 minutos). Esta situación es revertida con la aplicación del Zytonic pues la percolación se retrasa otra vez a valores medios de 43.33 ± 9.7125 minutos. En cuanto a los suelos con ceniza ambos muestran tiempos similares y superiores al control (59 ± 6.9282 minutos en el tratamiento TCe y 54.75 ± 0.3553 tratamiento TCeZ), siendo esta variación significativa con un p-valor de $0.0072 < 0.05$ (figura 15).

En el periodo 2 la mayor diferencia es del tratamiento TZ con el resto (p valor $0.0324 < 0.05$), mostrando que el tiempo de inicio de la percolación se retrasa desde los 45 ± 0 en el control y 39 ± 6.9282 del suelo hidrofóbico sin ceniza a 68.5 ± 12.0208 cuando se le aplica al Zytonic (aumento del 52.22% respecto al control y del 54.44 respecto al hidrofóbico). Los suelos con ceniza muestran valores ligeramente superiores al control, pero no significativos (49.78 ± 8.51735 en TCe y 50.15 ± 0.2121 en TCeZ:). Puesto que la propiedad de capacidad de campo ha dado correlación con el inicio de la percolación (P valor $0.0439 < 0.05$) queda claro que la percolación ha tardado más en aparecer porque se está reteniendo más agua en el suelo al tener más capacidad de retener agua.

Que el tratamiento TZ se parezca al TCeZ durante el periodo 1 podría significar que el Zytonic actúa sobre la capacidad del suelo de retener el agua de igual forma que lo hace la ceniza y además con mayor permanencia, puesto que en el segundo periodo la ceniza ha mostrado el inicio de la percolación sobre los mismos tiempos que el control, mientras que el tratamiento TZ sigue siendo elevado.

Tabla 6: Tabla resumen de los resultados generales del momento de inicio de la percolación (min)

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo
C _a	45.00	45.0	1.4142	43.5	47
T _a	35.60	35.0	6.4676	30.0	47
TZ _{ab}	53.40	54.0	16.5319	35.0	77
TCe _a	54.39	55.0	8.5860	43.0	67
TCeZ _b	52.45	52.4	2.6664	50.0	55
Periodo					
1	47.12	47	10.9623	30.0.0	67
2	49.47	47	11.5992	35	77

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

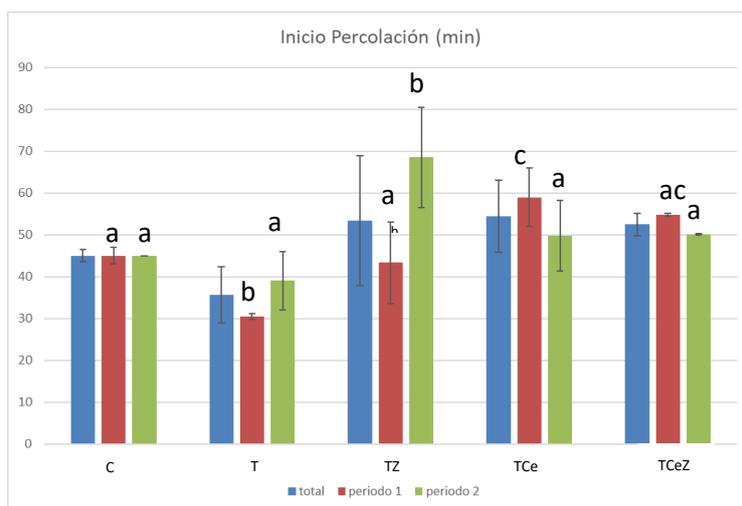


Figura 15: Gráfica de los resultados de los diferentes tratamientos en general y ambos periodos del inicio de la percolación

7. VOLUMEN DE ESCORRENTÍA

Debido a que las simulaciones duraron tiempos diferentes y por lo tanto el volumen de escorrentía total no es directamente comparable, se han elegido dos tiempos umbral, siendo estos los correspondientes a la experiencia más corta y a la más larga de su respectivo periodo. Puesto que una vez saturado por completo el suelo la tasa de escorrentía se mantendrá estable mientras no cambie la intensidad de la lluvia (el suelo en ese momento transmite el agua con un valor mínimo que se corresponde con su conductividad hidráulica), no hay problema en obtener el valor del volumen de escorrentía total de todos los ensayos correspondiente al momento de finalización de la simulación más larga.

En el primer periodo el tiempo mínimo fue de 60 minutos y el máximo de 110 minutos. Los valores medios, así como su desviación, se pueden observar en la tabla 7 y la figura 16. Los datos muestran que en lluvias de hasta 60 minutos hay diferencias significativas (figura 17), mostrando que los suelos tratados con Zytonic tanto en condiciones de superficie desnuda como cubierta con ceniza, pero que conforme va aumentando el tiempo hasta llegar los 110 dichas diferencias se van amortiguando.

Durante los primeros 60 minutos se observa que el suelo hidrofóbico ha generado mucha más escorrentía que el control, aumentando el volumen un 333.17% (desde 1421.5±2.12132 a 6157.5±300.52 mL) y la aplicación del Zytonic ha conseguido reducir la escorrentía un 63.64% en suelo desnudo (desde 6157.5±300.52 a 2239±263.044 mL) y un 40.17% (desde 3510±304.0526 a 2100±70.7107 mL) (P valor < 0.05), debido principalmente a la mayor lentitud con la que se alcanza la tasa de escorrentía.

Al alcanzarla tasa de escorrentía, las disparidades encontradas al minuto 60 desaparecen, debido principalmente a que la tasa de escorrentía de los tratamientos TZ, TCe y TCeZ son mayores que las del T. Por ello, al minuto 110 ya no se encuentran diferencias significativas (P valor 0.0765 > 0.05), aunque los rangos LSD de Fisher sí detectan una tendencia diferenciando 3 grupos; el primero, compuesto por el tratamiento T, siendo este el suelo desnudo e hidrofóbico el cual presenta un 47.57% de escorrentía más de media; el segundo grupo compuestos por el control, el tratamiento TZ y el TCe, aunque dentro de este grupo si se observa que el tratamiento TZ y TCe se desplazan a valores más desfavorables, llegando en caso de este último a valores cercanos a los obtenidos en el tratamiento T. En el tercer grupo está el tratamiento TCeZ que muestra una reducción de un 9.58% respecto al control y de un 44.98% respecto al suelo hidrofóbico con ceniza (figura 15)

Tabla 7: Tabla resumen de los resultados de volumen de escorrentía del primer periodo (mL)

Tratamiento	Volumen Escorrentía a los 60 min	Volumen Escorrentía a los 110 min
C	1421.5 ± 2.1213 (1420-1423) a	8528.3 ± 1533.71 (4166-11794) ab
T	6157.5 ± 300.5200 (5942-6370) c	16267.5 ± 1552.10 (11720-17365) c
TZ	2239.0 ± 263.0440 (2053-2425) b	11453.5 ± 454.67 (11132-11775) abc
TCe	3510.0 ± 304.0560 (33295-3725) d	14014.5 ± 647.00 (13560-14475) bc
TCeZ	2100.0 ± 70.7107 (2050-2150) b	7711.0 ± 3341.22 (3925-10245) a

