

# Trabajo Fin de Grado

## Grado de Ciencias Ambientales

La relación entre el contenido de humedad volumétrica (%) y el potencial hídrico del suelo mediante curvas de retención de agua en la restauración geomorfológica y convencional

The relationship between volumetric soil moisture content (%) and soil water potential using water retention curves in geomorphological and conventional restoration

*Autor/es*

Tareq Talib

*Director/es*

Jaume Tormo Blanes

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

2021

## **Agradecimientos**

*Quiero agradecer a todos los profesores tanto de dentro como fuera de la universidad por su paciencia y ayuda, en especial a Jaume Tormo por sus consejos y tiempo dedicado. También agradecer a David Moret por su implicación en este trabajo, ya que nos ha proporcionado datos y explicaciones que sin ellas no hubiera sido posible desarrollar este trabajo.*

## Índice

<b>RESUMEN</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
<b>2 MATERIAL Y MÉTODO</b> .....	<b>14</b>
2.1    ÁREA DE ESTUDIO .....	14
2.2    DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) Y DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SUELO	15
2.3    OBTENCIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO (KPA) Y LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD .....	17
2.4    ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	20
<b>3 RESULTADOS</b> .....	<b>22</b>
3.1    CURVAS DE RETENCIÓN DE AGUA Y LA RELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) Y EL POTENCIAL HÍDRICO.....	22
3.2    LA EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) Y EL POTENCIAL HÍDRICO (KPA) DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.....	26
3.3    LA COMPARACIÓN ENTRE LAS UNIDADES TRATADAS CON RESTAURACIÓN GEOMORFOLÓGICA.....	28
3.4    LA DIFERENCIA DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) Y POTENCIAL HÍDRICO (KPA) DE LAS GEOFORMAS DEL GFP Y GFG.....	30
3.5    LA DIFERENCIA DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) Y POTENCIAL HÍDRICO (KPA) DE LAS GEOFORMAS DEL GFP Y GFG.....	32
<b>4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN</b> .....	<b>34</b>
<b>5 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>37</b>
<b>6 LISTADO DE ANEJOS</b> .....	<b>40</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Vistas panorámicas de dos zonas mineras. A). Cantera para extracción de caliza para cemento de la empresa CEMEX en San Vicent del Raspeig (Alicante) donde se pueden observar los frentes y las escombreras con formas geométricas. B). Frentes y escombreras en una mina de caolín abandonada en el Riodeva (Teruel).....	9
Figura 2. Foto de una restauración geomorfológica. Mina de caolín recientemente restaurada utilizando la aproximación geomorfológica en el Riodeva (Teruel). Fuente: Jaume Tormo Blanes.....	10
Figura 3. Ejemplo de la curva de retención de humedad para un suelo franco limoso, donde $\theta_s$ es el punto de saturación y $\theta_r$ es el contenido residual en agua. Fuente: Fredlund and Xing, 1994.....	12
Figura 4. Ecuación del modelo de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980).....	12
Figura 5. LOCALIZACIÓN DE LA MINA FORTUNA. FUENTE: <a href="http://www.agroambient.gva.es/es/web/life-tecmine/localización">HTTP://WWW.AGROAMBIENT.GVA.ES/ES/WEB/LIFE-TECMINE/LOCALIZACIÓN</a> .....	14
Figura 6. Script de R modificado para obtener los potenciales hídricos en cm. Fuente: Elaboración David Moret .....	19
Figura 7. Script de R modificado para obtener las curvas de retención de humedad. ....	20
Figura 8. Las curvas de retención de humedad de los transectos del GFGU y el transecto del GFGS.....	22
Figura 9. Las curvas de retención de humedad de los transectos del GFPE y los transectos del GFGW. ....	23
Figura 10. las curvas de retención de humedad de los transectos del TM.....	24
Figura 11. Las curvas de retención de humedad de los transectos del TC. ....	25
Figura 12. Las curvas de retención de humedad de los transectos del ER. ....	25
Figura 13. La evolución de la humedad volumétrica (%) en los diferentes tratamientos. Los datos con la que se hizo esta tabla está en el anexo 3 (tabla i). ....	26
Figura 14. La evolución del potencial hídrico (kPa) en los diferentes tratamientos. Los datos con la que se hizo esta tabla está en el anexo 3 (tabla ii).....	28
figura 15. La evolución de la humedad volumétrica (%) en las unidades del geofluj. los datos con la que se hizo esta tabla está en el anexo 3 (tabla iii). ....	29
Figura 16. La evolución del potencial hídrico (kPa) en las unidades del Geofluj. Los datos con la que se hizo esta tabla está en el anexo 3 (tabla iv).....	30
Figura 17. La evolución de la humedad volumétrica (%) de las diferentes geoformas del GFG y el GFP. Los datos con la que se hizo esta tabla está en el anexo 3 (tabla v).....	31
Figura 18. La evolución del potencial hídrico (%) de las diferentes geoformas del GFG y el GFP. Los datos con la que se hizo esta tabla está en el anexo 3 (tabla VI) .....	32

figura 19. Diferencia de humedad volumétrica (%) entre unidades donde se usó el coluvión como sustrato y las unidades donde no se usó. los datos con la que se hizo esta tabla está en el anexo 3 (tabla VII)..... 33

figura 20. Diferencia del potencial hídrico (kPa) entre unidades donde se usó el coluvión como sustrato y las unidades donde no se usó. los datos con la que se hizo esta tabla está en el anexo 3 (tabla VIII). ..... 33

**Índice de tablas**

Tabla 1. Tipo de espacios degradados que se puede establecer en base al criterio de la profundidad de afección en la columna vertical (Gómez Sal y Nicolau 1999)..... 8

Tabla 2. Resultados de la prueba z por pares de Dunn de las humedades volumétricas de los tratamientos Geofluv, TM, TC y ER ..... 27

Tabla 3. Resultados de la prueba z por pares de Dunn de los potenciales hídricos de los tratamientos Geofluv, TM, TC y ER ..... 28

Tabla 4. resultados de la prueba z por pares de dunn de la humedad volumétrica de las unidades del geofluv. .... 29

Tabla 5. Resultados de la prueba z por pares de Dunn de los potenciales hídricos de los tratamientos..... 30

## Resumen

La minería es una actividad imprescindible para la sociedad actual, pero provoca un gran impacto ambiental que afecta al suelo, vegetación y geomorfología-geología. Esto plantea un reto, devolver la funcionalidad a los ecosistemas tras el final de la explotación minera. La restauración convencional se basa en modelado topográfico tipo plataforma-berma-talud, propenso a sufrir procesos de erosión que impiden el desarrollo de ecosistemas funcionales. Frente a esto aparece la restauración geomorfológica basada en el manejo de la escorrentía que evita la erosión permite el desarrollo de ecosistemas funcionales.

En la explotación mina Fortuna (Ademuz, Valencia), algunas zonas se trataron mediante restauración geomorfológica, otras zonas mediante el método convencional y una tercera zona que no se trató. Además, en algunas zonas se usó el coluvión como sustrato para reconstruir el suelo.

Se ha estudiado la relación entre la humedad volumétrica y el potencial hídrico y su evolución estacional en zonas con restauración convencional y geomorfológica y en zonas con y sin coluvión.

La disponibilidad de agua es mayor en zonas con restauración geomorfológica respecto a las zonas con restauración convencional. El aporte de coluvión también aumenta la disponibilidad de agua. En este tipo de suelos, la humedad volumétrica es un buen proxy de la disponibilidad de agua ya que la correlación entre las dos variables es muy elevada.

**Palabras clave:** Geofluv, Van Genuchten, curvas de retención de humedad, humedad volumétrica, potencial hídrico, coluvión.

## Abstract

Mining is an essential activity for the development of today's society, but it causes a great environmental impact which affects soil, vegetation and geomorphology-geology. This poses a challenge: to restore the functionality of ecosystems after the end of mining operations. Conventional restoration is based on the model "platform-berm-slope", which is prone to erosion processes which prevent the development of functional ecosystems. In contrast, geomorphological restoration, based on runoff management, avoids erosion and allows the development of functional ecosystems.

In the Fortuna mine (Ademuz, Valencia), some areas were treated by geomorphological restoration, other areas by the conventional method and a third area was not treated. In addition, in some areas, colluvium was used as a substrate to reconstruct the soil.

The relationship between volumetric moisture and water potential and its seasonal evolution was studied in areas with conventional and geomorphological restoration and in areas with and without colluvium.

Water availability is higher in areas with geomorphological restoration than in areas with conventional restoration. The contribution of colluvium also increases water availability. In this type of soil, volumetric moisture is a good proxy for water availability since the correlation between the two variables is very high.

**Keywords:** Geofluv, Van Genuchten, moisture retention curves, volumetric humidity, water potential, colluvion.

# 1 Introducción

El modo de vida de la sociedad contemporánea exige unos niveles altos de consumo de energía y materias primas, lo que hace que hoy en día dependamos en gran parte de la minería para satisfacer nuestras necesidades. Esto hace de la minería una actividad imprescindible pero que al mismo tiempo produce un gran impacto ambiental.

La minería al igual que otras actividades, causa impactos ambientales y por ello es útil clasificar los espacios degradados en el medio terrestre en virtud de la profundidad que es afectada la “columna vertical” vegetación-suelo-subsuelo (Toy y Hadley, 1987). En la tabla 1 se relacionan algunas actividades con la afección que se produce en “la columna vertical”.

Vegetación	Vegetación + Suelo	Vegetación + Suelo + Geología- Geomorfología
Cultivos abiertos: setos	Suelos contaminados (3)	<u>Áreas afectadas por actividades mineras</u> <u>(1,3)</u>
vivos eliminados (2)	Cultivos en laderas abandonados, con erosión intensa (1,2)	Infraestructuras lineales (carreteras, ferrocarril, gasoductos, canales, etc.) (1)
Bosques con especies exóticas (4)	Áreas sobre pastoreadas (2)	Vertederos y zonas periurbanas degradadas (1) (3)
	Replantaciones forestales en aterrazamientos, fallidas (1) (4)	
<b>Tipos de espacios degradados. Mecanismos de degradación:</b>		
<b>(1) Perturbación mecánica. (2) Sobreexplotación. (3) Contaminación - vertido de residuos. (4) Introducción de especies exóticas</b>		

TABLA 1. TIPO DE ESPACIOS DEGRADADOS QUE SE PUEDE ESTABLECER EN BASE AL CRITERIO DE LA PROFUNDIDAD DE AFECCIÓN EN LA COLUMNA VERTICAL (GÓMEZ SAL Y NICOLAU, 1999).



Como se muestra en la tabla 1, la minería es una de las actividades que afecta a los 3 compartimentos, provocando una severa alteración de la funcionalidad de los ecosistemas (Nicolau, 2003a).

Compaginar la minería con la sostenibilidad de los ecosistemas es un reto complicado y por ello, el desarrollo de métodos de restauración funcionales juega un papel fundamental. En la zona objeto de estudio se han llevado a cabo dos tipos de restauración que se expondrán a continuación; 1) La restauración convencional basada en el modelo plataforma-berma-talud y 2) la restauración geomorfológica mediante el método Geofluv.



**FIGURA 1. VISTAS PANORÁMICAS DE DOS ZONAS MINERAS. A). CANTERA PARA EXTRACCIÓN DE CALIZA PARA CEMENTO DE LA EMPRESA CEMEX EN SAN VICENT DEL RASPEIG (ALICANTE) DONDE SE PUEDEN OBSERVAR LOS FRENTES Y LAS ESCOMBRERAS CON FORMAS GEOMÉTRICAS. B). FRENTES Y ESCOMBRERAS EN UNA MINA DE CAOLÍN ABANDONADA EN EL RIODEVA (TERUEL).**

Hasta el momento el modelo plataforma-berma-talud ha sido el más usado y tiene como objetivo principal garantizar la estabilidad geotécnica de las formas de relieve para evitar los deslizamientos y ocupar la menor superficie posible (Nicolau, 2003a).

Este método se caracteriza por imponer formas rectilíneas y abruptas en el medio natural (Figura 1), estas formas a largo plazo no son estables ya que son topografías inmaduras donde predomina la erosión hídrica (Nicolau, 2003b). Esta erosión del suelo juega un papel fundamental en el rendimiento de las revegetaciones y la colonización espontánea, ya que contribuye a acentuar el déficit hídrico en las laderas restauradas, lo que en muchas ocasiones provoca el fracaso de la restauración (Espigares et al.,2011).

Ante este problema se han buscado técnicas de restauración que proporcionan a las áreas degradadas mayor estabilidad frente la erosión hídrica, para ello la restauración geomorfológica aparece como una solución alternativa de restauración minera exitosa (Zapico et al.,2018).



**FIGURA 2. FOTO DE UNA RESTAURACIÓN GEOMORFOLÓGICA. MINA DE CAOLÍN RECIENTEMENTE RESTAURADA UTILIZANDO LA APROXIMACIÓN GEOMORFOLÓGICA EN EL RIODEVA (TERUEL). FUENTE: JAUME TORMO BLANES.**

Uno de los métodos más innovadores de la restauración geomorfológica es el método patentado por Nicolas Bugosh (2000) en Estados Unidos denominado Geofluv y el software Natural Regrade que lo ejecuta, el objetivo de este método es identificar y diseñar formas estables ante la erosión hídrica para una concreta zona objeto de restauración (Martinduque & Bugoch, 2014).

Esta herramienta funciona a partir de tres inputs: morfológicos, climatológicos e hidrológicos. Utilizando estos datos, el software permite diseñar laderas y valles por donde discurre una red de drenaje, que incluye desde canales hasta llanuras aluviales que, al contrario que en la restauración convencional, estas formas no se sobren imponen al medio

natural, sino que se busca crear paisajes armónicos con las condiciones geomorfológicas existentes (Martin-duque & Bugoch, 2014).

Una de las fases importantes y críticas de la restauración ecológica es el éxito de la revegetación. En ambientes mineros mediterráneos, el principal factor limitante para el éxito de la revegetación es la disponibilidad hídrica (Moreno de las Heras et al., 2008) y por ello, es imprescindible realizar un estudio previo de la disponibilidad de agua para las plantas en la zona objeto de estudio. A priori se espera que en aquellas zonas restauradas mediante método Geofluv haya mayor disponibilidad de agua para las plantas, ya que la erosión es menor.

Para esta misma zona objeto de estudio se realizó un Trabajo Final de Máster donde se analizó la evolución de la humedad volumétrica (%) del suelo en zonas con tratamientos convencionales y zonas tratadas con el método *Geofluv*, las medidas de humedad se realizaron a partir de la técnica de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR, por sus siglas en inglés), tanto en este trabajo como en dicho TFM se han usado valores de humedad obtenidos mediante esta técnica (Garcia, 2021).

En este trabajo además de la humedad volumétrica se va a analizar la evolución de los potenciales hídricos en los diferentes tratamientos y se comprobará la correlación entre estas dos variables.

Una de las propiedades hidráulicas más importantes es la curva de retención de humedad (CRH) (Nielsen & Wendroth, 2003). La CRH se define como la relación entre la humedad volumétrica (%) y su potencial hídrico, lo que refleja la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión (Martinez-Fernandez, 1995). Generalmente la gráfica donde se representa dicha curva (Figura 3) se representa con la humedad volumétrica (eje Y) y succión (eje X).

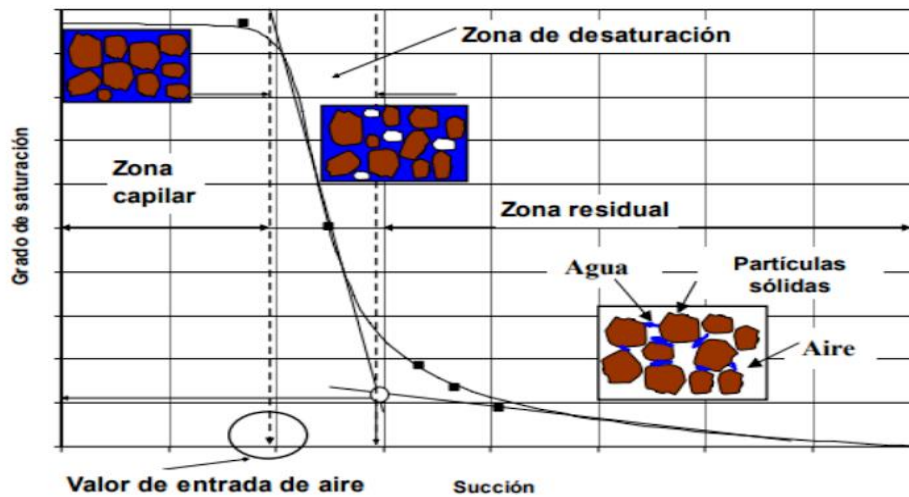


FIGURA 3. EJEMPLO DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD CON SUS REGIONES CARACTERÍSTICAS (PÉREZ, 2008)

Tras las precipitaciones el agua se infiltra y satura los poros del suelo, pero una vez que cesa la lluvia los poros de mayor tamaño drenan por la fuerza de la gravedad mientras que los pequeños siguen estando saturados durante más tiempo. Conforme se van quedando saturados sólo los poros de menor tamaño, la velocidad del flujo va disminuyendo y el agua se queda retenida con más fuerza lo que dificulta a las raíces la absorción del agua. Si tras un periodo el suelo no es humedecido, el agua se sigue eliminando mediante procesos de evaporación y evapotranspiración, y llegará un punto en el que la energía con la que es retenido esta agua sea mayor a la que la capacidad de la raíz para extraer agua, este punto es el denominado punto de marchitez permanente (Porta et al., 2003).

