TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD EDÁFICA EN CANTERAS RESTAURADAS POR EL MÉTODO GEOFLUV™

MÁSTER EN RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS

Alumno: Miguel Lalaguna Domínguez

Director: Dr. D/José Manuel Nicolau Ibarra

Tutor académico: Dr. D/José Francisco Martín Duque

Alcalá de Henares, a 20 de junio de 2016

ÍNDICE

ABSTRACT/RESUMEN 7

1.- INTRODUCCIÓN 11

1.1.- Objetivos 13

1.2.- Antecedentes y Zona de Estudio 13

1.2.1.- La cantera el Machorro y su contexto 13

1.2.2.- La cantera Aurora y su contexto 16

2.- MATERIAL Y MÉTODOS 23

2.1.- Diseño experimental 23

2.1.1.- Medida de la humedad del sustrato 23

2.1.2.- Obtención de valores de humedad 25

2.2.- Tratamiento estadístico de los datos 27

3.- RESULTADOS 31

3.1.- Obtención de ecuaciones de transformación para la señal del TDR 31

3.2.- Contenido de humedad en cantera Aurora 32

3.3.- Contenido de humedad en cantera el Machorro 37

3.4.- Comparación entre canteras Aurora y el Machorro 42

4.- DISCUSIÓN 49

4.1.- Contenido de humedad 49

4.1.1.- Cantera Aurora 49

4.1.2.- Cantera el Machorro 51

4.2.- El modelado GeoFluv™ en relación al modelado topográfico convencional 52

5.- CONCLUSIONES **57**

6.- BIBLIOGRAFÍA **61**

7.- ANEJOS **67**

7.1.- Ecuaciones de transformación de la señal del TDR en valores de humedad volumétrica en % **67**

7.2.- Resultados de los muestreos **70**

7.3.- Serie de Tablas del análisis estadístico realizado complementarias de Resultados **75**

7.3.1.- Resultados en Cantera Aurora **75**

7.3.2- Resultados en Cantera el Machorro **77**

7.4.- Anexos de autorización y vistos buenos de tutor académico y director **81**

ABSTRACT/RESUMEN

RESUMEN

Las canteras Aurora (Tortosa, Tarragona) y el Machorro (Poveda de la Sierra, Guadalajara) han sido pioneras en la aplicación del método GeoFluv™ para el diseño y ejecución de su restauración geomorfológica, buscando generar forma de relieve basadas en vaguadas y laderas que puedan asemejarse a un entorno natural. Este trabajo supone el primer análisis de la distribución de humedad en las diferentes formas de relieve que el método GeoFluv™ genera.

En las zonas restauradas se utilizó la técnica del TDR para medir la humedad del sustrato. Los resultados de los valores de humedad en los primeros 20 cm muestran que:

a) La disponibilidad de agua para las plantas es mayor en el Machorro que en Aurora consecuencia del régimen de lluvias de cada zona.

b) En Aurora el Canal Principal posee contenidos de humedad significativamente más elevados que las laderas. En éstas, no existen diferencias significativas entre las geoformas importadoras (vaguadas) y exportadoras (divisorias).

c) En el Machorro las diferencias entre geoformas no son tan acusadas como en Aurora, si bien las formas importadoras (canales principales y vaguadas) presentan como conjunto una humedad mayor a las divisorias

d) El tipo de sustrato condiciona la distribución de la humedad en ambas canteras. Los sustratos con granulometría gruesa (coluvión) presentan valores más elevados que los estériles finos en Aurora y los de tierra vegetal que los conformados por estériles limo-arenosos en el Machorro.

Las formas de relieve generadas por GeoFluv™ favorecen la infiltración de las precipitaciones en las laderas, evitando la formación de redes de regueros, pasando el tipo de sustrato a ser el factor de control de los contenidos de humedad, a su vez condicionado por el régimen de lluvias de cada zona. La torrencialidad de las precipitaciones mediterráneas en Aurora explicaría la concentración de la humedad en el Canal Principal en relación al resto de geoformas; en tanto que la pluviometría más constante y con menos episodios de alta intensidad de el Machorro favorece una distribución de la humedad más homogénea, aunque con diferencias entre formas importadoras y exportadoras.