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

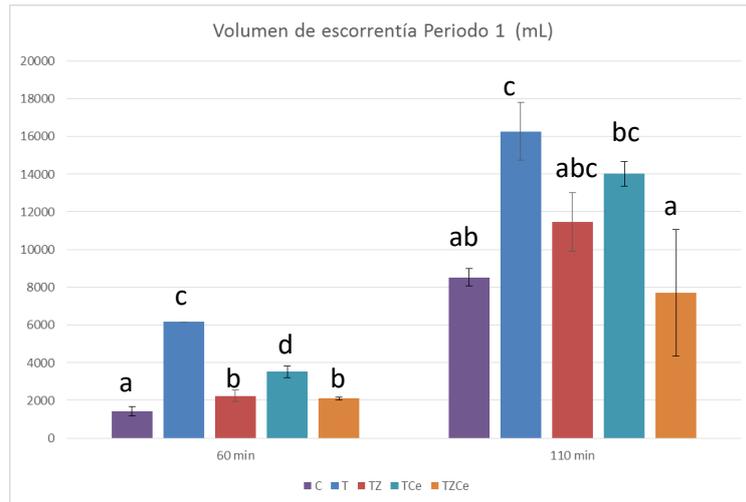


Figura 16: Gráfica de barras que muestra los volúmenes de escorrentía de los diferentes tratamientos al minuto 60 y al minuto 110 durante el primer periodo

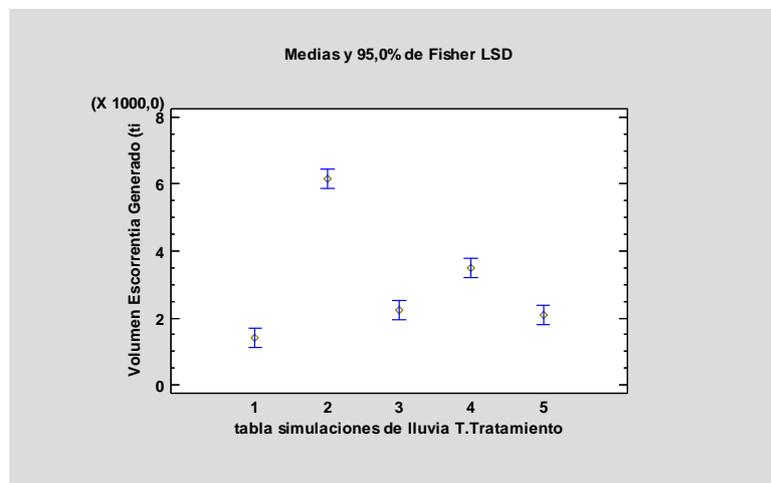


Figura 17: Gráfica LSD que muestra los valores de volumen de escorrentía a 60 minutos del primer periodo, siendo los tratamientos 1: C, 2: T, 3: TZ, 4: TCe, 5: TCeZ

Este comportamiento puede explicarse debido a que pese a tener la mayor tasa de escorrentía esta es una de las últimas en establecerse (apartados IV.2 y IV.3) siendo este un posible indicativo de que el Zytonic pueda usarse como herramienta frente a la erosión, ya que esta está correlacionada con la intensidad de la precipitación (Kavian y Mohamadi, 2015), y a su vez con la duración de la tormenta como muestran las curvas IDF (Intensity-Duration-Frecuency curve). En la figura 18 se puede observar como ejemplo que la intensidad está correlacionada inversamente con la duración de la tormenta. De esta forma se podría decir que en episodios de lluvias cortos el Zytonic podría llegar a ser una buena herramienta para la conservación del suelo ya que podría llegar a proteger el suelo de aquellos episodios de lluvias más erosivos.

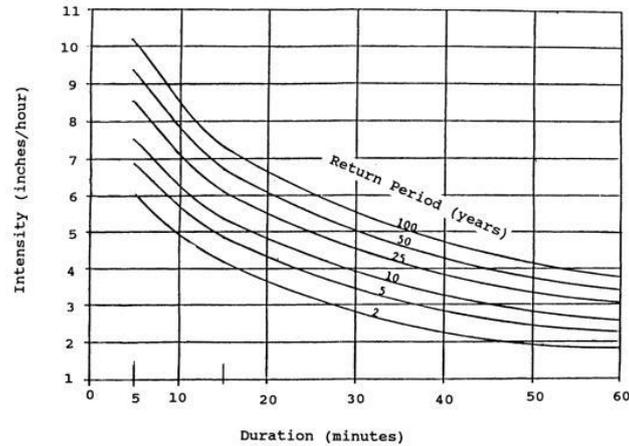


Figura 18: Curva IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia). Las curvas IDF relacionan la intensidad con la duración de la tormenta, mostrando diferentes curvas de periodos de retorno que indican la probabilidad de que suceda un episodio de lluvias con una intensidad y duración determinada. (FUENTE: The Climate Workspace, sf)

El volumen de escorrentía generado del segundo periodo se ha evaluado a los 60 minutos y a los 120 minutos. Las mayores diferencias, siendo estas significativas, se han encontrado en los volúmenes recogidos a los 60 minutos, donde el tratamiento TZ ha mostrado una escorrentía superior al resto (tabla 8 y figura 19). En cambio, a los 120 minutos ya no se observan diferencias significativas pese a seguir observándose esa tendencia de que el tratamiento TZ genera más escorrentía.

Tabla 8: Tabla resumen de los resultados de volumen de escorrentía del segundo periodo (mL)

Tratamiento	Volumen Escorrentía a los 60 min	Volumen Escorrentía a los 110 min
C	2888.50 ± 1765.65 (1640-4137) a	12628.50 ± 3406.13 (10220-15037)
T	2735.50 ± 184.56 (2605-2866) a	12903.00 ± 2267.12 (10414-14850)
TZ	5442.33 ± 1011.08 (4513-6519) b	14830.50 ± 9.90 (14823-14837)
TCe	2471.00 ± 7.07 (2567-2577) a	10932.00 ± 155.56 (10822-11042)
TCeZ	2337.50 ± 1184.40 (1500-3175) a	7752.67 ± 3865.67 (4425-11993)