La energía con la que es retenida el agua por el suelo, se denomina potencial hídrico y es expresado en unidades de presión, Pascales (Pa), y tiene signo negativo debido a que se opone al movimiento del agua. Por ello, cuanto más negativo sea este valor, mayor energía necesita la raíz para extraer agua del suelo (Casanova, 2018).

Para obtener la curva de retención de humedad hay varios modelos matemáticos como el de Brooks and Corey (1964) o el de Van Genuchten, obteniendo unos valores más exactos este segundo (Bebegall Beltrán, 2017). En este trabajo se va a utilizar el modelo de Van Genuchten (1980), este relaciona la humedad volumétrica ( $\theta$ ) con el potencial ( $h$ ) (Figura 4).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

FIGURA 4. ECUACIÓN DEL MODELO DE VAN GENUCHTEN (VAN GENUCHTEN, 1980).

Donde:

- $\vartheta$  = Contenido volumétrico de humedad.
- $\vartheta_s$  = Contenido volumétrico de agua en saturación.
- $\vartheta_r$  = Contenido volumétrico de agua residual.
- $\alpha$  = Es un parámetro de escala inversamente proporcional a la media de diámetro de poros.
- $h$  = Potencial hídrico.
- $n$  y  $m$  = Son parámetros de forma de la curva de retención de suelo, donde  $m=1-1/n$  (Van Genuchten, 1980).

Por todo esto, y vista la necesidad de entender las diferencias en la dinámica del agua en los suelos de restauraciones convencionales y de restauraciones geomorfológicas nos planteamos los siguientes objetivos:

- Comparar la dinámica del potencial hídrico de las zonas restauradas mediante el método convencional y zonas restauradas geomorfológicamente.
- Comparar las medidas de humedad y potencial para testar si pueden ser intercambiables.
- Describir la evolución estacional del potencial hídrico en cada tratamiento.

Además de estos objetivos principales planteados en la propuesta, en el desarrollo de este trabajo nos hemos planteado la diferencia de humedad volumétrica y potenciales hídricos de aquellas unidades donde se usó el coluvión como sustrato para reconstruir el suelo y las unidades donde no se usó el coluvión.

## 2 Material y método

### 2.1 Área de estudio

La zona objeto de estudio es la mina Fortuna que se encuentra en el municipio de Ademuz (Valencia), en una zona limítrofe entre Aragón y la Comunidad Valenciana. Se trata de una explotación minera de la cual se estuvo extrayendo caolín y arena silíceo desde los años 40 del s. XX. Al principio por minería subterránea y a partir de los 70 del siglo pasado por minería a cielo abierto.

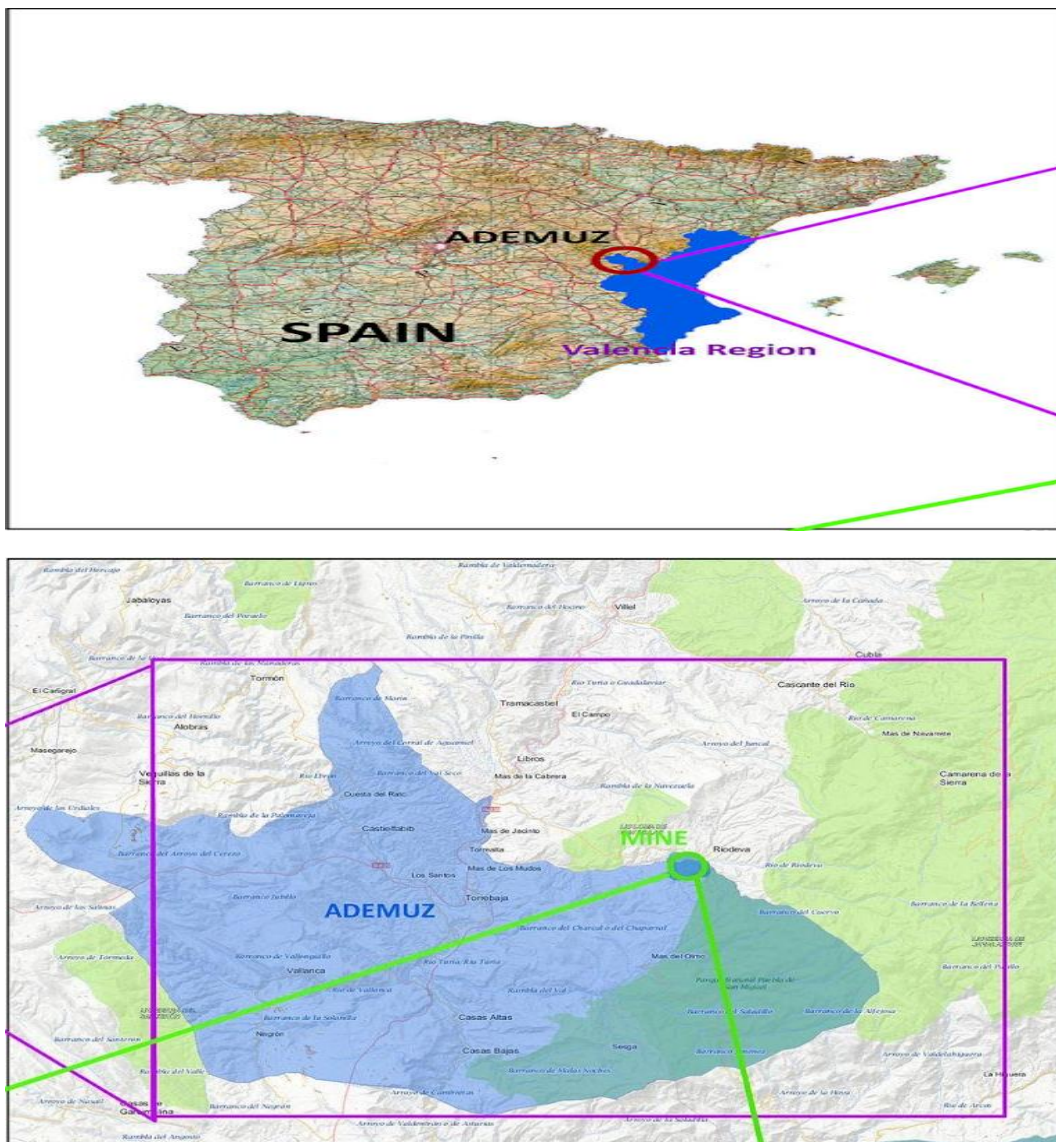


FIGURA 5. LOCALIZACIÓN DE LA MINA FORTUNA. FUENTE: [HTTP://WWW.AGROAMBIENT.GVA.ES/ES/WEB/LIFE-TECMI-NE/LOCALIZACIÓN](http://www.agroambient.gva.es/es/web/life-tecmine/localización).

Se trata de una zona con clima de transición entre las áreas continental y mediterránea de la Península Ibérica. Según la clasificación de Köppen (1918), esta zona corresponde al clima CFB (clima templado sin estación seca y con veranos templados).

Las temperaturas máximas en verano superan los 38°C (Julio y agosto) y en inviernos las mínimas están por debajo de los 0°C. Las precipitaciones son escasas y repartidas a lo largo del año, la media de precipitaciones es alrededor de los 450 mm/año siendo mayo y junio los más lluviosos y agosto y julio los más secos (Agencia Estatal de Meteorología para el año 2019).

La restauración llevada a cabo en esta zona forma parte del proyecto LIFE + TECMINE (Conselleria de Agricultura Desarrollo Rural Emergencia Climática y Transición Ecológica, 2015) y de allí provienen los datos de la humedad volumétrica (%) y los parámetros del suelo.

## 2.2 Determinación de la humedad volumétrica (%) y de los parámetros hidráulicos del suelo

Para determinar la humedad volumétrica (%) se utilizó la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR, Rajkai & Rydén, 1992) y en concreto un Campbell TDR 100. Las sondas en este caso estaban constituidas por dos varillas, de 23 cm de largo, clavadas en el suelo alcanzando una profundidad de 20 cm y con una separación entre las varillas de 5 cm (García, 2021). Se realizaron 8 visitas de campo a la mina entre julio del 2019 y octubre de 2020, y en cada visita se conectaba el TDR a las varillas, y este proporcionaba la humedad volumétrica en porcentaje.

El área de estudio se dividió en diferentes zonas según el tipo de restauración, la orientación y las geoformas. Según el tipo de restauración encontramos tres zonas; zonas tratadas con restauración geomorfológica, zonas tratadas con restauración convencional y una última zona no tratada ya que no fue afectada por la minería que denominaremos ecosistema de referencia (ER). Al mismo tiempo estas zonas se encuentran diferenciadas en unidades: tres dentro de la restauración geomorfológica: Geofluv esteril, Geofluv pequeño y Geofluv grande (G.esteril, GFP y GFG respectivamente), dos dentro de la restauración convencional: Talud convencional y Talud convencional con manta orgánica (TC yTM respectivamente) y una última unidad que es el ecosistema de referencia (ER).

A continuación, se van a dar más detalles sobre las distintas unidades:

- Zonas tratadas mediante el método Geofluv
  - **Geofluv Grande (GFG):** Esta unidad se encuentra dividida en dos zonas, una orientada hacia el Norte que denominaremos Geofluv Grande Umbría (GFGU) y otra orientada hacia el sur Geofluv Grande Solana (GFGS). En GFGU se colocaron 4 transectos perpendiculares a la pendiente formados por 5 puntos de muestreo cada uno, en cambio en el GFGS se colocaron 3 transectos perpendiculares a la pendiente formados por 5 puntos de muestreo cada uno. Los transectos se distribuyeron a lo largo de la pendiente para muestrear las partes alta, baja y media de cada pendiente. En el GFG encontramos 3 geoformas diferenciadas: Vaguada, Ladera y Divisoria. En ambas unidades, para la reconstrucción del suelo se usó el coluvión de piedra caliza extraído de laderas naturales próximas a la explotación, esta técnica no se había utilizado aun en esa zona para rehabilitar el suelo (Martín-Duque et al., 2019).
  - **Geofluv Pequeño (GFP):** Esta unidad se encuentra dividida en dos zonas, una orientada hacia el este que denominaremos Geofluv Pequeño Este (GFPE) y otra orientada hacia el oeste Geofluv Pequeño Oeste (GFPW). En GFPE se colocaron 3 transectos perpendiculares a la pendiente formados por 5 puntos de muestreo cada uno, en cambio en el GFPW se colocaron 5 transectos paralelos a la pendiente formados por 3 puntos de muestreo cada uno. Los transectos se distribuyeron a lo largo de la pendiente para muestrear las partes alta, baja y media de cada pendiente. En el GFP encontramos 3 geoformas diferenciadas: Concavidad, Ladera y Divisoria.  
  
En ambas unidades, para la reconstrucción del suelo se usó el coluvión de piedra caliza extraído de laderas naturales próximas a la explotación, esta técnica no se había utilizado aun en esa zona para rehabilitar el suelo (Martín-Duque et al., 2019).
  - **Geofluv estéril (G.Esteril):** Unidad orientada hacia el sur, sus puntos de muestreo se colocaron en 3 transectos perpendiculares a la pendiente formados por 5 puntos de muestreo cada uno. Al contrario que las otras dos unidades del Geofluv, el suelo de esta unidad no se construyó con coluvión.
- Zonas tratadas mediante restauración convencional
  - **Talud Convencional (TC) y Talud Convencional con Manta Orgánica (TM):** En las áreas tratadas con restauración convencional nos encontramos estas 2 unidades



diferenciadas, cada una de las áreas se colocaron 3 transectos perpendiculares a la pendiente formados por 5 puntos de muestreo cada uno. Para las dos unidades tratadas con restauración convencional uno se le aplicó una manta orgánica (TM) y al otro no (TC).

- Zonas no afectadas por la minería
  - **Ecosistema de Referencia (ER):** Se trata de la única zona objeto de estudio que no ha sido alterada por la actividad minera, en esta zona se colocaron 5 transectos perpendiculares a la pendiente formados por 5 puntos cada uno.

Los parámetros hidráulicos del suelo fueron proporcionados por el Dr. David Moret (Estación experimental Aula Dei - CSIC). Se obtuvieron a partir del análisis de muestras inalteradas de suelo tomadas en la zona de estudio. Dichos muestreos fueron tomados sobre el horizonte 0-10 cm de suelo con cilindros de acero inoxidable (5 cm de altura y diámetro), utilizando, para tal fin, el método de determinación de la densidad aparente del suelo (Grossman and Reinsch, 2002). Una vez en laboratorio, las muestras fueron secadas al aire durante varios meses, hasta peso constante, valor que se correspondió con la humedad residual del suelo,  $\vartheta_r$ . Los parámetros de van Genuchten de curva de retención  $\vartheta_s$ ,  $\alpha$  y  $n$ , se estimaron según procedimiento descrito por Moret-Fernández et al. (2020), a partir del análisis inverso de la curva de infiltración ascendente transitoria medida sobre la misma muestra de suelo.

### 2.3 Obtención del potencial hídrico (KPa) y las curvas de retención de humedad

Uno de los pilares fundamentales para desarrollar este trabajo ha consistido en obtener gráficas de las curvas de retención de humedad donde se relaciona la humedad volumétrica (%) con el potencial hídrico, además de potenciales hídricos para un % de humedad dado para cada tipo de suelo. Para ello han sido necesarios los datos de humedad (%) y los parámetros del suelo de los diferentes tratamientos, además de los scripts de R (R Core Team, 2021) proporcionados por el Dr. David Moret (Estación experimental Aula Dei - CSIC).

A partir de estos datos, e introduciendo los scripts que aparecen a continuación en el programa R (R Core Team, 2021), se obtienen las gráficas de las curvas de retención de

humedad a partir del script 1 (Figura 7) y los potenciales hídricos en cm de agua a partir del script 2 (Figura 6), estos potenciales fueron transformados a kPa a través de la equivalencia (1cm de agua = 0.098064 kPa).