ABSTRACT

The quarries Aurora (Tortosa, Tarragona) and el Machorro (Poveda de la Sierra, Guadalajara) have been pioneers in applying the GeoFluv™ method for reclamation design and its implementation by following ecological restoration principles, trying to generate landforms based on valleys and hillsides. This research is the first about moisture distribution through the landforms created by GeoFluv™.

TDR technique was used in the restored areas in order to measure surface soil moisture. The results about moisture in first 20 cm of depth shown that:

a) Water availability for plants is bigger in el Machorro than in Aurora due to the rain pattern in each area.

b) In Aurora, the Main Channel has moisture values that are significantly higher than hillsides ones. In these ones, there aren't significant differences between importer geoforms (valleys) and exporter ones (watersheds).

c) In el Machorro, the differences between geoforms are not so pronounced as in Aurora, even though importer geoforms (main channels and valleys), as a group, have moisture values higher than watersheds.

b) The kind of substrate determines water distribution in both quarries. Substrates with coarse granulometry have higher values than the ones with fine barren in Aurora and the ones with top soil with organic material have higher values than soils with silt-sand barren in el Machorro.

Geomorphology designed by GeoFluv™ allows to avoid rain infiltration preventing rill generation. All of this implies that the kind of substrate becomes the key factor in moisture values control, nevertheless, this moisture percentage is severely affected by rain pattern in each area. Rainfall intensity in Aurora would explain the differences between Main Channel and the rest of forms; whereas constant rainfall with less intense episodes in el Machorro allows homogeneous water distribution, although differences between importer and exporter forms exists.

.

INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUCCIÓN

La sociedad actual avanza mediante la utilización de unos elevados niveles de materia y energía. Este avance genera unos impactos en el medio ambiente que afectan a la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, que se ven dificultados en su capacidad para proveer diversos servicios ecosistémicos. De entre estas actividades generadoras de impacto, la explotación minera a cielo abierto es una de las situaciones ambientales más problemáticas, porque implica reconstruir un ecosistema totalmente destruido.

En el campo de la restauración de canteras y minas a cielo abierto, el factor limitante que más ha afectado al éxito de la restauración tradicional es el control de la erosión. En un ambiente natural, la superficie se encuentra en un constante equilibrio dinámico entre las formas del terreno que observamos y los procesos geomorfológicos e hidrológicos que actúan sobre ellas, manteniéndose unos procesos de erosión, transporte y sedimentación adaptados a las condiciones ambientales existentes (Graff, 1977).

En el terreno de la minería a cielo abierto, las técnicas clásicas de restauración mediante la metodología de talud y bermas/cunetas en el medio-largo plazo no han llegado a ser lo suficientemente eficientes como para proveer unos ambientes naturalizados que faciliten el establecimiento de la vegetación y la recuperación de los procesos naturales previos a la perturbación debido al avance de la erosión y la generación de regueros y cárcavas en los taludes por las elevadas pendientes (Nicolau, 2003). El problema radica en que, además de generar estructuras artificiales de integración paisajística limitada, su necesidad de mantenimiento es elevada, especialmente en climas donde la precipitación es irregular y muy agresiva. Este planteamiento obliga además a diseñar todo el proceso de revegetación para reducir la erosión del sustrato de los taludes, y deben dejarse en segundo plano otros aspectos como la biodiversidad vegetal o la creación de microhábitats.

En base a este problema, aparece la necesidad de diseñar nuevas técnicas que consideran los ecosistemas en su conjunto, técnicas basadas en una restauración ecológica que pretende recuperar los bienes y servicios de una zona degradada a través de la consolidación de un ecosistema funcional. Para ello, debe fijarse una referencia a seguir en la restauración, teniendo en cuenta la historia del emplazamiento. (Balaguer *et al.*, 2014)

Ante esta necesidad de descubrir nuevas técnicas de restauración basadas en un manejo experto de la geomorfología y el control de la erosión, se desarrolla el método GeoFluv Natural Regrade, basado en simular ambientes naturales donde predominan los cauces y las laderas de pendientes suaves en lugar de los taludes y las bermas. El método GeoFluv^{TM} (patentado en EEUU), y el software Natural Regrade (de la compañía CARLSON SOFTWARE) que permite desarrollarlo, constituyen las herramientas más avanzadas que existen actualmente, a nivel internacional, para la Restauración Geomorfológica de espacios afectados por movimientos de tierras en general, y por actividades mineras en particular. (Martín-Duque *et al.*, 2012)