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

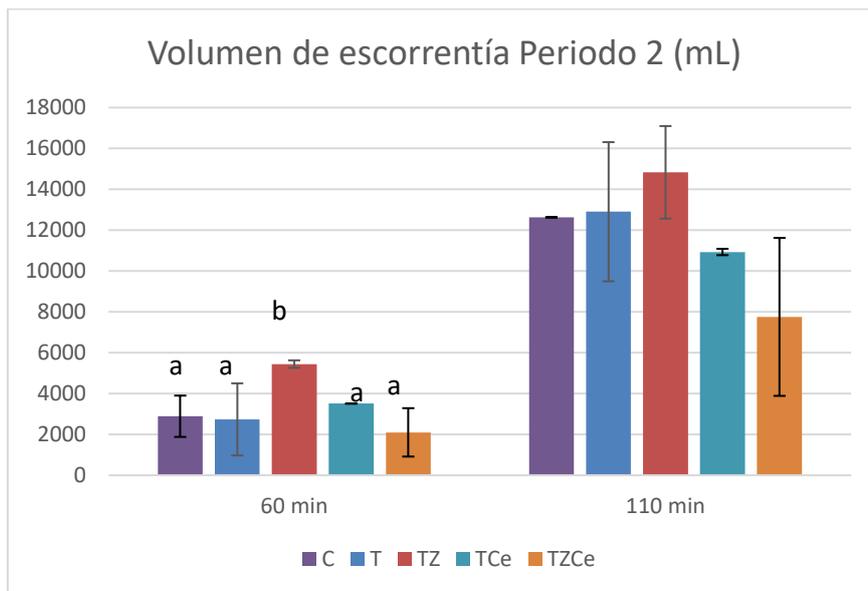


Figura 19: Gráfica que muestra los valores de volumen de escorrentía del segundo periodo diferenciando los tratamientos y agrupándolos por el momento

El motivo de esta diferencia del tratamiento TZ frente al resto se puede analizar a través de las gráficas de escorrentía (figura 20), donde se observa que la escorrentía en el tratamiento TZ comienza con más fuerza, mientras que el resto de los tratamientos que comienzan por el mismo tiempo como es el control o el hidrofóbico van más lentamente. Además, si se compara la gráfica de escorrentía del periodo 2 de dicho tratamiento con las gráficas del periodo 1 puede verse una similitud con el tratamiento TZ, pudiendo significar que el Zytonic ha perdido su efectividad mostrándose como un suelo hidrofóbico, o bien podría señalar que a raíz de la primera lluvia en el suelo se haya formado una costra superficial que fomente la escorrentía, explicando consigo el retraso en el inicio de la percolación y ese aumento de la escorrentía como observaron Zambon *et al* (2021),

Mientras, en los suelos con ceniza se muestra que el producto mejora sus beneficios en el suelo debido a que la ceniza aumenta la retención de agua en el suelo, disminuyendo además la tasa de escorrentía (Titsema, Stoof y Wesseling , 2010).

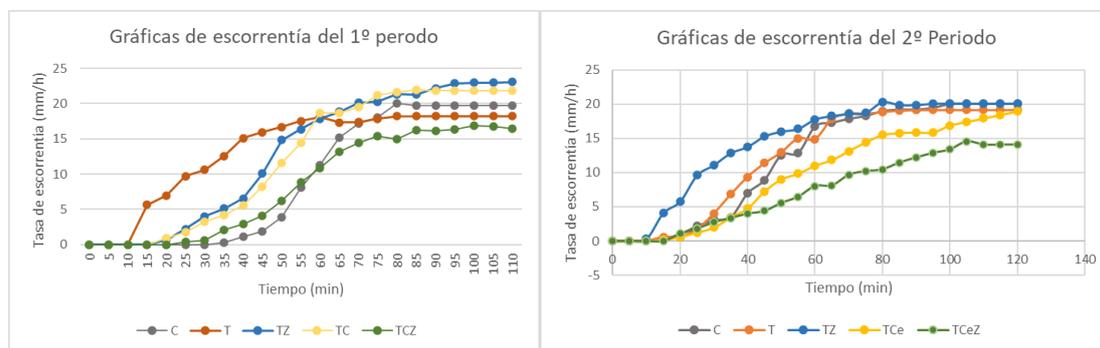


Figura 20: Gráficas de escorrentía

8. CARGA DE SEDIMENTOS DE LA ESCORRENTÍA

En la carga de sedimentos generados por la escorrentía no se observa diferencias estadísticamente significativas si se contemplan los dos periodos a la vez, pero sí en los suelos con ceniza, mostrando que el suelo 4 genera un gran cantidad de sedimentos, que incluyen tanto ceniza como suelo. (tabla 9 y figura 21)

Analizando el periodo 1 se observa una tendencia a que el suelo hidrofóbico reduzca la carga de sedimentos desde 1.2853 ± 0.9715 a 0.3001 ± 0.0221 g/L; la aplicación del Zytonic vuelve a subir la carga de sedimentos ligeramente a 0.5671 ± 0.1339 g/L, aunque sin llegar a los valores del control. En cuanto a los valores en suelos con ceniza si se observa que el suelo sin Zytonic muestra valores muy superiores de carga de sedimentos (14.269 ± 4.2450) y que la aplicación del mejorador devuelve los registros a los valores normales del control (3.8109 ± 2.6520).

En cuanto al segundo periodo se observa un comportamiento similar en el suelo con ceniza, con el tratamiento TCe siendo el que más sedimento genera con diferencia pasando de 1.661 ± 1.7922 g/L en el control a 5.123 ± 1.0864 ; el tratamiento TCeZ reduce la erosión de forma considerable consiguiendo disminuir la concentración de sedimentos por debajo del control (0.489 ± 2.6224 g/L). Sin embargo, en los suelos sin ceniza se muestra una diferencia estadísticamente significativa en el comportamiento del tratamiento TZ respecto a los otros dos, puesto que en este periodo la aplicación del Zytonic ha mostrado una reducción de la erosión del suelo, manteniéndose en valores similares al periodo 1 (0.5292 ± 1.6016 g/L), mientras que los tratamientos C y T han aumentado ligeramente su erosión (1.5286 ± 1.7926 y 1.072 ± 1.4044 g/L respectivamente).

Cabe destacar que el elevado valor de la carga de sedimentos del tratamiento TCe es debido a la pérdida de ceniza ocurrida durante el ensayo, la cual no se ha podido diferenciar de la pérdida de suelo. No obstante, se ha podido comprobar que el Zytonic consigue retener más ceniza en el suelo, de manera que ésta pueda seguir actuando como herramienta contra la erosión más tiempo. Además, el Zytonic ha mostrado que puede permanecer en el suelo pese a sufrir una lluvia al menos durante 30 días a raíz de los resultados del tratamiento TZ y TCeZ

Es posible que la disminución de erosión del tratamiento T durante el primer periodo sea debido al efecto que tiene el Terrasil de apelmazar las partículas de suelo para conferirle más impermeabilidad, viéndose revertida esta característica por el Zytonic y por ello se observa un ligero aumento de la erosión.