En ambos scripts se desarrolló la ecuación del modelo de Van Genuchten que aparece anteriormente (Figura 3) y conociendo los inputs:  $\theta$ ,  $\vartheta_s$ ,  $\vartheta_r$ ,  $\alpha$ , n y m, el programa sustituye y nos proporciona los potenciales hídricos (h) en cm de agua.

```
#=====TRATAMIENTO ER

trat <- "ER"

sample <- c("ER1", "ER2", "ER3")

#_____ Valores de sat, res, alfa, n medidos en campo en cada sample de cada trat

sat <- c(0.407, 0.39, 0.43)           # humedad saturada (L^3/L^3)
res <- c(0.01, 0.02, 0.01)          # humedad residual (L^3/L^3)

a <- c(0.0298, 0.004, 0.041)        # alfa (1/L)
n <- c(1.811, 1.3, 1.73)
m <- 1-(1/n)

#_____ VALORES HUMEDAD DEL SUELO MEDIDOS EN CAMPO

th0 <- c(0.07, 0.20, 0.08)

#=====FIGURA CURVAS DE RETENCIÓN

h1 <- 10^(seq(from = log10(1e-1), to = log10(1e10), length.out = 500)) # cm

for (i in 1 : length (sat))
{
  #PUNTOS TENSIÓN

  Se0 <- (th0[i] - res[i])/(sat[i]-res[i])
  h0 <- (1/a[i]) * ((1/(Se0^(1/m[i])))-1)^(1/n[i])
}
```

### **#CURVA DE RETENCIÓN**

```
th1 <- res[i] + (sat[i] - res[i]) * (1/(1 + (a[i] * h1)^n[i]))^m[i]

plot(h1, th1, log = "x", col = i, type = "l", xlab = "h (cm)", ylab = "Humedad (%)",
xlim=c(min (h1),max (h1)), ylim=c(0,0.5), main = trat)
points (h0, th0[i], col = i, pch = 16)
par (new =TRUE)
legend("bottomleft", sample, pch = c("-", "-", "-"), col = c(1: length(sat)), cex = 1, horiz = FALSE,
bg = "white")
grid (col = "grey")
```

FIGURA 6. SCRIPT DE R MODIFICADO PARA OBTENER LOS POTENCIALES HÍDRICOS EN CM. FUENTE: ELABORACIÓN DAVID MORET.

```
#=====TRATAMIENTO ER

trat <- "ER"

Sat <- 0.43          # humedad saturada (L^3/L^3)
res <- 0.078        # humedad residual (L^3/L^3)

a <- 0.36           # alfa (1/L)
n <- 1.8
m <- 1-(1/n)

# h = tensi?n (L)
h <- c (10^(seq(-4,0,0.1)), seq(1, 100, 1), seq(110,500, 10), seq(600,5000, 50), seq(5000,
100000,5000), seq(50000, 1000000,50000))

#_____ CÁLCULO HUMEDAD "th"

th <- res + (sat-res)*(1 / (1 + abs(a*h)^n)^m)

plot(h, th, log = "x", col = "red", xlab = "h", ylab = "theta", xlim=c(0.1,1000000), ylim=c(0,0.45))

#_____ CÁLCULO "h"

#th <- 0.30
```

```

th <- c(0.30,0.25,0.28,0.18)

Se <- (th - res)/(sat-res)

h1 <- (1/a)*((1/(Se^(1/m)))-1)^(1/n)

h1

par (new = TRUE)
plot(h1, th, log="x", type="l", col="blue", xlab="h", ylab="theta", xlim=c(0.001,1000000),
ylim=c(0,0.45))

# _____ COMPROBACIÓN

round (mean (h - h1), digits = 9)

```

FIGURA 7. SCRIPT DE R MODIFICADO PARA OBTENER LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD.

## 2.4 Análisis estadístico

Tras recopilar los datos de la humedad (%) y los potenciales hídricos (kPa) se realizó un análisis estadístico, principalmente se analizaron las relaciones entre las dos variables mencionadas. Así como las diferencias de estas variables entre las diferentes unidades. Se realizaron dos análisis estadísticos; una prueba ANOVA y una prueba de correlación.

Para llevar a cabo una prueba ANOVA las variables tratadas tenían que ajustarse a una distribución normal y tener varianzas homogéneas. Para comprobarlo si los valores cumplían con estos requisitos se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk para averiguar si los datos se distribuían de forma normal y la prueba de Levene para evaluar la homogeneidad de las varianzas entre los diferentes grupos. Si las variables a analizar cumplían con los criterios de distribución normal y homogeneidad se aplicaba la prueba de ANOVA, de lo contrario, si no cumplían estos criterios se aplicaba la prueba de Kruskal-Wallis. En caso de que la diferencia entre las unidades fuera significativa se aplicaba la prueba de Dunn para ver qué grupos diferían entre sí y cuáles no.

Las pruebas de correlación se han hecho mediante la correlación de Pearson y Rho de Spearman, estos coeficientes se expresan con un número entre -1 y +1, indican correlaciones positivas (cuando una variable aumenta la otra también aumenta) cuando son mayores de 0 y correlaciones negativas (cuando una variable aumenta la otra disminuye) cuando son menores de 0, si el valor es 0 expresa no correlación entre las variables.

### 3 Resultados

#### 3.1 Curvas de retención de agua y la relación entre la humedad volumétrica (%) y el potencial hídrico

La primera parte del trabajo consistió en la obtención de las curvas de retención de humedad, a partir del script 2, en estas CRH el potencial hídrico (h) aparece en cm de agua. Cuanto mayor son los cm de agua menor es el potencial hídrico en kPa.

- En la gráfica (Figura 8) que aparece a continuación se analizan las CRH de los transectos GFG, se observa que para el mismo contenido de humedad volumétrica (%) el transecto (GFGU1) tiene mayor potencial hídrico que el resto, siendo el transecto 3 (GFGU3) el que menos potencial hídrico tiene. Mientras que el transecto 2 (GFGU 2) y GFGS muestran unos potenciales hídricos parecidos.

Para comprobar el grado de correlación se aplicó el coeficiente de correlación de los rangos de Spearman independientemente para GFGU y GFGS. Para GFGU ( $S = 2$ , p-valor  $< 0.05$ , rho: 0.976) se obtuvo una correlación positiva moderada fuerte mientras que para el GFGS ( $S = 0$ , p-valor  $< 0.05$ , rho=1) la correlación fue positiva perfecta.

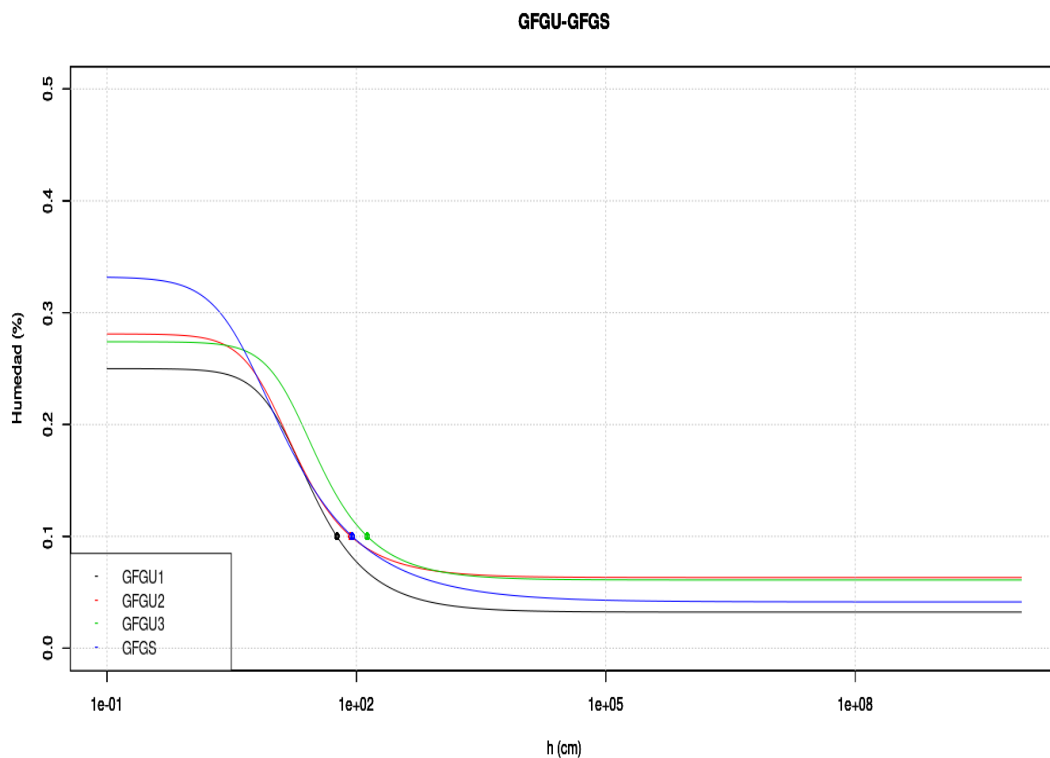


FIGURA 8. LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DE LOS TRANSECTOS DEL GFGU Y EL TRANSECTO DEL GFGS.

- Las CRH que aparecen a continuación (Figura 9) son de los transectos del GFP, se puede observar que para una misma humedad volumétrica (%), los transectos 2 (GFPE2) y 3 (GFPE3) son los que mayor potencial hídrico tienen, seguido de los 2 transectos del GFPW y finalmente aparece el transecto 3 del GFPE (GFPE3).

Para comprobar el grado de correlación entre la humedad volumétrica (%) y el potencial hídrico se aplicó el coeficiente de correlación de los rangos de Spearman independientemente para GFPW y GFPE. Para el GFPW ( $S = 2$ ,  $p$ -valor  $< 0.05$ ,  $\rho = 0.943$ ) se obtuvo una correlación positiva moderada fuerte y para el GFPE ( $S = 0$ ,  $p$ -valor  $< 0.05$ ,  $\rho = 1$ ).

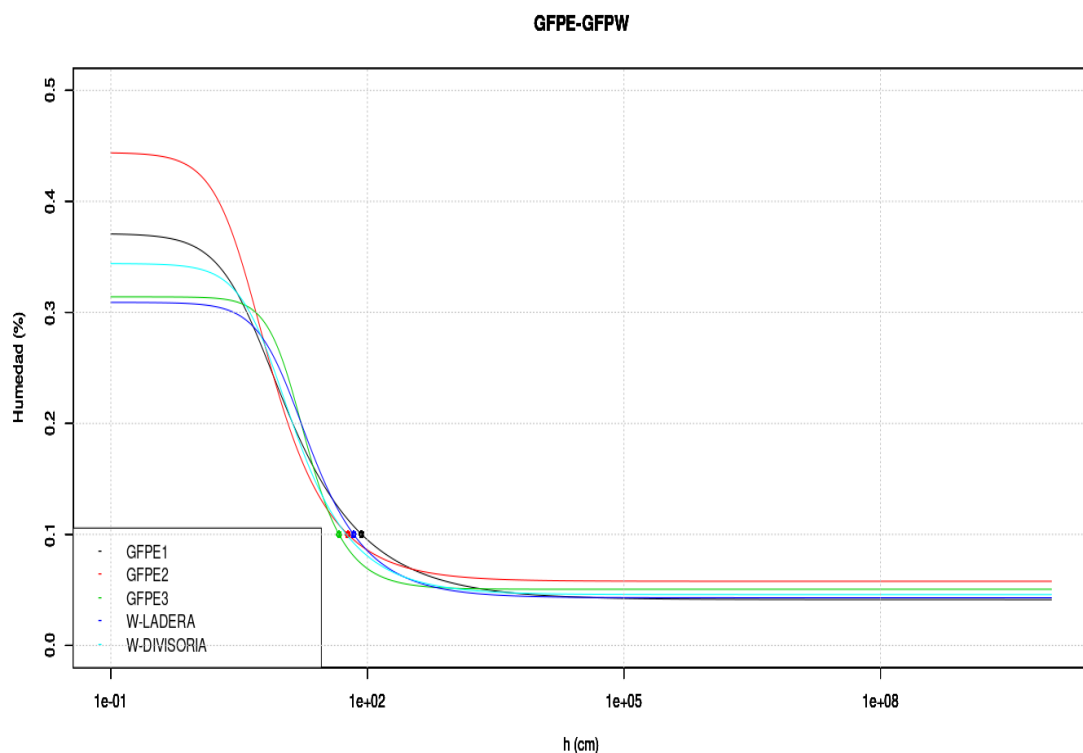


FIGURA 9. LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DE LOS TRANSECTOS DEL GFPE Y LOS TRANSECTOS DEL GFPW.

- En la gráfica (Figura 10) que aparece a continuación, se analizan las CRH de los transectos del TM, se puede observar que para una misma humedad volumétrica (%) el potencial hídrico varía entre las tres notablemente, siendo el transecto 1 (TM1) mayor que el transecto 2 (TM2) y este mayor que el transecto 3 (TM3).

En este caso debido a que los valores siguen una distribución normal para comprobar el grado de correlación entre la humedad volumétrica (%) y el potencial hídrico se ha

aplicado el coeficiente de correlación de Pearson ( $t = 1.999$ ,  $df = 4$ ,  $p\text{-valor} > 0.05$ ,  $cor = 0.707$ ) y se obtuvo una correlación directa.

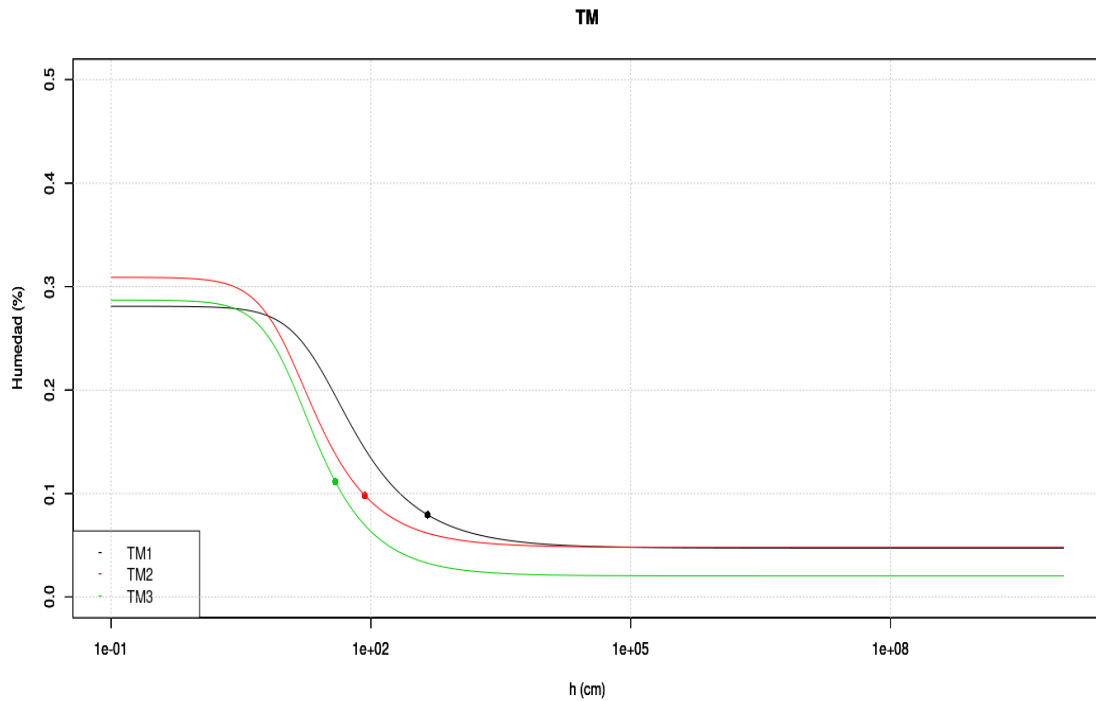


FIGURA 10. LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DE LOS TRANSECTOS DEL TM.

- Las CRH de los transectos del TC son representadas en la siguiente grafica (Figura 11), se puede observar que para una misma humedad (%), el potencial hídrico es mayor en el transecto 1 (TC1) que los demás transectos, siendo estos el transecto 2(TC2) y el transecto TC3 parecidos entre sí.

Para comprobar el grado de correlación entre la humedad volumétrica (%) y el potencial hídrico se aplicó el coeficiente de correlación de los rangos de Spearman ( $S = 2$ ,  $p\text{-valor} < 0.05$ ,  $\rho = 0.943$ ) y se obtuvo una correlación positiva moderada fuerte.



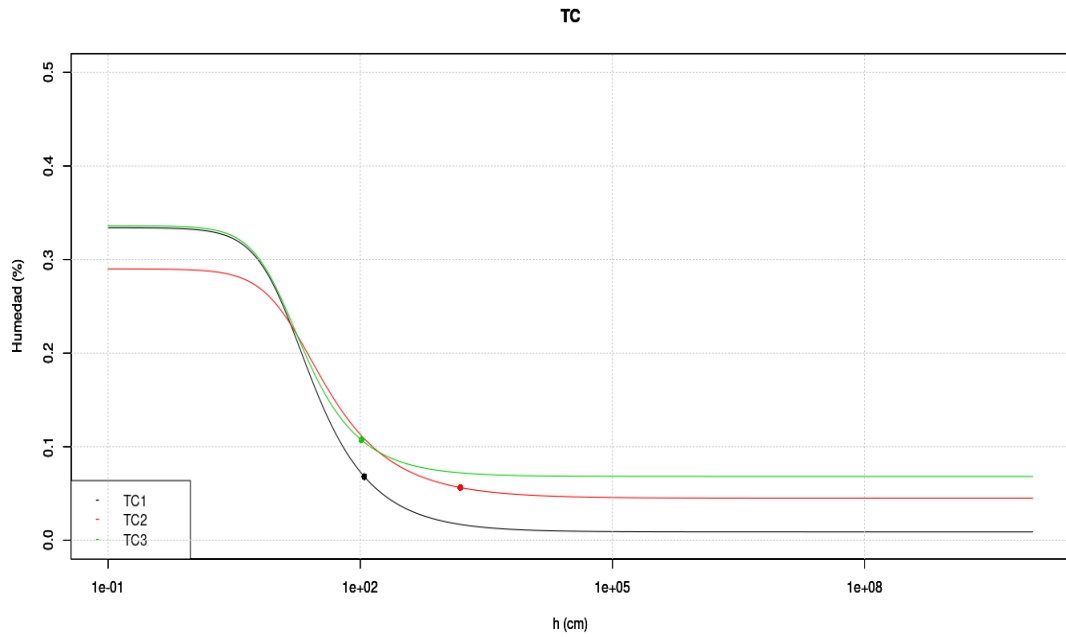


FIGURA 11. LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DE LOS TRANSECTOS DEL TC.