Estas herramientas permiten diseñar y construir formas diversas de laderas y valles por los que discurre una red de drenaje, que incluye desde pequeños canales trazados en zig-zag hasta llanuras aluviales con cursos meandriformes. Todo ello configura conjuntos naturales coherentes con el entorno y funcionales, diseñados para responder de manera segura ante lluvias y crecidas de distinta magnitud y frecuencia, de carácter tanto ordinario como extraordinario (Martín-Duque, *et al.*, 2012). El objetivo es conseguir ecosistemas y paisajes estables ante la erosión hídrica, de manera que el desarrollo del suelo y de las comunidades vegetales no se ve comprometido y en los que la calidad del agua es comparable a la de las zonas próximas, no modificadas por la minería.

La metodología de GeoFluv^{TM} Natural Regrade es todavía reciente y cuenta con pocos ejemplos finalizados y pocos estudios realizados sobre su capacidad para controlar la erosión, facilitar el establecimiento de la vegetación y, especialmente, sobre la formación de suelo, la distribución de la humedad en el mismo y la disponibilidad de agua para las plantas en las diferentes morfologías generadas.

Se espera que este nuevo planteamiento de restauración de espacios mineros sea determinante para un cambio en la filosofía de la gestión de estas áreas en vistas de una gestión del territorio promotora de la biodiversidad. Este beneficio ambiental es una de las principales aportaciones del método al ser capaz de compatibilizar una actividad muy destructiva con el mantenimiento del entorno.

De acuerdo a esto, surge la posibilidad de avanzar en el conocimiento de esta nueva metodología. En este contexto, este Trabajo de Fin de Máster busca profundizar en la capacidad del método para distribuir la disponibilidad de agua en el suelo y facilitar el establecimiento de comunidades vegetales en las diferentes formas de relieve generadas.

Para ello se actuó sobre dos canteras que en sus procesos de restauración vienen empleando el método GeoFluv^{TM}. Estas canteras son el Machorro (Poveda de la Sierra, Guadalajara) y Aurora (Tortosa, Tarragona). Sobre la cantera el Machorro viene realizándose el seguimiento de la respuesta de la geomorfología generada a la erosión y el arrastre de sedimentos (Martín-Moreno, 2010), si bien, éste es el primer caso de seguimiento de la distribución del agua sobre el relieve generado bajo el método GeoFluv^{TM}.

1.1.- Objetivos

Los objetivos de este Trabajo Fin de Máster han sido:

- Profundizar en la capacidad del método GeoFluv^{TM} para ofrecer una adecuada disponibilidad de agua en el suelo en las diferentes formas de relieve generadas de forma que se facilite el establecimiento de una comunidad vegetal.
- Comparar la influencia de los diferentes tipos de sustrato, la orientación y las formas de relieve en ambas zonas en la distribución de la humedad.
- Comparar la capacidad del método en dos ecosistemas con características climáticas diferentes, Tortosa (Clima mediterráneo-marítimo) y Poveda de la Sierra (Clima mediterráneo-continental).
- Describir la evolución estacional de la humedad en cada sustrato.
- Obtener ecuaciones para la transformación de la señal del dispositivo de medición en campo (TDR) en valores reales de humedad para cada tipo de sustrato estudiado.

1.2.- Antecedentes y Zona de Estudio

1.2.1.- La cantera el Machorro y su contexto

La cantera el Machorro (Figura 2) se sitúa en la Zona Periférica de Protección (ZPP) del Parque Natural del Alto Tajo (PNAT). El PNAT abarca 38 municipios entre las provincias de Guadalajara y Cuenca, con una superficie de 105721 hectáreas y una ZPP de 70544 hectáreas. La zona de estudio se encuentra dentro del término municipal de Poveda de la Sierra (Guadalajara) (Figura 1), en la cuenca del arroyo llamado Merdero, siendo la distancia de la mina al río Tajo de unos 2,2 km. (Martín-Moreno, 2013).