Tabla 9: Tabla resumen de los resultados de la carga de sedimentos de la escorrentía (g/L)

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo
C	1.4354	1.2300	0.8512	0.3427	2.3093
T	0.7630	0.7080	0.4844	0.2845	1.3662
TZ	0.5664 b	0.6260	0.1661	0.3083	0.7316
TCe	11.3071	10.9099	5.0537	6.4627	19.0400
TCeZ	2.1500	0.9015	2.4837	0.1279	6.2835
Periodo					
1a	4.3141	1.1200	5.8962	0.2845	19.0400
2b	1.8022	0.7929	2.3160	0.1279	7.2658

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

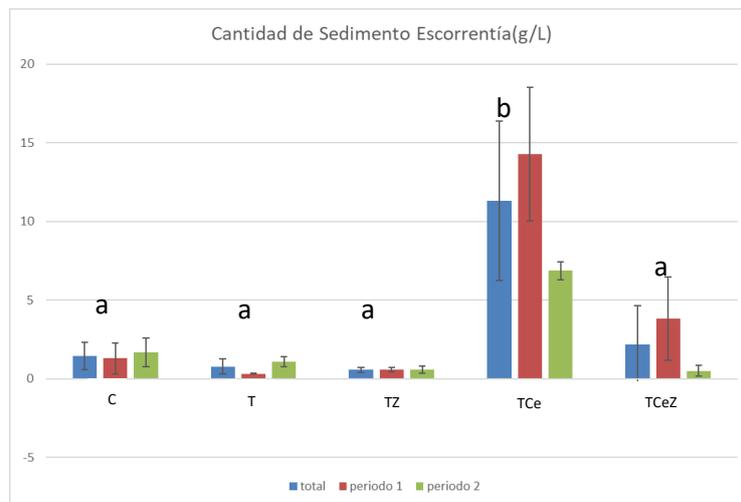


Figura 21: Gráfica de los resultados de los diferentes tratamientos en general y ambos periodos del inicio de la percolación

9. CARGA DE SEDIMENTOS DE LA SALPICADURA

En cuanto a los sedimentos recogidos por la salpicadura que ha caído fuera de la bandeja y se ha recogido mediante las alas no se han encontrado diferencias significativas entre los tratamientos (tabla 10). La única tendencia que podría destacarse es la observada en la figura 22 respecto al comportamiento de la salpicadura en los suelos con ceniza durante el segundo periodo, donde se observa que el suelo tratado con Zytonic sufre una erosión por salpicadura más fuerte que el suelo sin Zytonic (1.87556 ± 0.6405 g/L frente a 0.4594 ± 0.3995 g/L) siendo la tasa de erosión del control de 0.9357 ± 0.3256 g/L

Esta pérdida de suelo está muy relacionada con la estabilidad de los agregados (p valor $0.0039 < 0.05$), de manera que se puede decir, aunque las diferencias mostradas en la pérdida de suelo por el efecto de la salpicadura no son significativas, que sí están correlacionadas con una de las propiedades del suelo, mostrando que aquellos suelos más estables tienden a generar una mayor erosión por la salpicadura. Esto se relaciona nuevamente con el estudio de Zambon *et al* ya que una mayor estabilidad de los agregados indica una mejor estructura y una mayor permeabilidad (Cerdà *et al*, 2009), de manera que el suelo tarda más en encharcarse y protegerse con la película de agua del impacto de la gota, por lo cual las partículas finas de la ceniza tienden a erosionarse por este fenómeno

Tabla 10: Tabla resumen de los resultados de tasa de erosión de los diferentes tratamientos, así como los periodos (g/L)

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo
C	0.8834	0.8392	0.6222	0.0065	1.6997
T	0.6983	0.6394	0.4890	0.2554	1.2589
TZ	1.0857	0.9663	1.1037	0.1415	2.8341
TCe	0.4408	0.4223	0.2323	0.1769	0.7418
TCeZ	1.4658	1.6289	0.9069	0.0732	2.5767
Periodo					
1a	4.3141	1.1200	5.8962	0.2845	19.0400
2b	1.8022	0.7929	2.3160	0.1279	7.2658

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y t

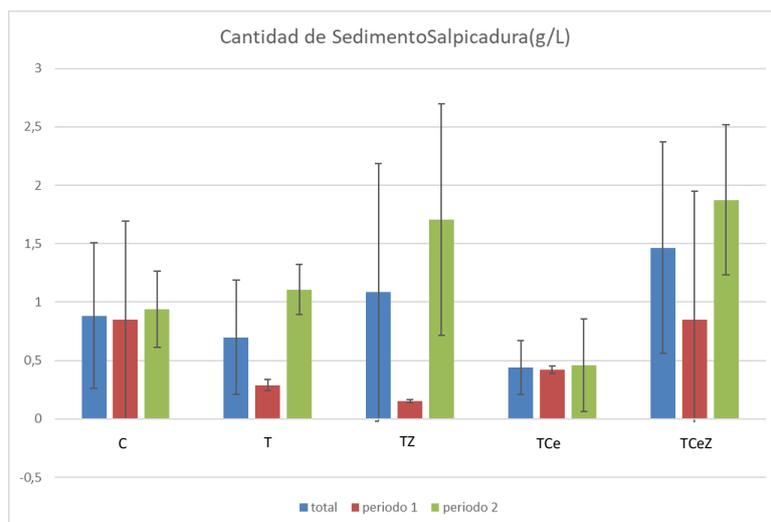


Figura 22: Gráfica de los resultados de tasa de erosión por salpicadura

10. ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS

La estabilidad de los agregados ha mostrado una correlación positiva con la porosidad (P valor $0.0295 < 0.05$) y además se observa diferencias entre los distintos tratamientos (tabla 11 y figura 23). Estas diferencias son significativas durante el 2º periodo, pero ya desde las primeras simulaciones se observa que una tendencia de que los tratamientos con ceniza mejoran bastante la estabilidad de agregados sobre todo respecto al control, mejorándola desde 10.4 ± 4.4397 (C) a 20.6295 ± 6.4011 (TCe) y 20.6138 ± 2.6142 (TCeZ). Estos mismos resultados se observaron en estudios donde se utilizaba la ceniza como enmienda orgánica como el estudio de Huang *et al* (2019). El Terrasil también muestra una pequeña subida de la estabilidad a 13.1613 ± 1.13167 . Esta diferencia respecto al control no es significativa, pero esa tendencia seguramente pueda ser explicada debido a que el Terrasil es un producto utilizado para impermeabilizar suelos ello implica apelmazar las partículas del suelo, de manera que esto se muestre como una mayor estabilidad de los agregados. El tratamiento TZ por su parte está en un rango intermedio entre el T y los tratamientos con ceniza con un valor de 16.9155 ± 6.8712 .

En cuanto al segundo periodo lo que se observa es que el Zytonic no altera la modificación que provoca el Terrasil en la estabilidad de los agregados mostrando tanto el tratamiento T, el TZ como el TCeZ la misma estabilidad (14.5042 ± 2.2596 , 17.3407 ± 0.7708 y 15.675 ± 2.4254 respectivamente) siendo estos valores superiores al control (3.67748 ± 2.2596) pero inferiores al tratamiento TCe (22.9306 ± 1.7301). La razón principal del por qué el tratamiento del Zytonic sobre la ceniza empeora la estabilidad de los agregados puede verse en la figura 25 la cual hace referencia a una foto tomada de la bandeja 13 antes de su segunda simulación. Como puede observarse la ceniza se ha apelmazado en una fina capa superficial, en cambio en las bandejas las cuales no se han tratado con Zytonic, la ceniza está en bloque con el suelo, de manera que la ceniza tiene más capacidad de hacer agregados. Pese a esto, el aumento de la agregación ha mostrad una correlación positiva con la pérdida de suelo por escorrentía (P valor $0.0465 < 0.05$). Seguramente la razón pueda ser que esa capa superficial comentada anteriormente, le confiere al suelo una resistencia a ser transportado que si no se le aplicase el Zytonic no tendría a costa de no ganar una estabilidad de agregados mayor.