- Finalmente, la gráfica (Figura 12) analiza las CRH de la zona no afectada por la minería (ER), se puede observar que para una misma humedad (%) el potencial hídrico varía notablemente entre el transecto 1 (ER1) y el resto, siendo el transecto 2 (ER2) el que menor potencial hídrico tiene.

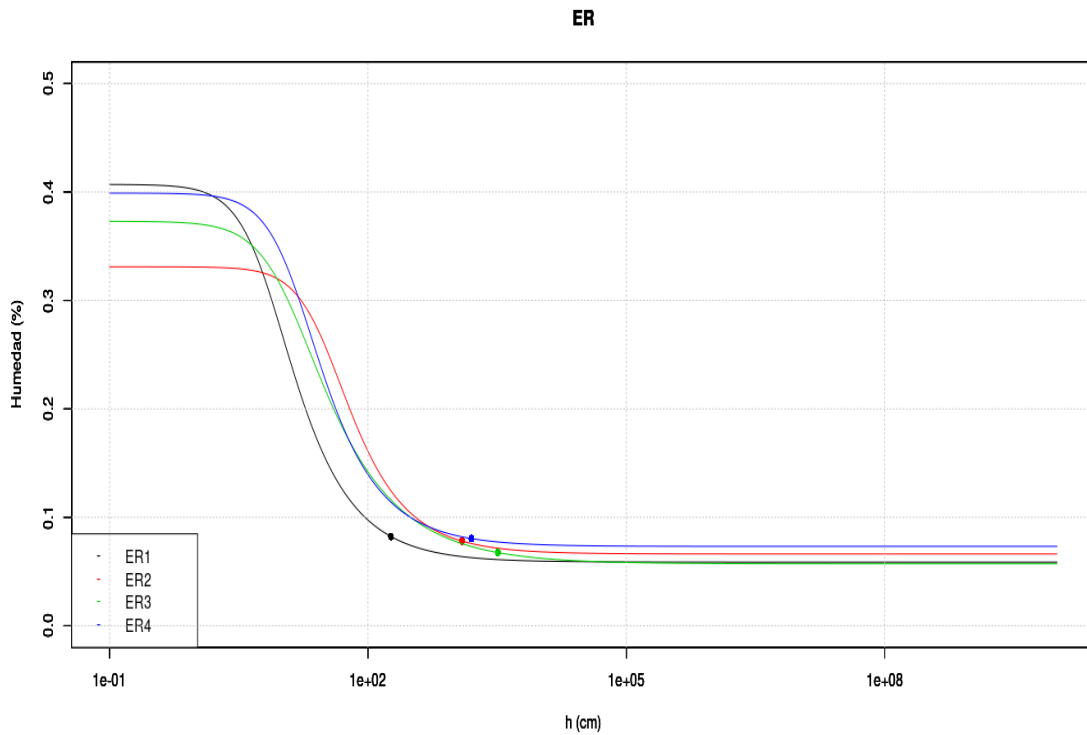


FIGURA 12. LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DE LOS TRANSECTOS DEL ER.

### 3.2 La evolución de la humedad volumétrica (%) y el potencial hídrico (kPa) de los diferentes tratamientos

Todas las unidades siguen una tendencia parecida con una humedad más baja entre los meses de agosto y diciembre 2019, esta tendencia cambia a partir del mes de diciembre donde comienza a aumentar hasta alcanzar un máximo en el mes de febrero superando el 40% de humedad volumétrica todos los tratamientos.

La unidad de ER en el año 2019 tiene un mayor % de humedad volumétrica del suelo en comparación con las zonas tratadas, esta tendencia cambia entre junio y octubre del 2020, donde el suelo de las zonas tratadas mediante método Geoflúv tiene mayor humedad que el resto de las unidades. En cambio, las áreas restauradas mediante el método convencional (TC, TM) muestran menores contenidos de humedad en el suelo durante todo el período de estudio.

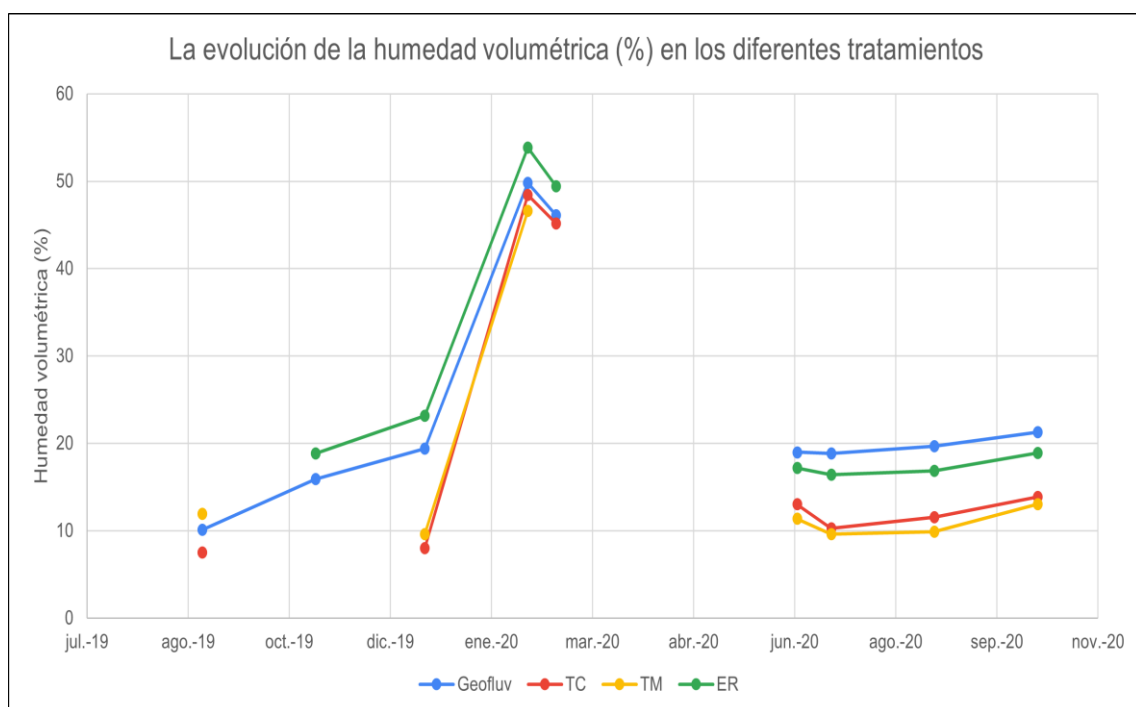


FIGURA 13. LA EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS. LOS DATOS CON LA QUE SE HIZO ESTA TABLA ESTÁ EN EL ANEXO 3 (TABLA I).

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis ( $\chi^2 = 91.061$ ,  $df = 3$ ,  $p\text{-valor} < 0.05$ ) mostraron diferencias significativas entre al menos dos tratamientos y para saber qué grupos se diferenciaban significativamente entre sí se ha aplicado la prueba *z por pares* de Dunn. Esta prueba indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos TC-ER, pero si entre el resto de los tratamientos.

Col Mean - Row Mean	ER	Geofluv	TC
Geofluv	-5.365 0.000*		
TC	-0.377 0.353	4.987 0.000*	
TM	4.987 0.000*	10.352 0.000*	5.365 0.000*

**TABLA 2. RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LAS HUMEDADES VOLUMÉTRICAS DE LOS TRATAMIENTOS GEOFLUV, TM, TC Y ER.**

En lo que el potencial hídrico se refiere, entre los meses de agosto y diciembre 2019 siguen una tendencia parecida a la vista en la gráfica 6 donde las unidades Geofluv y ER tienen un potencial hídrico mayor que las unidades TM y TC. En las dos medidas de febrero los suelos de todas las unidades se encuentran saturados con un potencial hídrico de 0 KPa.

Del mes de junio al mes de octubre del 2020, el potencial hídrico de las unidades Geofluv y TC ha aumentado en comparación a los datos del 2019, en cambio para las unidades de TM y ER disminuye.

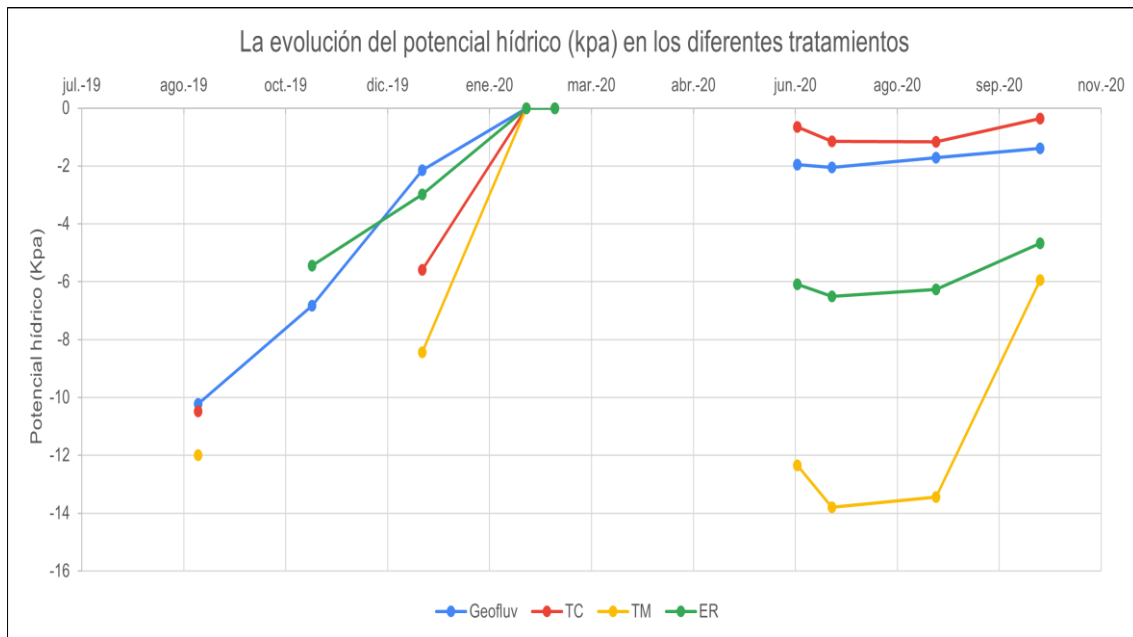


FIGURA 14. LA EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO (kPA) EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS. LOS DATOS CON LA QUE SE HIZO ESTA TABLA ESTÁ EN EL ANEXO 3 (TABLA II).

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis (chi-squared = 91.061, df = 3, p-valor<0.05) mostraron diferencias significativas entre al menos dos tratamientos y para saber qué grupos se diferenciaban significativamente entre sí se ha aplicado la prueba *z por pares* de Dunn, la cual muestra que no hay diferencias significativas entre los tratamientos TC-ER, pero si entre el resto de los tratamientos.

Col Mean - Row Mean	ER	Geofluv	TC
Geofluv	-5.233 0.000*		
TC	-0.115 0.353	5.119 0.000*	
TM	-5.119 0.000*	10.352 0.000*	5.233 0.000*

TABLA 3. RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LOS POTENCIALES HÍDRICOS DE LOS TRATAMIENTOS GEOFLUV, TM, TC Y ER

### 3.3 La Comparación entre las unidades tratadas con restauración geomorfológica

En la gráfica siguiente se representan las 4 unidades restauradas mediante el método Geofluv. En el GFG, la unidad GFGS es la que menor contenido de humedad tiene en comparación con el GFGU, mientras que las dos unidades del GFP tienen un contenido de

humedad parecido, aunque entre el mes de julio 2020 y octubre 2020, la unidad orientada hacia el Este contiene mayor contenido de humedad.

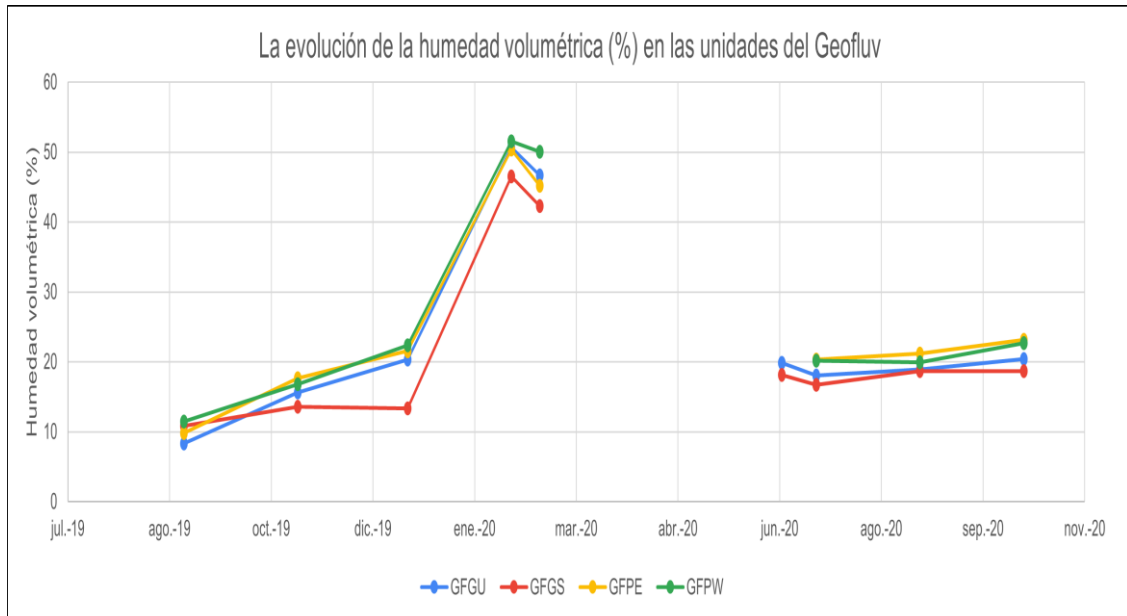


FIGURA 15. LA EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) EN LAS UNIDADES DEL GEOFLUV. LOS DATOS CON LA QUE SE HIZO ESTA TABLA ESTÁ EN EL ANEXO 3 (TABLA III).

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis ( $\chi^2 = 101.32$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0.05$ ) mostraron diferencias significativas entre al menos dos tratamientos y para saber qué grupos se diferenciaban significativamente entre sí se ha aplicado la prueba *z por pares* de Dunn se obtiene que no hay diferencias significativas entre GFGU-GFGS y entre GFPW-GFPE.

Col Mean - Row Mean	GFGS	GFGU	GFPE
<b>GFGU</b>	-0.892 0.186*		
<b>GFPE</b>	6.755 0.000*	7.648 0.000*	
<b>GFPW</b>	6.583 0.000*	7.648 0.000*	-0.172 0.432

TABLA 4. RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA DE LAS UNIDADES DEL GEOFLUV.

Las unidades que se restauraron mediante el método Geoflúv su potencial hídrico aumenta hasta llegar a 0 kPa en el mes de febrero, a excepción del GFGU donde el potencial hídrico disminuye en el mes de agosto del 2019.

Los datos del año 2020 muestran un mayor potencial hídrico en los GFG con respecto a GFP, tras realizar la prueba de Kruskal-Wallis ( $\chi^2 = 101.32$ ,  $df = 3$ ,  $p < 0.05$ )

mostraron diferencias significativas entre al menos dos tratamientos y para saber qué grupos se diferenciaban significativamente entre sí se ha aplicado la prueba z por pares de Dun (Tabla 5) se obtiene que no hay diferencias significativas entre GFGU-GFGS y entre GFPW-GFPE.