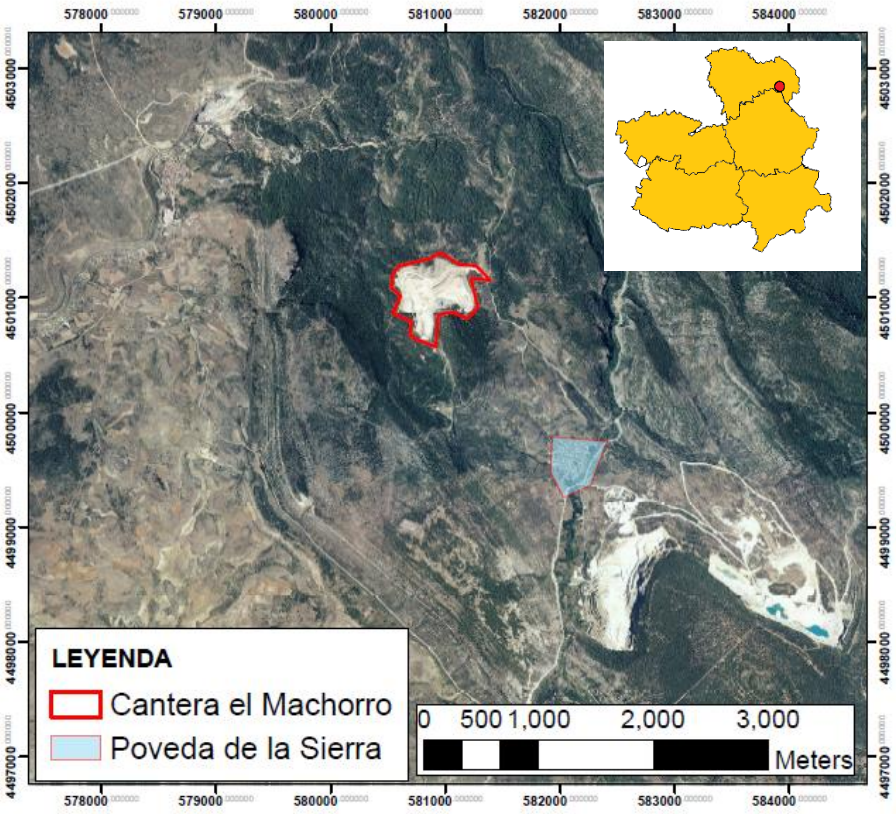


Figura 1. Localización de cantera el Machorro en el municipio de Poveda de la Sierra en Castilla la Mancha (Imagen: Ortofoto del PNOA, Hojas 514 y 539; IGN, 2015 y Elaboración Propia)

Se trata de una cantera activa a cielo abierto explotada por la empresa CAOBAR S.A. de la cual se extrae caolín. En la ZPP del Parque Natural se localizan ésta y otras explotaciones mineras que generan un impacto hidrológico por emisión de sedimentos sobre la red fluvial del Parque y su entorno, a la vez que existen otras fuentes naturales de emisión de sedimentos, como son una serie de cárcavas (Martín-Moreno *et al.*, 2012). Sobre esta mina, así como otras de la misma zona, las acciones de restauración se han centrado en ocultar los frentes de explotación mediante la metodología de construcción de escombreras de estériles de gran altura con varios niveles de terrazas y cunetas que conducen agua y sedimentos a balsas de decantación a fin de disminuir la erosión, limitar la llegada de sedimentos al río y disminuir el impacto visual. No obstante, dos de las explotaciones mineras de la ZPP (Nuria y Santa Engracia) fueron abandonadas una vez concluyó su explotación sin realizarse labores de restauración (Martín-Duque *et al.*, 2009).

En la mina el Machorro, una vez construidas las escombreras eran cubiertas por coluvión carbonático. En la mina aparecen varios niveles de estado de la restauración según el momento en que los diferentes frentes de explotación han ido abandonándose existiendo

zonas con unas coberturas vegetales mayores que otras. Asimismo, es importante señalar que, desde 2012, la mina ha adoptado un sistema de restauración basado en el método GeoFluv^{TM} (Martín-Moreno, 2013) que seguirá en la restauración del avance del frente de explotación según sean otorgadas nuevas concesiones. Sobre esta zona de la mina que ha adoptado el método GeoFluv^{TM} se realizaron los trabajos del TFM.