Tabla 11: Resumen resultados de estabilidad de los agregados mostrando el valor medio, la desviación estándar y el rango de valores (%)

Tratamiento	Estabilidad de los agregados (1º Periodo)	Estabilidad de los agregados (2º Periodo)
C	10.4011 ± 4.4397 (5.4472-14.0207)	3.6775±3.6775 (2.0797-5.2752) a
T	13.1613 ± 1.1368 (12.1012-14.3617)	14.5042±0.7452 (13.7457-15.2354) b
TZ	16.9155 ± 6.8713 (10.3679-24.0702)	17.3407±0.7707 (16.4621-17.9027) b
TCe	20.6295 ± 6.8713 (16.6163-28.0115)	22.7841±1.7301 (21.2784-24.7293) c
TCeZ	20.6138 ± 2.6143 (18.3356-23.4681)	14.6498±2.4254 (13.9306-18.4447) b

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

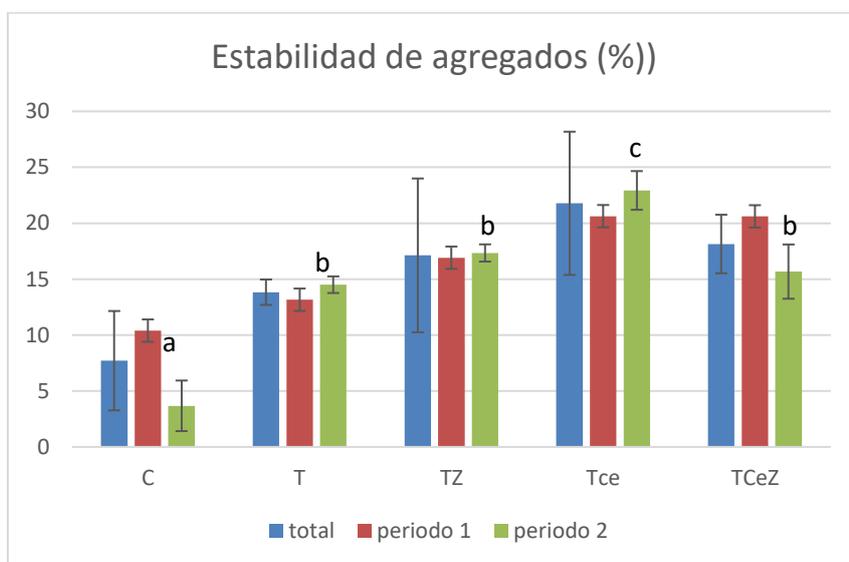


Figura 23: Resultados Estabilidad de los agregados

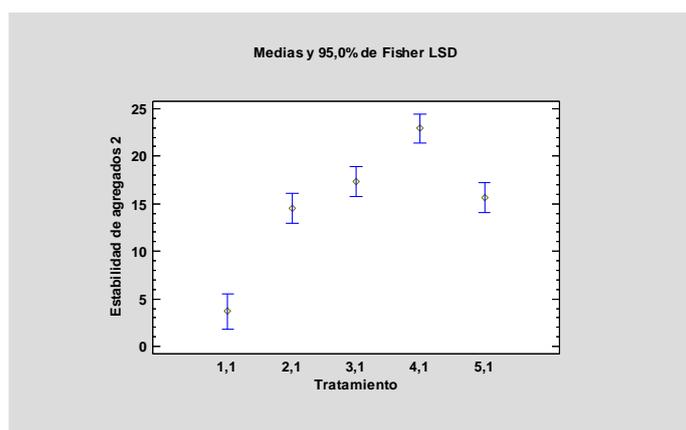


Figura 24: Gráfica LSD de la estabilidad de agregados en el 2º Periodo

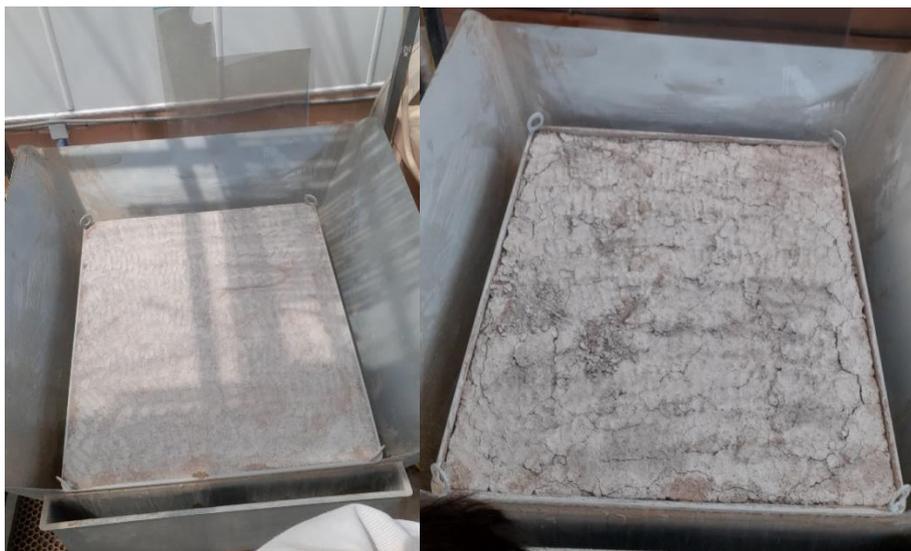


Figura 25: Diferencia entre una parcela con ceniza sin Zytonic (izquierda) y con Zytonic (derecha)

11. CAPACIDAD DE CAMPO

Los resultados de la capacidad de campo (CC) se pueden observar en la tabla 12. En esta propiedad se han encontrado diferencias significativas en el 1º periodo (P valor $0.062 < 0.05$) mostrando que es el tratamiento con Terrasil baja la capacidad de campo de 8.9733 ± 0.2036 a 6.0229 ± 1.8981 y el Zytonic consigue revertir dicho cambio mostrando valores similares al control (7.7246 ± 0.2707). En el escenario con ceniza, el tratamiento con Zytonic aumentó la capacidad de campo (11.2391 ± 0.1258), mientras que con Zytonic la capacidad de campo se mantuvo en valores similares al control (8.1999 ± 0.4396). Esto podría corroborar la hipótesis planteada en el apartado de Estabilidad de Agregados (IV-10) que decía que la ceniza sin Zytonic entraba en el suelo, mientras que con Zytonic, esta se mantenía en una lámina superficial. El motivo del por qué podría estos resultados soportar esta hipótesis es porque las cenizas al entrar en el espacio poroso del suelo, esta reduce la porosidad del suelo (tal y como se muestra en los resultados de porosidad IV-12), de modo que el agua tiene más dificultad para percolar y se retiene mejor en el suelo.