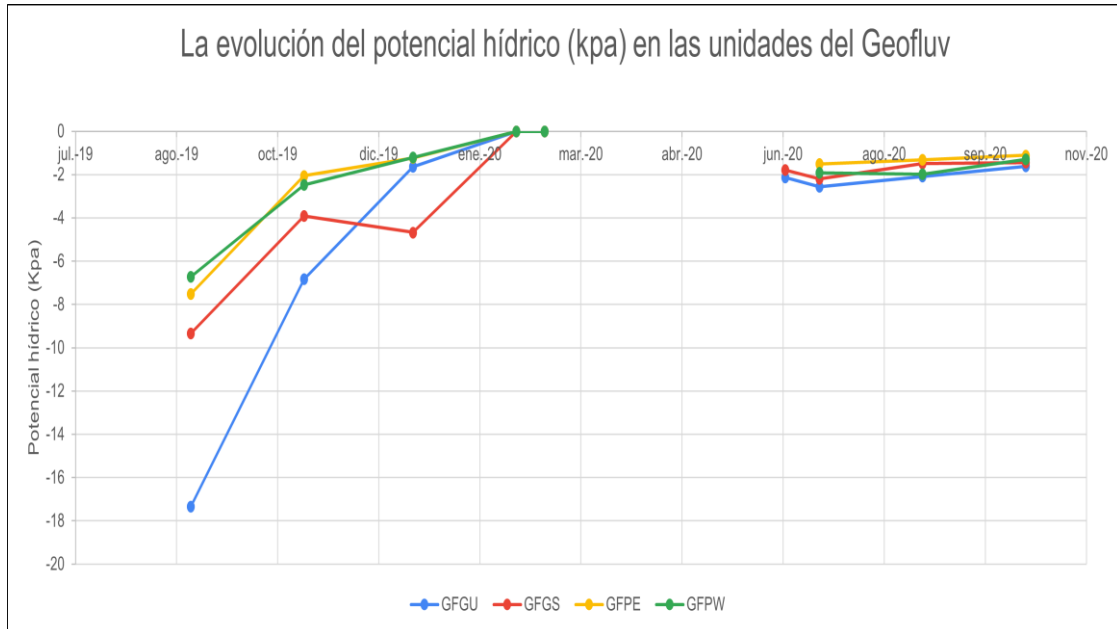


FIGURA 16. LA EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO (kPA) EN LAS UNIDADES DEL GEOFLUV. LOS DATOS CON LA QUE SE HIZO ESTA TABLA ESTÁ EN EL ANEXO 3 (TABLA IV).

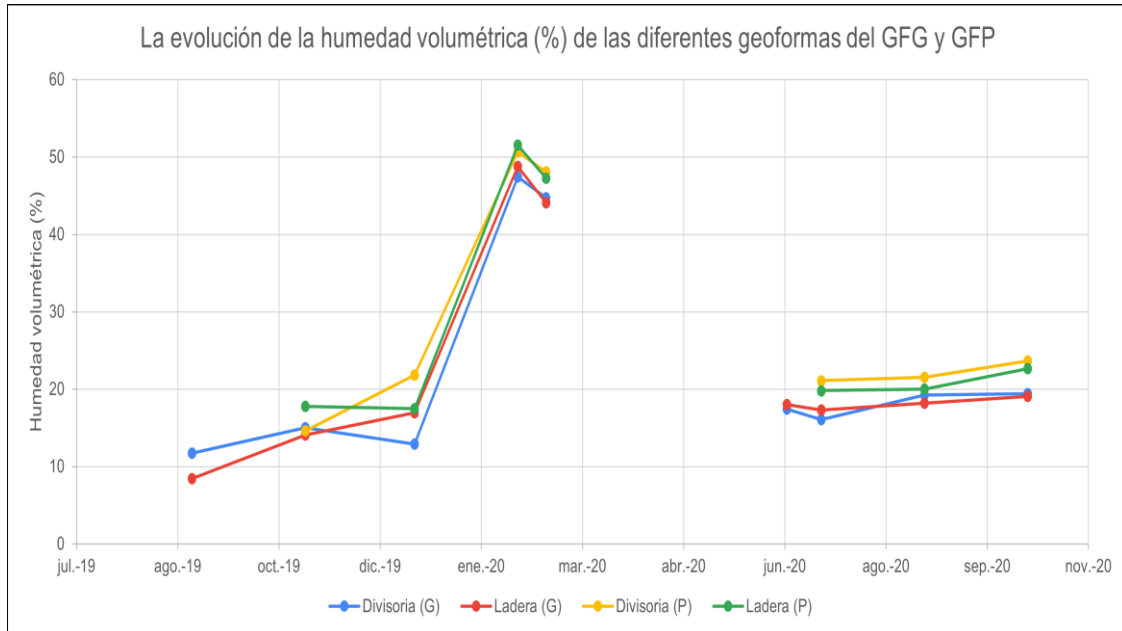
Col Mean - Row Mean	GFGS	GFGU	GFPE
GFGU	-0.677 0.249		
GFPE	6.417 0.000*	7.094 0.000*	
GFPW	7.137 0.000*	7.813 0.000*	0.720 0.236

TABLA 5. RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LOS POTENCIALES HÍDRICOS DE LOS TRATAMIENTOS.

### 3.4 La diferencia de humedad volumétrica (%) y potencial hídrico (kPa) de las geoformas del GFP y GFG

Para ver si las geoformas influyen en el contenido de humedad, con los datos de las laderas y divisorias del GFG y GFP se ha hecho la comparativa que aparece representada en la figura 17, no se ha tenido en cuenta la vaguada por la falta de datos de los parámetros del suelo. Aparece un mayor contenido de humedad en la Ladera y divisoria de la unidad GFP en comparación con la ladera y divisoria del GFG.

Tras realizar la prueba de Kruskal-Wallis ( $\chi^2 = 95.506$ ,  $df = 3$ ,  $p\text{-valor} < 0.05$ ) mostraron diferencias significativas entre al menos dos tratamientos y para saber qué grupos se diferenciaban significativamente entre sí se ha aplicado la prueba *z por pares* de Dunn se obtuvo que no hay diferencias significativas entre las geoformas del GFP entre sí y las geoformas del GFG entre sí.



**FIGURA 17. LA EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) DE LAS DIFERENTES GEOFORMAS DEL GFG Y EL GFP. LOS DATOS CON LA QUE SE HIZO ESTA TABLA ESTÁ EN EL ANEXO 3 (TABLA V).**

Aparece un mayor potencial hídrico en la Ladera y divisoria de la unidad GFP en comparación con la ladera y divisoria del GFG (figura 18).

Tras realizar la prueba de Kruskal-Wallis ( $\chi^2 = 95.492$ ,  $df = 3$ ,  $p\text{-valor} < 0.05$ ) mostraron diferencias significativas entre al menos dos tratamientos y tras realizar la prueba *z por pares* de Dunn se obtuvo que no hay diferencias significativas entre las geoformas del GFP entre sí y las geoformas del GFG entre sí.

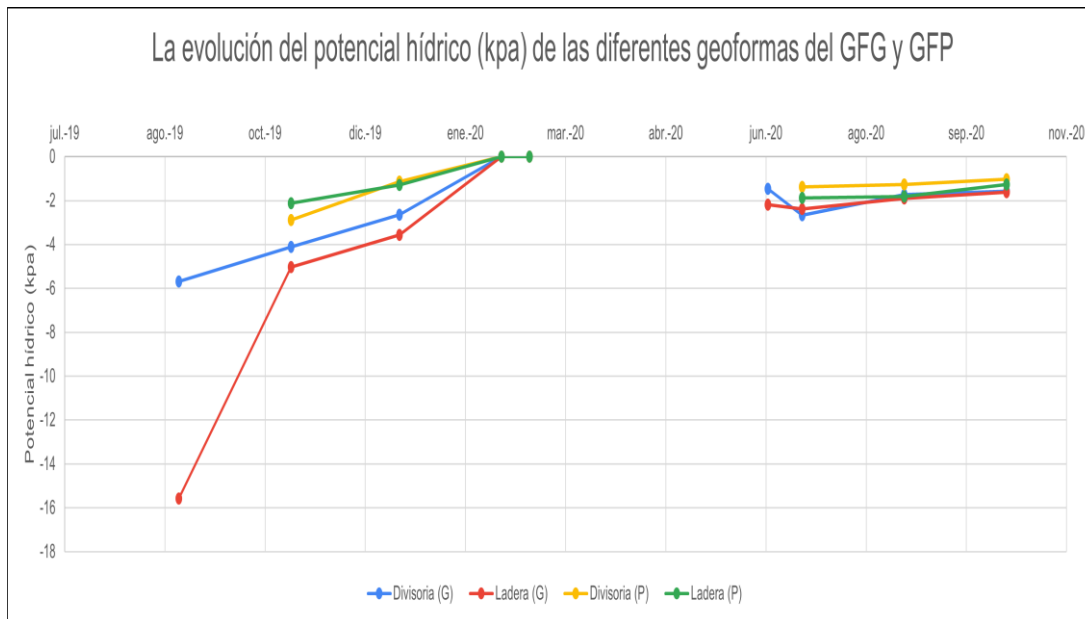


FIGURA 18. LA EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO (%) DE LAS DIFERENTES GEOFORMAS DEL GFG Y EL GFP. LOS DATOS CON LA QUE SE HIZO ESTA TABLA ESTÁ EN EL ANEXO 3 (TABLA VI).

### 3.5 La diferencia de humedad volumétrica (%) y potencial hídrico (kPa) de las geoformas del GFP y GFG

Para la unidad G.esteril solo tenemos datos de 3 fechas de julio 2020 a octubre 2020, por ello para este apartado solo hemos escogido los datos de las mismas fechas que la del G.esteril, se analizara la diferencia de humedad volumétrica (%) y el potencial hídrico de aquellas unidades donde se usó el coluvión como sustrato para iniciar el suelo (GFGU, GFGS, GFPE, GFPW) y las que se utilizó otros material (TM, TC, G.esteril).

En la gráfica siguiente (Figura 19) se ve un mayor porcentaje de humedad en aquellas unidades donde se usó el coluvión como sustrato en comparación con las demás unidades, además tras realizar la prueba de Kruskal-Wallis ( $\chi^2 = 30.767$ ,  $df = 1$ ,  $p\text{-valor} < 0.05$ ) mostraron diferencias significativas entre ambos.



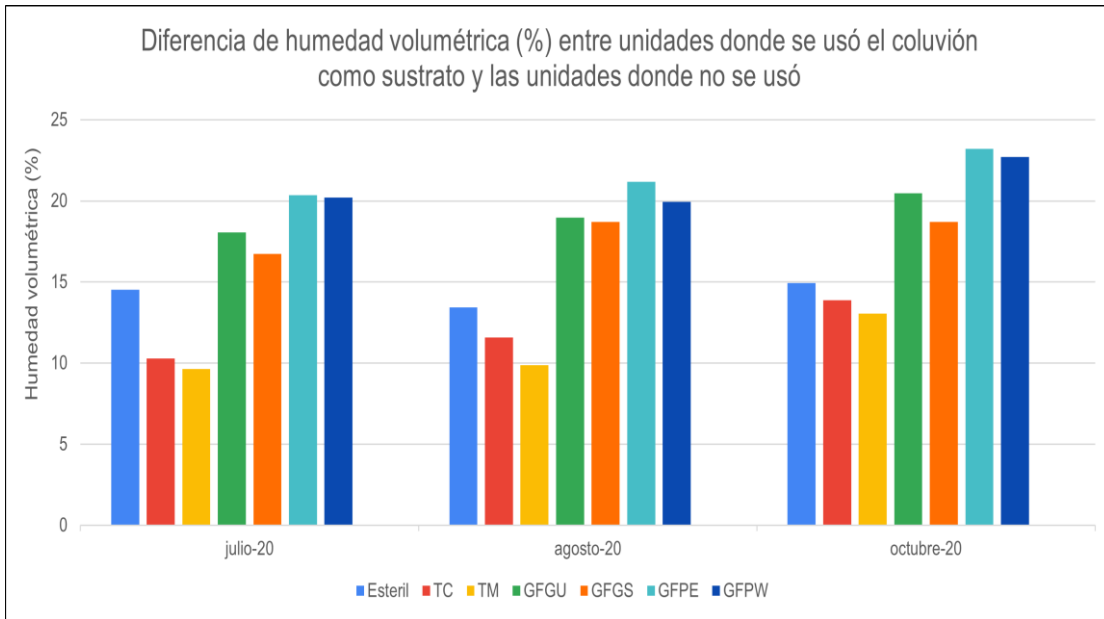


FIGURA 19. DIFERENCIA DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) ENTRE UNIDADES DONDE SE USÓ EL COLUVIÓN COMO SUSTRATO Y LAS UNIDADES DONDE NO SE USÓ. LOS DATOS CON LA QUE SE HIZO ESTA TABLA ESTÁ EN EL ANEXO 3 (TABLA VII).

Al igual que en la humedad volumétrica (%) el potencial hídrico en aquellas unidades donde se usó el coluvión como sustrato adecuado para iniciar el suelo muestran unos potenciales hídricos mayores, tras realizar la prueba de Kruskal-Wallis ( $\chi^2 = 30.767$ ,  $df = 1$ ,  $p$ -valor  $< 0.05$ ) mostraron diferencias significativas.

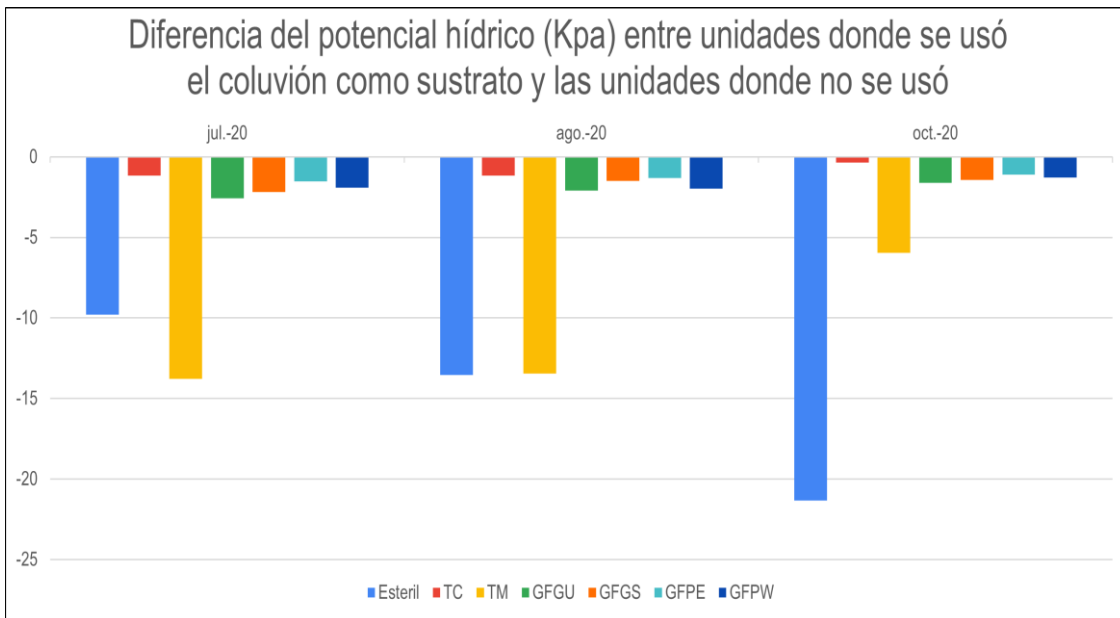


FIGURA 20. DIFERENCIA DEL POTENCIAL HÍDRICO (kPa) ENTRE UNIDADES DONDE SE USÓ EL COLUVIÓN COMO SUSTRATO Y LAS UNIDADES DONDE NO SE USÓ. LOS DATOS CON LA QUE SE HIZO ESTA TABLA ESTÁ EN EL ANEXO 3 (TABLA VIII).

## 4 Discusión y conclusión

Una de las principales partes de este trabajo son las CRH, ya que nos permitirán de manera visual ver la relación humedad volumétrica-Tensión (cm de agua) de los diferentes tratamientos y así poder compararlos.

Las CRH que aparecen en las gráficas de la 1 a la 5 se observa una relación entre la humedad volumétrica (%) y la tensión. Tal y como se esperaba, a medida que va disminuyendo la humedad también disminuye la tensión. Para una misma humedad volumétrica (%) los transectos restaurados mediante el método *Geofluv* tienen una mayor tensión en comparación con los restaurados mediante el método convencional y el ecosistema de referencia, siendo los transectos del TM los que cuentan con menor tensión para una misma humedad volumétrica.

Tras calcular los coeficientes de correlación de Spearman y Pearson pertinentes para observar si existe relación entre la humedad volumétrica y el potencial hídrico, se mostró una correlación directa entre estas dos variables en todas las unidades tratadas por lo que para suelos como estos, utilizar potencial hídrico o humedad volumétrica para medir la disponibilidad de agua en el suelo es indiferente.

La humedad volumétrica sigue una evolución parecida en los diferentes tratamientos donde en los meses de verano el suelo está más seco y a partir de octubre la humedad va aumentando considerablemente hasta superar el 50% de humedad en el suelo. Pero existe una diferencia significativa entre las unidades restauradas mediante el método *Geofluv* y las unidades restauradas mediante el método convencional, teniendo estas primeras mayor humedad volumétrica que el resto.