Figura 2. Fotografía aérea de la cantera el Machorro (Poveda de la Sierra) (Imagen: Paisajes Españoles S.L., 2012)

Caracterización de la zona de estudio

En la cantera el Machorro, desde que en 2012 comenzaron las acciones de restauración mediante el método GeoFluv^{TM}, las labores se han basado en la creación de dos cuencas con sus correspondientes geoformas de laderas con vaguadas y divisorias asociadas que distribuyen el agua disponible por el terreno y conducen la escorrentía hasta una de las balsas de decantación diseñadas en la cantera. Cada una de estas cuencas está asociada a un tipo de sustrato distinto utilizado como capa superficial. Los dos sustratos utilizados en la cantera el Machorro fueron un sustrato estéril arenoso sobre el que no se realizaron acciones de siembra ni plantación y un segundo sustrato utilizado como tierra vegetal de carácter más arcilloso. Sobre este segundo sustrato sí se realizaron una siembra de mezcla comercial y plantación de *Pinus nigra*, *Quercus faginea* y *Boxus sempervirens*. Asimismo, sobre parte del terreno cubierto con esta tierra vegetal también se extendió una enmienda orgánica.

Debe añadirse que la caracterización de los sustratos responde a criterios puramente cualitativos aportados por la empresa concesionaria, manteniéndose éstos a la espera de la obtención de los resultados de un análisis físico-químico encargado.

En lo referente al clima, esta zona se haya caracterizada por un clima mediterráneo con influencia continental, con inviernos fríos, veranos cortos y secos con episodios de intensas lluvias en otoño y primavera. Atendiendo a los datos de la estación de Peralejos de las Truchas, la precipitación anual es de unos 780 mm y la temperatura media de unos 10 ºC. (Ortega, 2015)

1.2.2.- La cantera Aurora y su contexto

La cantera Aurora (Figuras 4 y 5) se trata de una explotación propiedad de la empresa CEMEX S.A., de la cual se extraen arcillas. Esta cantera, así como otras del entorno, se encuentran dentro del Programa LIFE+ ECOREST CLAY. Se trata de un proyecto para la restauración ecológica integral de una zona minera en el que va a aplicarse la metodología GeoFluv^{TM} a fin de reconstruir paisajes similares a los del entorno con mayor estabilidad en el largo plazo frente a la erosión, que a su vez permitirán reconstruir ecosistemas sostenibles con valores notables de biodiversidad, y paisajes coherentes e integrados con los del entorno. El proyecto engloba las canteras Aurora, Pastor I y Pastor II, propiedad de CEMEX S.A. en el entorno de Campredó, en el término municipal de Tortosa (Tarragona) (Figura 3). El objetivo es desarrollar un prototipo de gestión de espacios mineros implementando soluciones dentro del ámbito de la restauración ecológica, promoviendo la reconstrucción de ecosistemas basados en modelos geomorfológicos que imitan el relieve natural. Para ello, se diseñan relieves que repliquen paisajes naturales e integren una nueva red hidrológica en el sistema de lagunas endorreicas que, producto de la explotación, se ha generado en la zona. La propuesta del Programa LIFE aborda, no solamente el remodelado del relieve sino también los procesos de formación de suelo y el establecimiento de una cubierta vegetal en un entorno minero de 80 ha, de los cuales las canteras Aurora y Pastor ocupan el 61 % de la superficie (LIFE Ecorest Clay, 2012).