Tabla 12: Resumen resultados de la Capacidad de Campo (g_w/g_{ss})

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo (
C _a	8.8255 a	8.9733	1.1169	7.3336	10.022
T _a	6.4735 b	7.3651	1.5526	4.6808	7.3748
TZ _{ab}	8.7158	7.9706	1.4783	7.4346	10.9864
TCe _a	10.6105	11.1502	1.9175	7.3492	12.4051
TCeZ _b	8.4294 a	8.1999	1.3019	7.1291	10.1888
Periodo					
1	8.3677	7.9706	1.9308	4.68075	11.3281
2	9.3026	9.7198	1.8918	7.1291	12.4051

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic. G_{ss} = peso de agua contenida en el suelo, G_{ss} =Peso de suelo seco (105º)

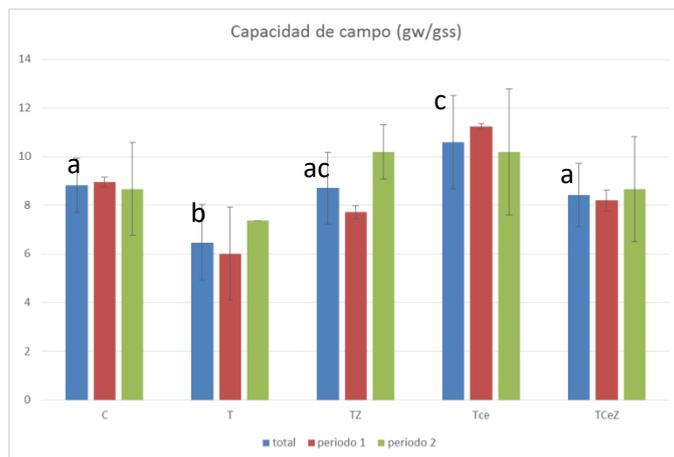


Figura 26: Resultados de la Capacidad de Campo

A su vez, a través la figura 26 que representa los valores para los diferentes periodos, se observa que es el periodo 1 donde hay más diferencias, siendo significativas al 90% pero no al 95 (P valor 0.076>0.05). Los intervalos LSD de Fisher (figura 27) indican que los suelos con ceniza consiguen almacenar más agua que los suelos desnudos, y que el resultado de aplicar el Zytonic sobre suelo desnudo está a mitad de camino entre el grupo de suelos desnudos y el de los suelos con ceniza. Esta propiedad de la ceniza de conseguir una mayor retención de agua ya se había relatado por autores como Bodí *et al* (2010) que mostraban que la ceniza era capaz de retener mucho el agua, ralentizando la aparición de escorrentía, así como disminuir su tasa.

Que estas diferencias no sean significativas tienen su explicación en que la capacidad de campo está muy relacionada con propiedades como la textura y el contenido en materia orgánica (De Aquino, Oliveira, Mota, 2015). Como puede verse en los siguientes apartados estas propiedades se mantienen constantes entre los tratamientos, pues dependen del tipo de suelo más que del tratamiento utilizado.

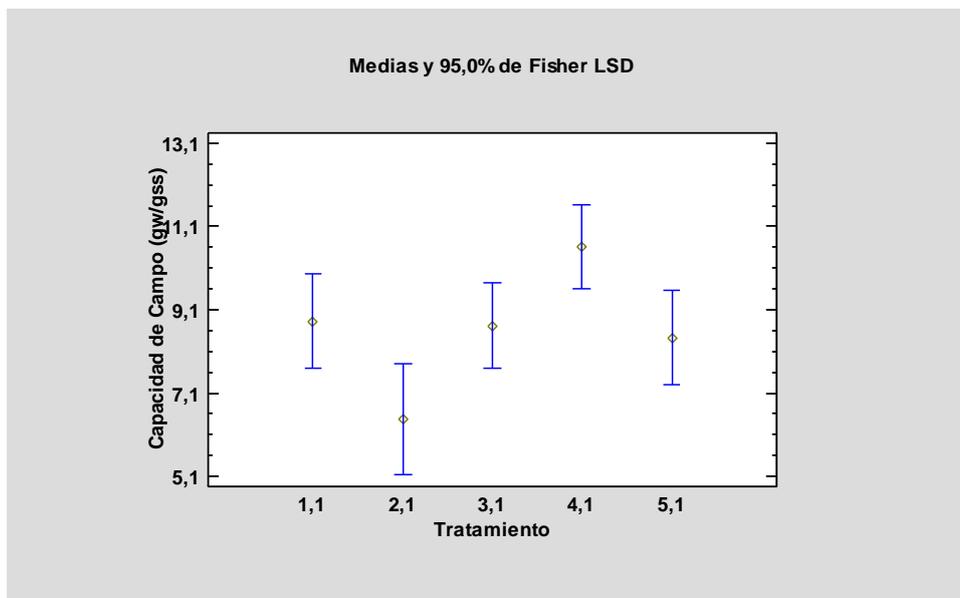


Figura 27: Gráfico LSD de la Capacidad de Campo según el tratamiento

12. POROSIDAD

Los resultados de porosidad se pueden observar a través de la figura 28 y la tabla 8, mostrando que sí hay diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, siendo éstas más notable durante el periodo 1. Lo que se observa es que el suelo hidrofóbico sin cubierta ha disminuido su porosidad y que los tratamientos con Zytonic mejoran la porosidad del suelo tanto con ceniza (aumento desde 31.9062 ± 5.8324 a 38.2631 ± 3.9216) como sin ceniza (29.8539 ± 0.166725 a 42.4119 ± 0.4134), mostrando un mayor cambio en los suelos sin ceniza.

La disminución de la porosidad puede estar relacionada con la propiedad del Terrasil con el apelmazamiento de las partículas del suelo con el propósito de impermeabilizarlo, dando lugar a una menor porosidad. Característica que revierte el Zytonic originando una mayor porosidad incluso que en el control.

La mayor porosidad observada se debe principalmente a un aumento de los macroporos, ya que no supone un aumento de la capacidad de campo (P valor $0.5017 > 0.05$) de manera que no aumenta la capacidad de retención de agua útil para las plantas, pero sí se observa que el suelo es capaz de almacenar más agua debido a esta propiedad viéndose reflejada esta relación con el tiempo que se tarda en alcanzar la tasa de escorrentía (correlación Estabilización – Porosidad $0.0336 < 0.05$).