En lo que respecta al potencial hídrico, en las primeras medidas de agosto-octubre del 2019 todos los tratamientos muestran un potencial hídrico bajo, pero a partir de diciembre va aumentando hasta llegar 0 kPa en febrero, cuando el suelo se encuentra saturado, esto ocurre en todos los tratamientos excepto en TM para el que carecemos de datos para esas fechas. Una vez llega el verano los potenciales hídricos disminuyen como es esperado, pero no de la misma manera, tanto el *Geofluv* como el TC en el 2020 tienen unos potenciales

superiores a los que tenían en las mismas fechas del año 2019, todo lo contrario, pasa en el TM donde sus valores disminuyen notablemente entre los dos años y finalmente el ER mantiene unos valores parecidos.

En general la relación Humedad volumétrica-Tensión parece seguir una misma dinámica excepto en el caso del ER y TC ya que siendo que el primero tiene una mayor humedad volumétrica frente al TC, el segundo tiene mayor potencial hídrico. Y eso se debe a que si comparamos las CRH de ambos vemos que las CRH de los diferentes transectos del TC en general para una misma humedad volumétrica su potencial hídrico es mayor que las CRH de los transectos del ER.

A su vez dentro de las zonas restauradas mediante *Geofluv* encontramos 4 unidades con diferencias significativas entre el GFG y el GFP, con el GFP con mayor contenido volumétrico siendo aquellos trayectos orientados hacia el este (GFPE) los que mayor contenido de humedad volumétrica tienen en comparación con los orientados hacia el oeste (GFPW), pero la diferencia entre ambos no es significativa. Entre los transectos del GFG se encuentran los ubicados hacia el norte (GFGU) y hacia el sur (GFGS), siendo el GFGU el que mayor contenido de humedad volumétrica tiene, pero la diferencia entre ambos valores no es significativa.

A lo que el potencial hídrico se refiere, sigue una dinámica parecida a la humedad volumétrica con mayor potencial hídrico en GFP, y los transectos orientados hacia el este, en cambio en el GFG en el año 2020 se ve una ligera diferencia, donde el GFGS teniendo menor humedad volumétrica tiene un mayor potencial hídrico en comparación con GFGU, aunque esta diferencia de potenciales hídricos no es significativa.

También se han calculado independientemente los potenciales hídricos y las humedades volumétricas correspondientes a las geoformas ladera y divisoria del GFP y GFG. Las geoformas con mayor humedad son las del GFP y dentro de esta, aunque en el año 2019 no se aprecia diferencias, en el 2020 se ve una diferencia donde la ladera tiene mayor contenido de humedad que la divisoria, aunque esta diferencia no considera significativa, al igual que en el GFP las laderas del GFG en el 2020 tienen mayor contenido de humedad, pero esta diferencia tampoco se considera significativa.

Los potenciales hídricos siguen una tendencia igual siendo las geoformas del GFP las que mayor potencial hídrico tienen, y aunque en la gráfica aparece una ligera diferencia entre la ladera y la divisoria, esta diferencia no se considera significativa.

Finalmente se han analizado aquellas unidades donde se usó el coluvión como sustrato para iniciar el suelo y las que no, esto no se aprecia como objetivo principal de este trabajo fin de estudios, ya que se pensó que no había suficientes datos para la unidad *G.Esteril* para sacar conclusiones.

En este caso se ve una diferencia significativa de humedad entre las unidades donde se usó el coluvión y las que no, teniendo mayor contenido de humedad volumétrica aquellas unidades cuyo suelo fue construido con coluvión como sustrato, al igual que la humedad volumétrica el potencial hídrico de las unidades tratadas con coluvión muestran mayores potenciales hídricos.

Usar el coluvión de piedra caliza parece ser una solución rentable económicamente y ecológica para unas futuras rehabilitaciones mineras de arcilla y arena (Martín-Duque et al., 2019).

A partir de los resultados obtenidos podemos concluir lo siguiente:

- Relación directa entre la humedad volumétrica (%) y el potencial hídrico, el aumento de la primera variable supone el aumento de la segunda y a la inversa.
- Las unidades tratadas mediante el método Geofluv tienen un potencial hídrico mayor que las unidades tratadas mediante método convencional.
- La orientación y las geoformas no influyen en la presencia de mayor humedad volumétrica (%) ni en potencial hídrico.
- Diferencias significativas entre las unidades donde se usó coluvión, estas unidades tienen una humedad volumétrica (%) y un potencial hídrico mayor al resto de unidades.

## 5 Bibliografía

- Berbegall Beltrán, F.J., 2017. Determinación y evaluación de las propiedades hidráulicas del suelo y su aplicación al estudio del balance de agua en cultivos de regadío. Trabajo final de máster. Universidad Politécnica de Valencia.
- Bugosh, N., 2000. Fluvial geomorphic principles applied to mined land reclamation. En: OSM Alternatives to Gradient Terraces Workshop, January 2000. Office of Surface Mining, Farmington, NM, Estados Unidos.
- Casanova, M., 2018. Modelación elastoplástica de la curva de retención de agua en suelos parcialmente saturados. Tesis maestría. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. 55 p.
- Espigares, T., Moreno de las Heras, M., Nicolau, J.M., 2011. Performance of vegetation in reclaimed slopes affected by soil erosion. *Restoration Ecology* 17(1):35-44. doi: 10.1111/j.1526-100X.2009.00546.x
- García, R.E., 2021, Eco hydrology of reclaimed-quarry landscapes under mediterranean climate in Spain. Trabajo Final de Master. Czech University of life sciences of prague.
- Gómez Sal, A. y Nicolau, J.M., 1999. Hacia una caracterización ecológica de los paisajes degradados. Bases para su restauración. En: González Alonso, S. (ed.) Libro homenaje a D. Angel Ramos: 629-639. E.T.S.I Montes. Madrid.
- Grossman, R.B., Reinsch, T.G., 2002. Bulk density and linear extensibility. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5.* Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Martin Duque, J. F., Tejedor, M., Martin-Moreno, C., Nicolau, J. M., Zapico, I., 2019. Geomorphic rehabilitation in Europe: recognition as best available technology and its role in LIFE projects. In *Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure* (pp. 133-146). Australian Centre for Geomechanics.

- Martín Duque, J.F., Bugosh, N., 2014. Examples of geomorphic reclamation on mined lands in Spain. From pioneering cases to the use of the GeoFluv TM method. Paper presented at the 2014 National Technical Forum. Advances in Geomorphic Reclamation at Coal Mines, New Mexico, May 20-22. Office of Surface Mining, Reclamation and Reinforcement, Department of Interior, United States, 14 pp
- Martínez-Fernández, J., 1995. Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. *Avances en la investigación en la zona no saturada. Serv. Central Publ. del Gob. Vasco. Vitoria-Gasteiz*, 193-202
- Moreno de las Heras, M., Nicolau, J.M., Espigares, T., 2008. Vegetation succession in reclaimed coal-mining slopes in a Mediterranean-dry environment. *Ecological Engineering* 34, 168–178
- Moret-Fernández, D., Latorre, B., López, M.V., Pueyo, Y., Tormo, J., Nicolau, J.M., 2020. Hydraulic properties characterization of undisturbed cores under different soil managements. *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104816>.
- Nicolau, J.M., 2003a. Diseño y construcción del relieve en la restauración de ecosistemas degradados: una perspectiva ecológica. En: Rey, J.M., Espigares, T., Nicolau, J.M. (eds), *Restauración de ecosistemas mediterráneos*. pp 173-188. Colección Aula Abierta, España.
- Nicolau, J.M., 2003b. Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation. *Land Degradation & Development* 14:215-226. doi:10.1002/ldr.548.
- Nielsen, D. R., y Wendroth, O., 2003. *Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation*. Catena Verlag.
- Pérez, N. G., 2008. Determinación de las curvas características en suelos no saturados con celdas de presión. In *Natl. Acad. Sci* (Nº. 313, p. 54).

- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., Roquero de Laburu, C., 2003. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente* (Nº. 631.4 333.73 551.305). Mundi-Prensa.
- R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Toy, T.J. y Hadley, R.F.,1987. *Geomorphology of Disturbed Lands*. Academic Press Inc. 255 pp.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of 425 unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892–898.
- Zapico, I., Martín-Duque, J. F., Bugosh, N., Laronne, J. B., Ortega, A., Molina, A.,... SánchezCastillo, L. 2018. Geomorphic reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: The alto Tajo natural park, Spain. *Ecological Engineering* 111:100-116. doi:10.1016/j.ecoleng.2017.11.011

## 6 Listado de anejos

Anejo 1. parámetros del suelo de los diferentes transectos. fuente: Dr. David Moret (estación experimental aula dei-csic). .....	41
Anejo 2. Resultado de la transformación de la humedad volumétrica (%) en cm de agua y kpa de potencial hídrico de todas las unidades.....	42
Anejo 3. Resultados con los cuales se han obtenido las gráficas del apartado de resultados. ..	56
Anejo 4. Graficas de los resultados de la prueba z por pares de dunn.....	61



**ANEJO 1. PARÁMETROS DEL SUELO DE LOS  
DIFERENTES TRANSECTOS. FUENTE: DR. DAVID  
MORET (ESTACIÓN EXPERIMENTAL AULA DEI-CSIC).**

Transecto	alfa cm	N	Sat	res
TM_1	0,0808	1,681	0,281	0,0472
TM_2	0,1890	1,786	0,309	0,048
TM_3	0,1773	1,833	0,287	0,0204
GFGu_1	0,1444	1,791	0,250	0,0323
GFGu_2	0,2228	1,784	0,281	0,0632
GFGu_3	0,1158	1,820	0,274	0,061
ER_1	0,2981	1,811	0,407	0,0587
ER_2	0,0635	1,845	0,331	0,0662
ER_3	0,1702	1,608	0,373	0,0571
ER_4	0,1416	1,807	0,399	0,0732
TC_1	0,1640	1,766	0,334	0,009
TC_2	0,1354	1,660	0,290	0,045
TC_3	0,1835	1,854	0,336	0,0682
G.est_1	0,1692	1,844	0,362	0,082
G.est_2	0,2683	1,263	0,278	0,081
G.est_3	0,1532	1,834	0,274	0,042
G.PE_1	0,5004	1,562	0,371	0,0413
G.PE_2	0,5756	1,780	0,444	0,0578
G.PE_3	0,1501	2,312	0,314	0,0506
GFPW_1	0,1827	1,828	0,309	0,043
GFPW_2	0,2977	1,794	0,344	0,0458
GFGS	0,4822	1,521	0,332	0,0414

**ANEJO 2. RESULTADO DE LA  
TRANSFORMACIÓN DE LA HUMEDAD  
VOLUMÉTRICA (%) EN CM DE AGUA Y KPA  
DE POTENCIAL HÍDRICO DE TODAS LAS  
UNIDADES.**

TABLA I. RESULTADO DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) POTENCIAL HÍDRICO EN CM DE AGUA Y KPA EN EL ECOSISTEMA DE REFERENCIA (ER).

Transecto	30/08/2019			25/10/2019			18/12/2019		
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	NA	NA	NA	19,89	19,07	-1,87	22,07	15,44	-1,51
1	NA	NA	NA	18,59	21,85	-2,14	22,10	15,40	-1,51
1	NA	NA	NA	23,53	13,52	-1,33	27,02	9,96	-0,98
2	NA	NA	NA	20,15	60,48	-5,93	21,49	52,04	-5,10
2	NA	NA	NA	15,00	117,40	-11,51	22,13	48,47	-4,75
2	NA	NA	NA	21,45	52,27	-5,13	22,49	46,58	-4,57
3	NA	NA	NA	21,45	33,20	-3,26	23,11	27,14	-2,66
3	NA	NA	NA	16,27	68,78	-6,75	20,53	37,28	-3,66
3	NA	NA	NA	13,74	109,93	-10,78	21,21	34,20	-3,35
4	NA	NA	NA	17,04	60,86	-5,97	23,78	28,75	-2,82
4	NA	NA	NA	15,25	79,44	-7,79	25,25	25,01	-2,45
4	NA	NA	NA	23,79	28,73	-2,82	25,59	24,23	-2,38

Transecto	07/02/2020		21/02/2020		19/06/2020		
	$\theta$ (%)	h(kPa)	$\theta$ (%)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	52,25	0	46,89	0	14,30	37,68	-3,70
1	53,23	0	47,87	0	18,60	21,82	-2,14
1	58,16	0	53,49	0	19,70	19,44	-1,91
2	53,31	0	49,38	0	16,10	99,95	-9,80
2	53,98	0	50,25	0	19,00	69,09	-6,78
2	53,01	0	49,52	0	19,10	68,28	-6,70
3	53,72	0	50,10	0	18,50	48,98	-4,80
3	54,40	0	48,80	0	15,90	73,17	-7,18
3	54,67	0	51,73	0	17,80	54,19	-5,31
4	50,73	0	45,39	0	13,00	121,66	-11,93
4	56,68	0	53,11	0	16,60	64,70	-6,35

4	57,76	0	51,54	0	16,40	66,58	-6,53
---	-------	---	-------	---	-------	-------	-------

Transecto	06/07/2020			26/08/2020			16/10/2020		
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	13,40	43,54	-4,27	11,80	58,90	-5,78	16,34	28,55	-2,80
1	16,60	27,49	-2,70	19,10	20,69	-2,03	19,63	19,64	-1,93
1	20,00	18,86	-1,85	19,50	19,84	-1,95	21,47	16,29	-1,60
2	16,10	99,95	-9,80	16,70	92,09	-9,03	18,52	73,33	-7,19
2	18,50	73,33	-7,19	19,00	69,09	-6,78	19,20	67,48	-6,62
2	17,60	81,94	-8,04	19,90	62,23	-6,10	21,30	53,15	-5,21
3	16,00	71,95	-7,06	15,50	78,41	-7,69	19,10	45,05	-4,42
3	17,30	58,42	-5,73	16,50	66,24	-6,50	17,69	55,00	-5,39
3	15,50	78,41	-7,69	17,70	55,00	-5,39	18,44	49,68	-4,87
4	14,20	95,36	-9,35	13,20	116,44	-11,42	15,92	71,71	-7,03
4	15,00	82,80	-8,12	16,40	66,58	-6,53	18,65	49,21	-4,83
4	16,70	63,79	-6,26	17,00	61,19	-6,00	19,92	42,83	-4,20

**TABLA II. RESULTADO DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) POTENCIAL HÍDRICO EN CM DE AGUA Y KPA EN EL GEOFLUV GRANDE UMBRIA (GFGU).**

Transecto	11/07/2019			30/08/2019			25/10/2019		
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	8,23	87,16	-8,55	NA	NA	NA	20,99	10,27	-1,01
1	15,73	23,16	-2,27	3,23	NA	NA	19,89	12,5	-1,23
1	7,53	106,1	-10,4	5,17	293,73	-28,8	17,15	18,95	-1,86
1	9,19	69,1	-6,78	6,03	184,15	-18,06	15,87	22,71	-2,23
1	9,46	65,12	-6,39	8,86	74,54	-7,31	21,93	8,43	-0,83
2	NA	NA	NA	13,05	38,57	-3,78	19,34	14,05	-1,38
2	8,24	198,38	-19,45	8,13	213,94	-20,98	22,1	9,38	-0,92
2	11,99	48,64	-4,77	9,35	110,4	-10,83	21,55	10,2	-1
2	9,19	118,4	-11,61	8,34	185,89	-18,23	8,49	169,58	-16,63
2	9,29	113,29	-11,11	7,66	314,25	-30,82	10,84	65,66	-6,44
3	NA	NA	0	NA	NA	NA	10,8	106,95	-10,49
3	NA	NA	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA
3	NA	NA	0	NA	NA	NA	8,09	310,17	-30,42
3	NA	NA	0	NA	NA	NA	10,7	109,89	-10,78
3	NA	NA	0	NA	NA	NA	10,84	105,81	-10,38

Transecto	18/12/2019			07/02/2020		21/02/2020		19/06/2020		
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	21,69	8,9	-0,87	50,06	0	47,71	0	24,6	2,39	-0,23
1	21,06	10,13	-0,99	54,86	0	52,4	0	20,9	10,45	-1,02
1	19,13	14,13	-1,39	51,02	0	46,42	0	NA	NA	NA
1	21,45	9,37	-0,92	48,63	0	45,65	0	19,3	13,76	-1,35
1	19,6	13,12	-1,29	50,67	0	46,45	0	19,8	12,69	-1,24
2	22,55	8,74	-0,86	47,8	0	42,02	0	15,7	24,05	-2,36
2	24,87	5,67	-0,56	51,21	0	47,64	0	20,2	12,43	-1,22
2	21,86	9,74	-0,95	55,23	0	51,41	0	24,1	6,66	-0,65
2	23,01	8,1	-0,79	50,83	0	49,11	0	15,8	23,67	-2,32
2	16,31	21,86	-2,14	52,59	0	49,04	0	27,1	2,64	-0,26
3	15,39	43,21	-4,24	46,62	0	41,44	0	16,4	37,07	-3,64
3	17,44	31,88	-3,13	47,38	0	41,8	0	12,9	66,42	-6,51
3	20,25	21,41	-2,1	49,19	0	44,43	0	16	39,35	-3,86
3	20,62	20,29	-1,99	53,46	0	47,89	0	22	16,43	-1,61
3	19,82	22,78	-2,23	51,46	0	47,79	0	16,5	36,53	-3,58