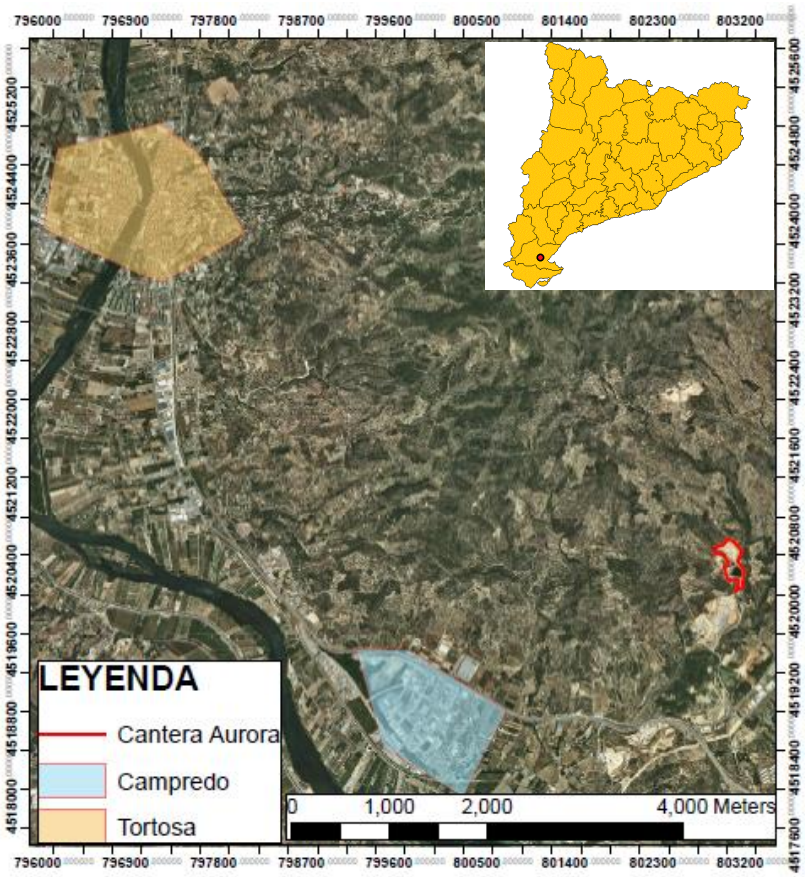


Figura 3. Localización de cantera Aurora en el municipio de Campredó en Catalunya (Imagen: Ortofoto del PNOA, Hoja 522; IGN, 2015 y Elaboración Propia)

Las actuaciones de este TFM se limitaron a una de las tres cuencas de la cantera Aurora diseñadas con el método GeoFluv^{TM}, concretamente a la primera en finalizarse que es además la primera en la que comenzaron las labores de revegetación.

Figura 4. Fotografía aérea de la cantera Aurora en restauración (Tortosa) (Imagen: CEMEX, 2015)

Figura 5. Fotografía aérea de la cantera Aurora tras restauración (Tortosa) (Imagen: Paisajes Españoles S.L., 2016)

Caracterización de la zona de estudio

Como se ha mencionado previamente, en la cantera Aurora el diseño GeoFluv^{TM} se ha basado en el proyecto de tres cuencas sobre el relieve de la mina que derivan los flujos de agua superficiales hasta la balsa generada resultado de las actividades de explotación en la parte sur de la misma. La zona de estudio se encuadra en la cuenca del canal denominado como Canal Principal 3 en el diseño geomorfológico y fue la primera donde se finalizaron las acciones de restauración geomorfológica y sobre la que empezaron las labores de revegetación consistentes en la siembra y plantación de diversas especies acordes con el hábitat de interés comunitario 5330 predominante en la zona de estudio apoyada en un plan de riegos en la época de sequía estival. Algunas de las especies más representativas en el plan de revegetación fueron *Brachypodium sp.*, *Juniperus oxycedrus*, *Juniperus phoenicia* y *Erica multiflora.*

De igual modo, sobre la cuenca de estudio, se utilizaron dos tipos de sustratos como capa superficial. Se trataba de un sustrato compuesto por estériles arcillosos y un sustrato conformado por un coluvión de carácter pedregoso. La clasificación de estos sustratos responde a criterios cualitativos al no disponerse en el momento de la redacción de los análisis físico-químicos correspondientes para los diferentes sustratos.

En lo referente al clima, en esta zona nos encontramos con un clima mediterráneo con influencia costera caracterizado por sus inviernos suaves y veranos cálidos. Registra

pocos días de lluvia al año y una fuerte sequía estival, aunque las precipitaciones pueden alcanzar una gran intensidad en episodios concretos, especialmente en situaciones de "gota fría" durante el otoño e invierno. En el caso del área de estudio, la precipitación media anual es de unos 522 mm y la temperatura media de unos 16 ºC, si bien en el año de estudio la fuerte sequía de finales de 2015 en Cataluña disminuyó la precipitación anual a unos 340 mm.

MATERIAL Y MÉTODOS

2.- MATERIAL Y MÉTODOS

2.1.- Diseño experimental

2.1.1.- Medida de la humedad del sustrato

En las zonas restauradas mediante el método GeoFluv^{TM} Natural Regrade en las canteras el Machorro (Guadalajara) y Aurora (Tarragona) se utilizó la técnica del TDR para medir la humedad del suelo. Este método mide el tiempo de ida y vuelta de un impulso electromagnético de alta frecuencia. La velocidad de propagación del impulso es función de la permitividad dieléctria del medio, a su vez muy condicionada por el contenido en agua del mismo por lo que el método puede aplicarse de forma indirecta para medir el contenido de humedad del suelo (Tapias Pantebre *et al.*, 2001).