Tabla 13: Tabla resumen de los resultados de Porosidad (%)

Tratamiento	Media	Mediana	SD	Mínimo	Máximo
C _a	32.6834	31.8581	4.7304	26.7887	38.4601
T _a	30.5241	29.7360	2.7156	26.0742	37.3432
TZ _{ab}	40.7416	42.1196	1.8429	33.8221	48.7210
TCe _a	34.8461	35.6193	2.0437	27.2868	42.1196
TCeZ _b	38.5535	39.7561	1.8553	31.1232	42.7042
Periodo					
1	35.5151	36.3380	5.3438	27.2868	42.7042
2	35.6034	35.6193	6.6842	26.0742	48.4240

C: Control, T: Suelo modificado con Terrasil (Hidrofóbico), TZ: Suelo modificado con Terrasil y tratado con Zytonic, TCe: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza, TCeZ: Suelo modificado con Terrasil con capa superficial de ceniza y tratado con Zytonic

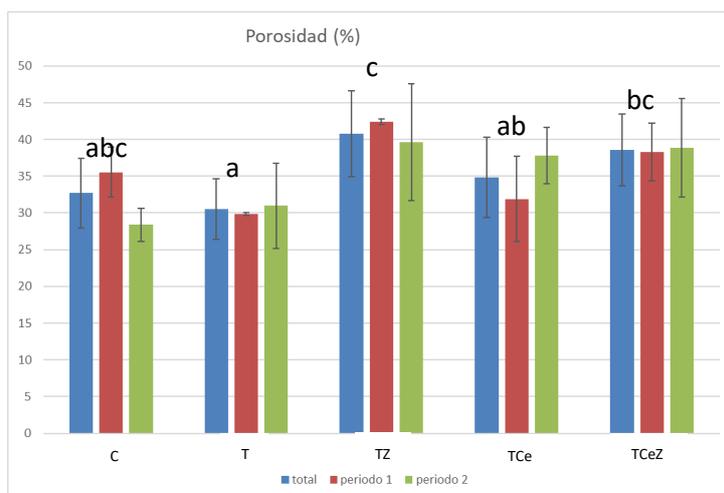


Figura 28: Gráfica resultados de la porosidad

CONCLUSIONES

Como conclusión del trabajo se puede afirmar que el Zytonic puede servir como enmienda para mejorar las condiciones del suelo después de un incendio, reduciendo la erosión hídrica e incluso mitigando los cambios en la conductividad hidráulica generada por la hidrofobicidad, al menos la producida por el Terrasil a raíz de los resultados de volúmenes de escorrentía y carga de sedimentos de la escorrentía

El producto Zytonic aplicado sobre suelo desnudo desprovisto de ceniza actúa protegiendo el suelo, provocando que la superficie sea capaz de almacenar más agua y aumentando su rugosidad, lo que se traduce en que el encharcamiento se produzca más tarde y el frente de escorrentía avance más lentamente.

Además, aumenta la porosidad del suelo, principalmente a nivel de macroporos, aproximadamente en un 25% en suelos desnudos durante el primer periodo. Esto permite que el suelo acumule más agua durante más tiempo, de manera que la cantidad de escorrentía avance más paulatinamente. De forma que, aunque la tasa de escorrentía final sea muy elevada puede servir como método de protección frente a las lluvias más erosivas que tienen las características de presentar una intensidad elevada y una duración corta. Incluso los datos de escorrentía de los suelos desnudos en el segundo periodo (pese a presentar un crecimiento de la tasa de escorrentía muy rápido) se presentan como positivos pues se deben a la formación de una pequeña costra que protege al suelo de la erosión provocada por la salpicadura de manera que a pesar de que la escorrentía aumente la cantidad de sedimentos que transporta es menor pues hay una menor disgregación de las partículas de suelo.

En cambio, en suelos con ceniza esta costra no se observa, sino que lo que ocurre es que se a consecuencia de la aplicación del Zytonic mantiene la ceniza en el suelo durante más tiempo y en forma de una lámina superficial. Esta lámina mantiene la ceniza durante más tiempo y por lo tanto mantiene la rugosidad y la capacidad de almacenar agua. El único inconveniente de los suelos con ceniza es que la estabilidad de agregados no aumenta debido a que la ceniza no entra en contacto con el suelo tal y como sí lo hace la ceniza cuando no se le aplica el Zytonic no formando tantos agregados estables. Otro inconveniente es que esa lámina en las segundas lluvias ha mostrado ser muy susceptible a la erosión por salpicadura, perdiendo un 70% más de suelo con ceniza por litro. Aunque sigue sin ser un problema en las segundas lluvias puesto que aún se registran valores de erosión hídrica inferiores al resto de tratamientos, tanto en tasa de escorrentía como en la cantidad de suelo perdido por escorrentía, ya que el haber mantenido una mayor cantidad de ceniza, esta puede seguir actuando como protección contra la erosión.

A raíz de estas conclusiones se puede decir que la mejor actuación es aplicar el Zytonic lo antes posible después de un incendio, para que este pueda actuar sobre la ceniza antes de que pueda ser arrastrada por el viento o el agua, y debido a que la empresa ha comunicado que el Zytonic tiene un periodo útil de 40 días, este podría aplicarse otra vez incluso aunque se hayan lavado las cenizas con tormentas previas, porque la pérdida de suelo sin cubierta de ceniza sigue siendo inferior en suelos sobre los cuales se le ha aplicado el Zytonic con respecto a los suelos a los que no se les ha aplicado producto.

Por último, cabría comentar que el producto debería probarse en campo con una hidrofobicidad causada por un incendio real y observar si el comportamiento de la costra o lámina se mantiene o tiene comportamientos diferentes, así como la interacción del Zytonic con el resto de las propiedades del suelo, o medir cómo el producto llega a favorecer una mayor regeneración de la cubierta vegetal.

V. BIBLIOGRAFÍA

Alves. R., Mota. M., De Aquino. L (2015). **Irrigation Management** en: Sugarcane: Agricultural Production, Bioenergy, and Ethanol. Academic Press. P 161-183

Benito E, Soto B, Varela E, Rodríguez M, Rodríguez J.A (2009) **Modificaciones inducidas por los incendios forestales en las propiedades físicas de los suelos del noroeste de España: implicaciones en la respuesta hidrológica y en la erosión hídrica**, en: Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España: el estado de la cuestión visto por los científicos españoles . Publicacions de la Universitat de València .pp 303-324

Bird, R.B, Bird, D.W, Coddling, B.F, Parker, C.H. y Jones J.H 2008. **The “fire stick farming” hypothesis Australian Aboriginal foraging strategies, biodiversity, and anthropogenic fire mosaic. Proceeding of the National Academy of Sciences.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Recuperado de: <https://www.pnas.org/content/105/39/14796>

Bisdom, EBA, Dekker, LW and Schoute, JFTh. 1993. **Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure.** *Geoderma*, 56: 105–118

Bodí, M.B., Cerdà. A., Mataix-Solera, J., Doerr. S.H., 2012, **Can vegetative ash be water repellent?** *Geophysical Research Abstracts Vol 14. Pp 13871-1 2012.*

Bodí. M.B, Doerr.S.H, A. Cerdà, Mataix-Solera. J., 2010. **Ash effects on water repellent and wettable soil hydrology during successive rainfall events immediately after a wildfire**, en Fuegoed 2010. Jornadas Internacionales: Investigación y gestión para la protección del suelo y restauración de los ecosistemas forestales afectados por incendios forestales. Ed: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). pp 115-118

Bond, W.J y Keeley, J.E. 2005. **Fire as global “herbivore”: The ecology and evolution of flammable ecosystems.** *Trends in Ecology and Evolution: Ecology & Evolution*, Volume 20, Issue 7. pp 387-394.

Cerdà. A, Bodí. M., Lasanta. T., Mataix-Solera. J., (2009) **Infiltración, estabilidad de agregados y erosión de suelos afectados por incendios forestales. Una visión a escala de pedón.** En: Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles. Ed Publicaciones de la Universitat Politècnica de València. pp 355-383.