	06/07/2020	26/08/2020	16/10/2020
--	------------	------------	------------

Transecto	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	21,8	8,68	-0,85	22,1	8,1	-0,79	22,8	6,71	-0,66
1	18,6	15,33	-1,5	17,6	17,76	-1,74	19,9	12,48	-1,22
1	19,5	13,33	-1,31	23,5	5,24	-0,51	25	0	0
1	15,4	24,27	-2,38	18,6	15,33	-1,5	22,4	7,5	-0,74
1	18	16,76	-1,64	16,6	20,49	-2,01	22,1	8,1	-0,79
2	14,3	30,42	-2,98	17,2	19,12	-1,87	18,8	15,17	-1,49
2	20,4	12,08	-1,18	20,8	11,4	-1,12	21,1	10,91	-1,07
2	22,6	8,67	-0,85	23,8	7,05	-0,69	24,4	6,27	-0,62
2	NA	NA	NA	17,8	17,51	-1,72	18	17,01	-1,67
2	23	8,11	-0,8	23,3	7,71	-0,76	23,6	7,31	-0,72
3	15	45,96	-4,51	15,2	44,52	-4,37	16,4	37,07	-3,64
3	12,9	66,42	-6,51	14,4	50,7	-4,97	16	39,35	-3,86
3	13	65,15	-6,39	15,8	40,57	-3,98	16,9	34,46	-3,38
3	20,6	20,35	-2	19,9	22,52	-2,21	20,3	21,26	-2,08
3	17,6	31,16	-3,06	17,8	30,29	-2,97	19,2	24,87	-2,44

**TABLA III. RESULTADO DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) POTENCIAL HÍDRICO EN CM DE AGUA Y KPA EN EL GEOFLUV GRANDE SOLANA (GFGS).**

Transecto	30/08/2019			25/10/2019			18/12/2019			07/02/2020		21/02/2020	
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (kPa)
1	10,45	77,19	-7,57	12,95	40,16	-3,94	13,76	33,71	-3,31	46,75	0	45,72	0
1	9,69	98,98	-9,71	17,51	17,13	-1,68	15,65	23,44	-2,30	48,94	0	42,42	0
1	14,35	29,92	-2,93	12,95	40,16	-3,94	13,73	33,92	-3,33	46,90	0	43,83	0
1	11,98	50,54	-4,96	13,74	33,85	-3,32	15,54	23,91	-2,34	48,98	0	42,04	0
1	7,81	219,76	-21,55	10,88	67,90	-6,66	9,11	122,52	-12,01	40,96	0	37,55	0

Transecto	19/06/2020			06/07/2020			26/08/2020			16/10/2020		
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	22,00	8,80	-0,86	15,10	25,92	-2,54	20,30	11,23	-1,10	19,54	12,62	-1,24
1	18,70	14,23	-1,40	19,20	13,20	-1,29	19,90	11,90	-1,17	19,10	13,39	-1,31
1	18,70	14,23	-1,40	19,40	12,81	-1,26	19,60	12,43	-1,22	20,39	11,06	-1,08
1	18,00	15,85	-1,55	17,10	18,30	-1,79	18,60	14,45	-1,42	18,61	14,45	-1,42
1	13,20	37,99	-3,73	12,80	41,54	-4,07	15,10	25,92	-2,54	15,98	22,04	-2,16



**TABLA IV. RESULTADO DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) POTENCIAL HÍDRICO EN CM DE AGUA Y KPA EN EL GEOFLUV PEQUEÑO ESTE (GFPE).**

Transecto	30/08/2019			25/10/2019			18/12/2019			07/02/2020	
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (kPa)
1	NA	NA	NA	14,24	31,96	-3,13	20,11	13,23	-1,30	48,68	0
1	NA	NA	NA	15,25	26,77	-2,63	18,65	16,05	-1,57	48,38	0
1	NA	NA	NA	14,24	31,96	-3,13	19,35	14,61	-1,43	50,05	0
1	8,05	176,43	-17,30	20,41	12,73	-1,25	21,62	10,95	-1,07	50,76	0
1	10,45	75,06	-7,36	20,93	11,92	-1,17	24,93	7,36	-0,72	50,77	0
2	11,22	42,60	-4,18	23,01	8,88	-0,87	23,08	8,82	-0,87	53,55	0
2	NA	NA	NA	19,89	11,90	-1,17	18,11	14,38	-1,41	50,88	0
2	9,63	66,59	-6,53	21,45	10,23	-1,00	24,94	7,52	-0,74	55,51	0
2	NA	NA	NA	12,25	34,00	-3,33	21,51	10,17	-1,00	46,02	0
2	10,17	56,22	-5,51	19,89	11,90	-1,17	25,27	7,31	-0,72	50,10	0
3	6,39	129,44	-12,69	12,25	34,23	-3,36	20,85	15,71	-1,54	48,06	0
3	5,06	NA	NA	12,74	32,35	-3,17	17,33	20,94	-2,05	45,02	0
3	7,79	74,39	-7,29	14,78	26,25	-2,57	20,16	16,61	-1,63	51,80	0
3	13,50	29,80	-2,92	22,49	13,72	-1,35	24,89	11,05	-1,08	54,24	0
3	11,00	40,14	-3,94	21,45	14,96	-1,47	23,00	13,14	-1,29	52,04	0

Transecto	21/02/2020		06/07/2020			26/08/2020			16/10/2020		
	$\theta$ (%)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	46,45	0	16,80	20,92	-2,05	16,80	20,92	-2,05	18,45	16,38	-1,61
1	42,11	0	14,00	33,41	-3,28	17,20	19,71	-1,93	18,34	16,84	-1,65
1	45,35	0	17,30	19,42	-1,90	20,20	13,08	-1,28	19,96	13,42	-1,32
1	46,26	0	21,10	11,67	-1,14	23,80	8,42	-0,83	23,47	8,73	-0,86
1	46,60	0	25,50	6,88	-0,67	22,90	9,37	-0,92	28,38	4,83	-0,47
2	48,56	0	23,30	8,65	-0,85	22,80	9,04	-0,89	26,93	6,40	-0,63
2	46,31	0	24,00	8,14	-0,80	24,70	7,67	-0,75	26,70	6,50	-0,64
2	50,10	0	23,90	8,21	-0,81	25,50	7,18	-0,70	27,70	6,00	-0,59
2	39,36	0	16,90	16,58	-1,63	17,40	15,61	-1,53	17,97	14,56	-1,43
2	45,88	0	21,10	10,57	-1,04	19,80	12,01	-1,18	24,51	7,80	-0,77
3	42,49	0	19,20	17,95	-1,76	19,50	17,52	-1,72	21,24	15,27	-1,50
3	37,17	0	14,60	26,70	-2,62	15,80	23,90	-2,34	19,41	17,67	-1,73
3	20,30	0	20,30	16,43	-1,61	21,10	15,40	-1,51	21,64	14,78	-1,45
3	25,80	0	25,80	10,07	-0,99	26,80	8,99	-0,88	29,73	5,42	-0,53
3	21,60	0	21,60	14,78	-1,45	23,40	12,69	-1,24	23,67	12,35	-1,21

**TABLA V. RESULTADO DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) POTENCIAL HÍDRICO EN CM DE AGUA Y KPA EN EL GEOFLUV ESTERIL (G. ESTERIL).**

Transecto	06/07/2020			26/08/2020			16/10/2020		
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	10,8	196,92	-19,31	8,2	NA	NA	12	125,11	-12,27
1	12	125,11	-12,27	12,3	114,2	-11,2	15	61,65	-6,05
1	16,3	49,51	-4,85	13,5	83,72	-8,21	17,4	42,04	-4,12
1	16,6	47,27	-4,64	13,2	89,86	-8,81	16	51,93	-5,09
1	12,7	102,08	-10,01	12,4	110,93	-10,88	13,8	78,29	-7,68
2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	14,9	423,46	-41,53	NA	NA	NA	16,3	206,35	-20,24
2	17,8	107,33	-10,52	17,2	137,8	-13,51	18,3	88	-8,63
3	12	45,79	-4,49	11	54,74	-5,37	13,7	35,07	-3,44
3	NA	NA	NA	4,2	NA	NA	10	67,01	-6,57
3	13,1	38,37	-3,76	12,8	40,2	-3,94	14,4	31,71	-3,11
3	14,8	30	-2,94	13,9	34,06	-3,34	16,8	23,01	-2,26
3	15,1	28,79	-2,82	14,1	33,09	-3,25	15,5	27,28	-2,68

**TABLA VI. RESULTADO DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) POTENCIAL HÍDRICO EN CM DE AGUA Y KPA EN EL TALUD CONVENCIONAL (TC).**

Transecto	30/08/2019			18/12/2019			07/02/2020		21/02/2020	
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (kPa)
1	2,56	600,96	-5,53	7,36	99,45	-0,91	50,81	0	47,21	0
1	1,25	4876,87	-44,87	6,20	129,55	-1,19	47,24	0	42,51	0
1	2,73	528,28	-4,86	7,20	102,85	-0,95	45,44	0	49,19	0
1	1,35	3451,95	-31,76	6,15	131,19	-1,21	49,92	0	45,35	0
1	NA	NA	NA	7,12	104,63	-0,96	50,04	0	44,78	0
2	0,00	0,00	0,00	4,52	NA	NA	44,96	0	42,48	0
2	0,00	0,00	0,00	5,14	3874,39	-35,64	47,63	0	42,75	0
2	0,00	0,00	0,00	5,79	1306,89	-12,02	49,55	0	44,32	0
2	0,00	0,00	0,00	6,65	596,43	-5,49	47,51	0	45,22	0
2	0,00	0,00	0,00	6,09	947,53	-8,72	46,99	0	43,64	0
3	7,87	483,38	-4,45	10,94	96,65	-0,89	48,19	0	47,75	0
3	10,34	116,53	-1,07	6,82	NA	NA	45,61	0	42,02	0
3	15,56	38,48	-0,35	8,04	405,41	-3,73	46,66	0	41,91	0
3	10,28	118,93	-1,09	16,23	34,97	-0,32	55,89	0	52,56	0
3	15,57	38,43	-0,35	11,60	80,93	-0,74	49,69	0	46,04	0

Transecto	19/06/2020			06/07/2020			26/08/2020			16/10/2020		
	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	$\theta$ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	14,50	35,09	-0,32	11,70	49,13	-0,45	12,70	43,28	-0,40	14,04	36,95	-0,34
1	12,10	46,65	-0,43	8,70	77,11	-0,71	11,20	52,54	-0,48	12,83	42,62	-0,39
1	16,40	28,66	-0,26	10,20	60,59	-0,56	11,60	49,78	-0,46	14,38	35,57	-0,33
1	14,10	36,70	-0,34	12,10	46,65	-0,43	13,40	39,79	-0,37	13,17	40,89	-0,38
1	13,60	38,87	-0,36	11,90	47,87	-0,44	12,00	47,25	-0,43	13,82	37,90	-0,35
2	11,20	103,24	-0,95	9,00	191,96	-1,77	10,30	129,48	-1,19	12,60	76,24	-0,70
2	11,40	98,54	-0,91	7,80	309,29	-2,85	5,20	3368,32	-30,99	11,89	88,30	-0,81
2	9,80	149,00	-1,37	9,90	144,73	-1,33	9,90	144,73	-1,33	12,83	72,92	-0,67
2	9,50	163,10	-1,50	8,00	282,59	-2,60	6,30	783,23	-7,21	11,20	103,24	-0,95
2	10,90	110,97	-1,02	9,90	144,73	-1,33	11,20	103,24	-0,95	13,19	68,01	-0,63
3	13,20	57,05	-0,52	10,20	122,27	-1,12	11,00	95,00	-0,87	15,22	40,50	-0,37
3	14,70	43,90	-0,40	10,20	122,27	-1,12	9,70	147,75	-1,36	13,10	58,16	-0,54
3	11,90	75,22	-0,69	11,20	89,85	-0,83	10,80	100,72	-0,93	14,41	46,00	-0,42
3	18,50	26,13	-0,24	13,60	52,94	-0,49	17,80	28,46	-0,26	18,74	25,40	-0,23
3	13,50	53,92	-0,50	10,00	131,42	-1,21	12,80	61,74	-0,57	16,74	32,61	-0,30

**TABLA VII. RESULTADO DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) POTENCIAL HÍDRICO EN CM DE AGUA Y KPA EN EL TALUD CON MANTA ORGÁNICA (TM).**

Transecto	30/08/2019			18/12/2019			07/02/2020		21/02/2020	
	Θ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	Θ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	Θ (%)	h (kPa)	Θ (%)	h (kPa)
1	10,36	196,17	-19,24	10,83	173,72	-17,04	44,78	0	44,78	0
1	7,87	467,84	-45,88	NA	NA	NA	40,88	0	40,88	0
1	10,34	197,23	-19,34	4,72	NA	NA	30,22	0	30,22	0
1	12,91	110,26	-10,81	10,23	203,21	-19,93	48,91	0	48,91	0
1	15,59	69,14	-6,78	8,55	350,18	-34,34	55,36	0	55,36	0
2	NA	0,00	0,00	10,78	67,61	-6,63	43,76	0	43,76	0
2	NA	0,00	0,00	10,75	68,06	-6,67	49,85	0	49,85	0
2	NA	0,00	0,00	9,95	82,25	-8,07	45,60	0	45,60	0
2	NA	0,00	0,00	9,57	90,88	-8,91	46,72	0	46,72	0
2	NA	0,00	0,00	8,04	149,70	-14,68	47,48	0	47,48	0
3	15,57	22,16	-2,17	11,93	34,75	-3,41	54,67	0	54,67	0
3	12,89	30,60	-3,00	11,51	36,84	-3,61	46,89	0	46,89	0
3	12,91	30,52	-2,99	12,45	32,41	-3,18	48,35	0	48,35	0
3	12,93	30,45	-2,99	10,13	45,31	-4,44	47,77	0	47,77	0
3	7,89	68,31	-6,70	9,68	48,78	-4,78	47,84	0	47,84	0

Transecto	19/06/2020			06/07/2020			26/08/2020			16/10/2020		
	Θ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	Θ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	Θ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)	Θ (%)	h (cm de agua)	h (kPa)
1	7,00	753,77	-73,92	8,90	307,47	-30,15	1,70		NA	12,53	119,58	-11,73
1	10,30	199,37	-19,55	8,60	343,50	-33,68	8,70	330,75	-32,43	11,78	138,53	-13,58
1	9,90	223,04	-21,87	10,00	216,71	-21,25	10,20	204,89	-20,09	12,91	110,47	-10,83
1	11,70	141,62	-13,89	9,50	251,65	-24,68	7,90	461,32	-45,24	13,05	108,36	-10,63
1	14,70	79,95	-7,84	11,40	151,54	-14,86	12,40	122,03	-11,97	14,99	76,07	-7,46
2	9,30	98,02	-9,61	7,50	189,10	-18,54	10,10	79,22	-7,77	12,55	47,40	-4,65
2	12,00	52,82	-5,18	11,20	61,81	-6,06	7,70	172,57	-16,92	14,74	34,02	-3,34
2	11,80	54,85	-5,38	9,90	83,30	-8,17	10,30	75,47	-7,40	NA	NA	NA
2	11,10	63,11	-6,19	7,50	189,10	-18,54	8,50	126,22	-12,38	12,92	45,02	-4,41
2	11,80	54,85	-5,38	10,00	81,22	-7,96	8,30	135,57	-13,29	13,03	44,27	-4,34
3	12,60	31,77	-3,12	9,60	49,44	-4,85	12,50	32,19	-3,16	15,09	23,40	-2,29
3	10,90	40,24	-3,95	10,30	44,11	-4,33	10,40	43,42	-4,26	13,68	27,64	-2,71
3	12,80	30,96	-3,04	10,90	40,24	-3,95	12,40	32,62	-3,20	15,57	22,09	-2,17
3	11,80	35,38	-3,47	9,00	54,93	-5,39	10,10	45,53	-4,47	13,87	26,98	-2,65
3	13,20	29,42	-2,88	10,10	45,53	-4,47	8,70	58,08	-5,70	14,36	25,40	-2,49

**ANEJO 3. RESULTADOS CON LOS CUALES SE  
HAN OBTENIDO LAS GRÁFICAS DEL  
APARTADO DE RESULTADOS.**



**TABLA I. MEDIA DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) DEL CONJUNTO DE PUNTOS DE MUESTREO DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS EN LAS DIFERENTES FECHAS.**

Fechas	Geofluv (%)	TC (%)	TM (%)	ER (%)
30/08/2019	10,119	7,501	11,926	NA
25/10/2019	15,923	NA	NA	18,846
18/12/2019	19,404	8,039	9,633	23,1535
07/02/2020	49,807	48,409	46,605	53,836
21/02/2020	46,087	45,182	NA	49,437
19/06/2020	18,987	13,02	11,393	17,2
06/07/2020	18,833	10,293	9,627	16,41
26/08/2020	19,698	11,567	9,871	16,839
16/10/2020	21,270	13,867	13,06	18,9

**TABLA II. MEDIA DE LOS POTENCIALES HÍDRICOS (KPA) DEL CONJUNTO DE PUNTOS DE MUESTREO DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS EN LAS DIFERENTES FECHAS.**

Tratamientos	Geofluv (kPa)	TC (kPa)	TM (kPa)	ER (kPa)
30/08/2019	-10,230	-10,48	-11,99	NA
25/10/2019	-6,823	NA	NA	-5,439
18/12/2019	-2,15	-5,59	-8,446	-2,98
07/02/2020	0	0	0	0
21/02/2020	0	0	NA	0
19/06/2020	-1,959	-0,654	-12,351	-6,09
06/07/2020	-2,046	-1,149	-13,792	-6,5
26/08/2020	-1,716	-1,172	-13,449	-6,266
16/10/2020	-1,393	-0,358	-5,949	-4,674

**TABLA III. MEDIA DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) DEL CONJUNTO DE PUNTOS DE MUESTREO DE LAS UNIDADES GEOFLUV EN LAS DIFERENTES FECHAS.**

Fechas	GFGU	GFGS	GFPE	GFPW
30/08/2019	8,32	10,86	9,8	11,49
25/10/2019	15,61	13,61	17,68	16,79
18/12/2019	20,34	13,36	21,56	22,36
07/02/2020	50,73	46,51	50,39	51,59
21/02/2020	46,7	42,31	45,24	50,09
01/04/2020	NA	NA	NA	NA
19/06/2020	19,85	18,12	NA	NA
06/07/2020	18,05	16,72	20,36	20,2
26/08/2020	18,96	18,7	21,18	19,95
16/10/2020	20,46	18,72	23,2	22,7

**TABLA IV. MEDIA DEL POTENCIAL HÍDRICO (KPA) DEL CONJUNTO DE PUNTOS DE MUESTREO DE LAS UNIDADES GEOFLUV EN LAS DIFERENTES FECHAS.**

Fechas	GFGU (kPa)	GFGS (kPa)	GFPE (kPa)	GFPW (kPa)
30/08/2019	-17,35	-9,34	-7,52	-6,72
25/10/2019	-6,83	-3,91	-2,05	-2,48
18/12/2019	-1,63	-4,66	-1,22	-1,2
07/02/2020	0	0	0	0
21/02/2020	0	0	0	0
19/06/2020	-2,13	-1,79	NA	NA
06/07/2020	-2,57	-2,19	-1,51	-1,92
26/08/2020	-2,08	-1,49	-1,31	-1,98
16/10/2020	-1,62	-1,44	-1,09	-1,29

**TABLA V. MEDIA DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) DEL CONJUNTO DE PUNTOS DE MUESTREO DE LAS GEOFORMAS LADERA Y DIVISORIA EN EL GFG (G) Y GFP (P)**

Fechas	Divisoria (G) (%)	Ladera (G) (%)	Divisoria (P) (%)	Ladera (P) (%)
30/08/2019	11,75	8,43	NA	NA
25/10/2019	14,99	14,06	14,63	17,77
18/12/2019	12,92	16,95	21,81	17,49
07/02/2020	47,46	48,76	50,69	51,54
21/02/2020	44,72	44,1	48,08	47,25
19/06/2020	17,44	18,01	NA	NA
06/07/2020	16,07	17,34	21,09	19,81
26/08/2020	19,23	18,2	21,55	19,99
16/10/2020	19,43	19,09	23,65	22,63

**TABLA VI. LA MEDIA DE LOS POTENCIALES HÍDRICOS (KPA) DEL CONJUNTO DE PUNTOS DE MUESTREO DE LAS GEOFORMAS LADERA Y DIVISORIA EN EL GFG (G) Y GFP (P)**

Fechas	Divisoria (G) (kPa)	Ladera (G) (kPa)	Divisoria (P) (kPa)	Ladera (P) (kPa)
30/08/2019	-5,68	-15,57	0	0
25/10/2019	-4,11	-5,03	-2,89	-2,12
18/12/2019	-2,65	-3,56	-1,14	-1,29
07/02/2020	0	0	0	0
21/02/2020	0	0	0	0
19/06/2020	-1,47	-2,18	NA	NA
06/07/2020	-2,66	-2,39	-1,38	-1,88
26/08/2020	-1,72	-1,91	-1,26	-1,82
16/10/2020	-1,58	-1,63	-1,03	-1,28

**TABLA VII. MEDIA DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA (%) DEL CONJUNTO DE PUNTOS DE MUESTREO DE LAS UNIDADES DONDE SE USÓ COLUVIÓN PARA RECONSTRUIR EL SUELO Y LAS QUE NO.**

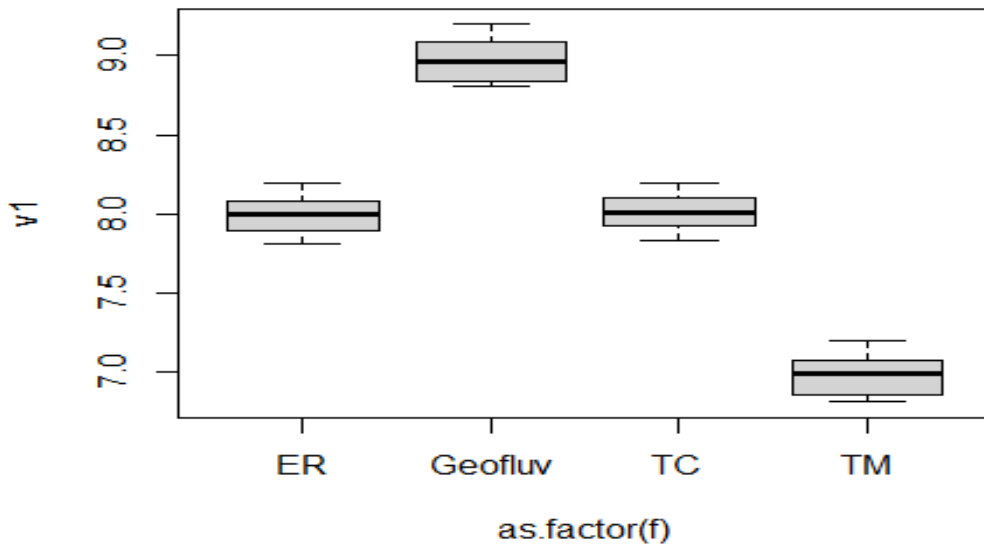
		07/07/2020	27/08/2020	10/08/2020
	Tratamiento	Humedad volumétrica (%)		
<b>No coluvión</b>	G.esteril	14,53	13,45	14,93
	TC	10,29	11,57	13,86
	TM	9,63	9,87	13,06
<b>Coluvión</b>	GFGU	18,05	18,96	20,46
	GFGS	16,72	18,70	18,72
	GFPE	20,36	21,18	23,20
	GFPW	20,20	19,95	22,70

**TABLA VIII. MEDIA DE LOS POTENCIALES HÍDRICOS (KPA) DEL CONJUNTO DE PUNTOS DE MUESTREO DE LAS UNIDADES DONDE SE USÓ COLUVIÓN PARA RECONSTRUIR EL SUELO Y LAS QUE NO.**

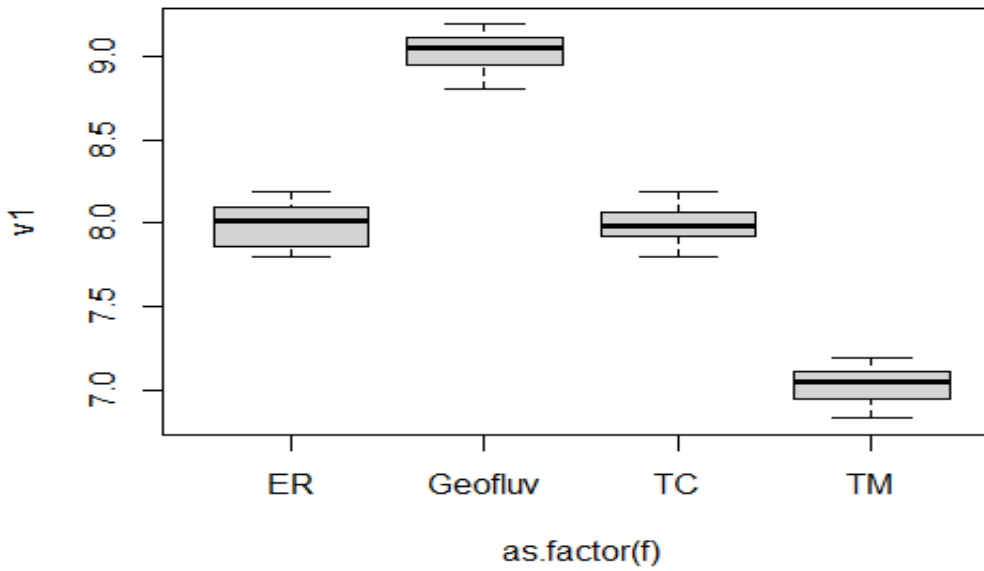
		07/07/2020	26/08/2020	16/10/2020
	Tratamiento	Potenciales hídricos (kPa)		
<b>No coluvión</b>	G.Esteril	-9,784	-13,549	-21,341
	TC	-1,149	-1,172	-0,358
	TM	-13,792	-13,449	-5,948
<b>Coluvión</b>	GFGU	-2,569	-2,081	-1,625
	GFGS	-2,192	-1,489	-1,443
	GFPE	-1,506	-1,314	-1,091
	GFPW	-1,9173	-1,980	-1,296

## **ANEJO 4. GRAFICAS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN.**

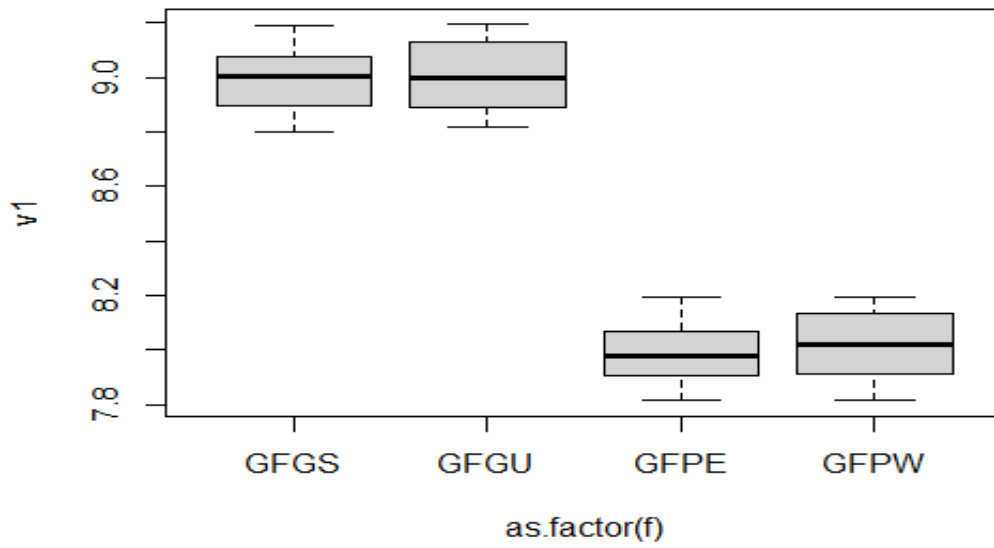
**TABLA I. GRAFICAS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.**



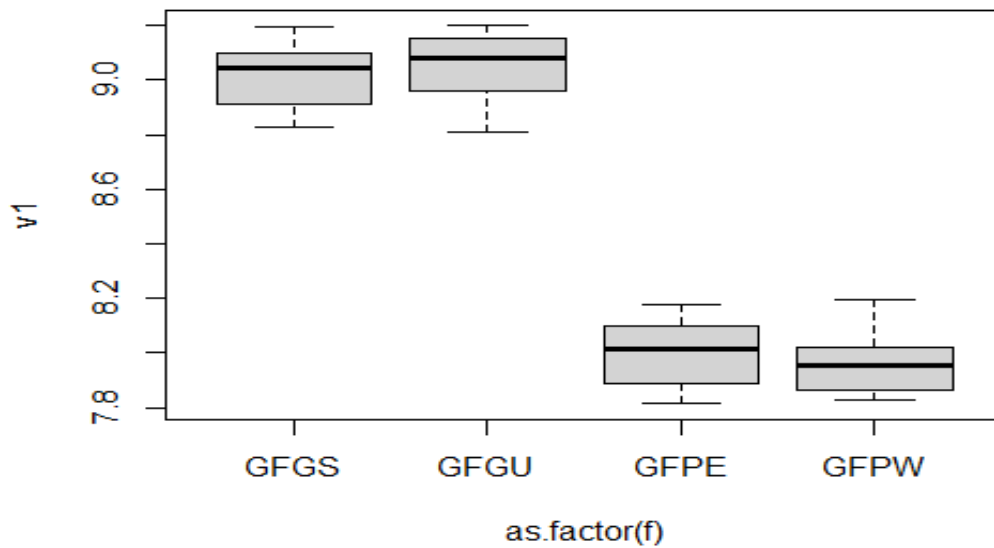
**TABLA II. GRAFICAS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LOS POTENCIALES HÍDRICOS DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.**



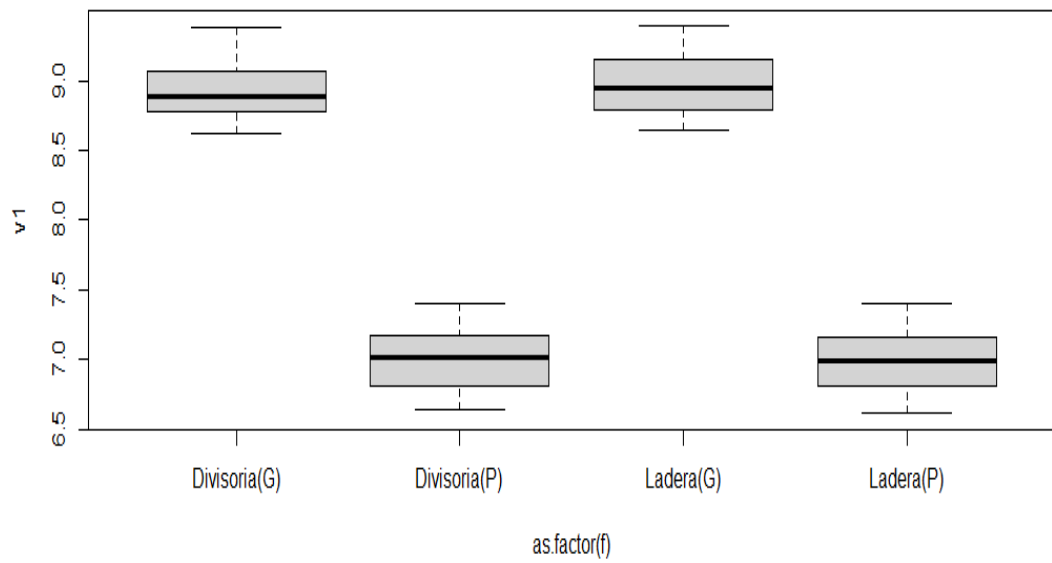
**TABLA III. GRAFICAS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA DE LAS UNIDADES DEL GEOFLUV.**



**TABLA II. GRAFICAS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LOS POTENCIALES HÍDRICOS DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.**



**TABLA IV. GRAFICAS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA DE LAS GEOFORMAS DEL GFP Y GFG.**



**TABLA VI. GRAFICAS DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA Z POR PARES DE DUNN DE LOS POTENCIALES HÍDRICOS DE LAS GEOFORMAS DEL GFG Y GFP**