Cerdà. A y Mataix-Solera, J. 2010. **Efectos de los incendios forestales de los suelos en España el estado de la cuestión visto por los científicos españoles.** Ed Publicaciones de la Universitat Politècnica de València.

Chenu, C, Le Bissonnais, Y and Arrouays, D. 2000. **Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability.** *Soil Science Society of America Journal (Soil Sci. Soc. Am. J)*, Volume 64: 1479–1486

Garmi. G y Berliner.P 2008, **The effect of soil crust on the generation of runoff on small plots in an arid environment.** *CATENA*, Volume 74, Issue 1 pp 37-42

Gholami. L., Hamidreza S.S., Homaei. M. 2013. **Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots.** *Soil Science Society of America Journal* Volume 77. Pp 268-278

Huang. R., Liu. J., Wang. Z., Gao. M (2019) **Effects of Different Soil Amendments Application on Soil Aggregate Stability and Soil consistency under Wetting and drying altered planting system** *Communications in Soil Science and Plant Analysis* Volume 50 Issue 18. Ed Taylor & Francis. Pp 2263-2277

Ibáñez. S., Moreno. H., Gisbert. J.M. 2012a **La ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE)** Riunet. Universitat Politècnica de València.

Ibáñez. S., Moreno. H., Gisbert. J.M. 2012b **El uso de un simulador de lluvia** Riunet. Universitat Politècnica de València.

Ibáñez. S., Moreno. H., Gisbert. J.M. 2012c **Medidas de conservación de suelos frente a la erosión hídrica** Riunet. Universitat Politècnica de València.

Ibáñez. S., Moreno. H.R., Gibert. J.M., 2012d **Técnicas de medida del espacio poroso del suelo.** Riunet. Universitat Politècnica de València.

IDF Curve (s.f.) The Climate Workspace, visto el 15 de julio de 2021. <http://www.glisacclimate.org/node/2341>

Ikenna. 2018. **A wet sieving apparatus for determining aggregate stability of soils** *The Journal of Professional Engineers of Trinidad and Tobago* Vol 46. pp 35-40

James, S. R 1989. **Hominid use of fire in the Lower and Middle Pleistocene.** *Current Anthropology*, 30 1-26

Kibler. D.F., Bushy. C.E., 1970. **A guide to the Development of an Air Force Erosion Manual.** *Water Resources Engineers, Inc.*, Nov. 1970, 238 pp

King, PM. 1981. **Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement.** *Australian Journal Soil Research (Aust. J. Soil Res)*, 19: 275–285

Kumar. R., Singh. V., Upadhyay. A (2017). **Planning and Evaluation of Irrigation Projects** Ed. Academic Press. Pp 678

Mataix-Solera, J. y Cerdà, A. 2009. **Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos** . En: Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles. Ed Publicaciones de la Universitat Politècnica de València pp 25-53

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. 2019. **Los incendios Forestales en España. Decenio 2006-2015.** Ed Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica pp 166

Mohamadi. A.M., Kavian.A 2015. **Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in fields plots** *International Soil and Water Conservation Research.*, pp 273-281

Naveh, Z. 1974. **Effects of fire in the Mediterranean region** *Fire and ecosystems*, Academic Press, pp 401-434

Naveh. Z. 1975. **The evolutionary significance of fire in the Mediterranean Region,** *Vegetatio*, 29, 199-208.

Pereira, P., Cerdà, A., Úbeda, X., Mataix-Soler, J., Martín, D., Jordán López, A. y Burguet Marimon, M. (2012). **Effects of fire on ash thickness in a Lithuanian grassland and short-term spatio-temporal changes.** *Solid Earth Discussions*, 4 (2), 1545-1584.

Poesen, J. 1986a. **The role of slope angle in surface seal formation.** *International Geomorphology Journal* 2, V. Gardiner, Ed Wiley, 437-447.

Poesen, J 1986b. **Transport of rock fragments by rill flow- a field study. "Rill Erosion. Processes and significance".** *Catena Supplement*, 8. PP 35-54.

Power, M.J., Marlon, J., Ortiz, N., Bartlein, P.J., Harrison, S.P., Mayle, F.E., Ballouche, A., Bradshaw, R.H.W., Carcaillet, C., Cordova, C., Mooney, S., Moreno, P.I., Prentice, I.C., Thonicke, K., Tinner, W., Whitlock, C., Zhang, Y., Zhao, Y, Ali, A.A., Anderson, R.S., Beer, R., Behling, H., Briles, C., Brown, K.J., Brunelle A., Bush, M., Camill, P., Chu, G.Q., Clark, J., Colombaroli, D., Connor, S., Daniu, A.-L., Daniels, M., Dodson, J., Doughty, E., Edwards, M.E., Finsinger, W., Foster, D., Frechette J., Gaillard, M.-J., Gavin, D.G., Gobet, E., Haberle, S., Hallett, D.J., Higuera, P., Hope, G., Horn, S., Inoue, J., Kaltenrieder, P., Kennedy, L., Kong, Z.C., Larsen, C., Long, C.J., Lynch, J., Lynch, E.A., McGlone, M., Meeks, S., Mensing, S., Meyer, G., Minckley, T., Mohr, J., Nelson, D.M.47, New, J.30, Newnham, R., Noti, R., Oswald, W., Pierce, J., Richard, P.J.H., Rowe, C., Sanchez Goñi, M.F., Shuman, B.N., Takahara, H., Toney, J., Turney, C., Urrego-Sanchez, D.H., Umbanhowar, C., Vandergoes, M., Vanniere, B., Vescovi, E., Walsh, M., Wang, X., Williams, N., Wilmshurst, J., Zhang, J.H.. 2008. **Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum. An assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data.** *Climate Dynamics* 30, 887–907.

Raviña. M. D, Benito.E, Carballas.T, Fontúrbel. M. T., Vega. J. A (2010) **Fuegored 2010. Jornadas Internacionales: Investigación y gestión para la protección del suelo y restauración de los ecosistemas forestales afectados por incendios forestales.** Ed: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Santos. F., Borém. A., Caldas, C., (2012). **Sugarcane: Agricultural Production, Energy and Ethanol.** Academic Press

T.T Kozlowski y C.E Ahigren (1974) **Fire and ecosystems.** Academic Press

Úbeda. X. & Bernia. S., (2005). **The effect of wildfire intensity on soil aggregate stability in the Cadiretes Massif, NE Spain.** *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins.* 299.pp 793-796.

Veon. W.J and Miller. A.C. 1997 **Soil Properties that affect erosion.** *Transportation Research Record*

Young. R.A., 1984 **A method of measuring aggregate stability under waterdrop impact.** *Journal of the ASAE, Volume 27, Issue 5. pp 1351-1354*

Zambon. N., Johannsen L.L., Strauss. P., Dostal. T., Zúmr. D., Cochrane. T.A., Klik.A. 2021 **Splash erosion affected by initial moisture and surface conditions under simulated rainfall.** *Catena* Volume 196. Issue 16.