Se dividieron las áreas de estudio en diferentes zonas según criterios de tipo de sustrato, orientación y geoforma y se colocaron una serie de tres pares de varillas metálicas de 23 cm de longitud introducidas hasta 20 cm en el suelo en diferentes alturas de cada una de estas zonas (Figuras 6, 7 y 8). Por lo general, se procuró no colocar los pares de varillas en el fondo de los regueros debido a la dificultad para que se mantengan inalteradas y al hecho de que en las zonas de fondo no suele establecerse la vegetación, si bien en las áreas identificadas como Canal Principal no había más opciones.

Figura 6. Imagen de un par de varillas junto a su estaca de identificación en suelo de cantera Aurora

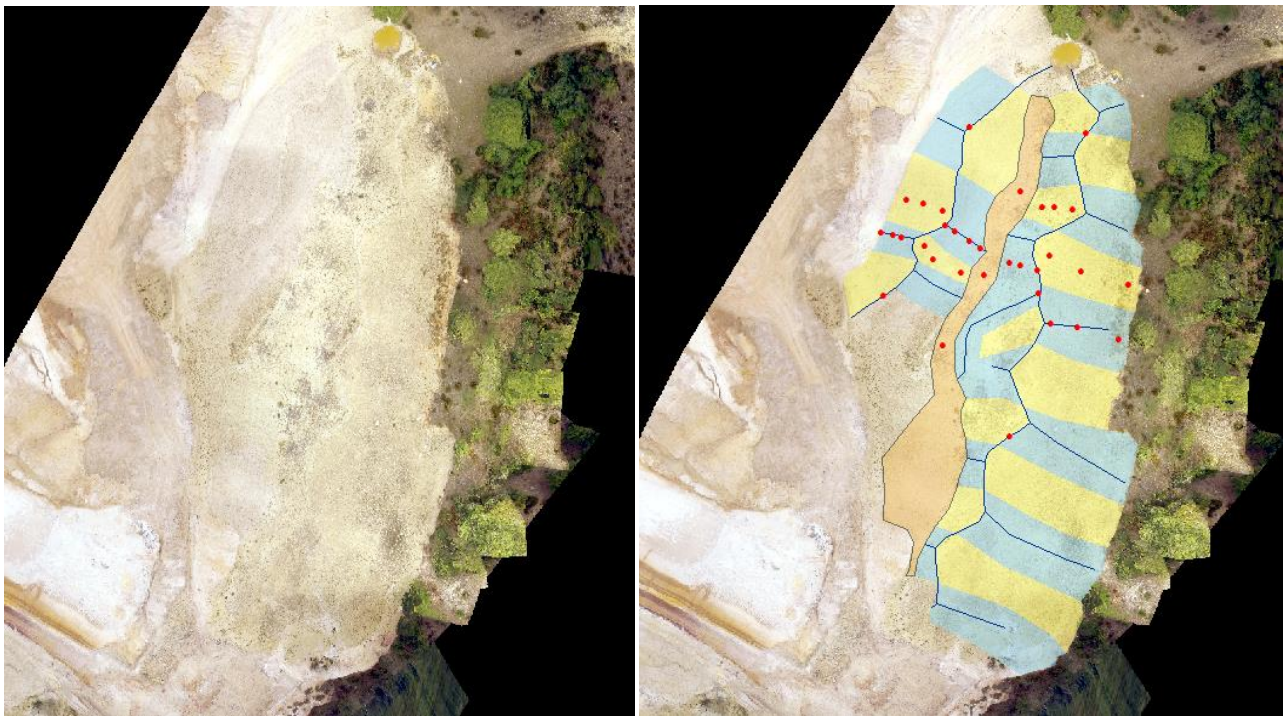


Figura 7. Distribución de puntos de muestreo sobre relieve de cantera el Machorro (Guadalajara). Las áreas en azul representan zonas de vaguada y las áreas en amarillo representan zonas en ladera o divisoria según las morfologías diseñadas con GeoFluv™. (Imagen: Empresa DgDrone y Elaboración Propia, 2016)

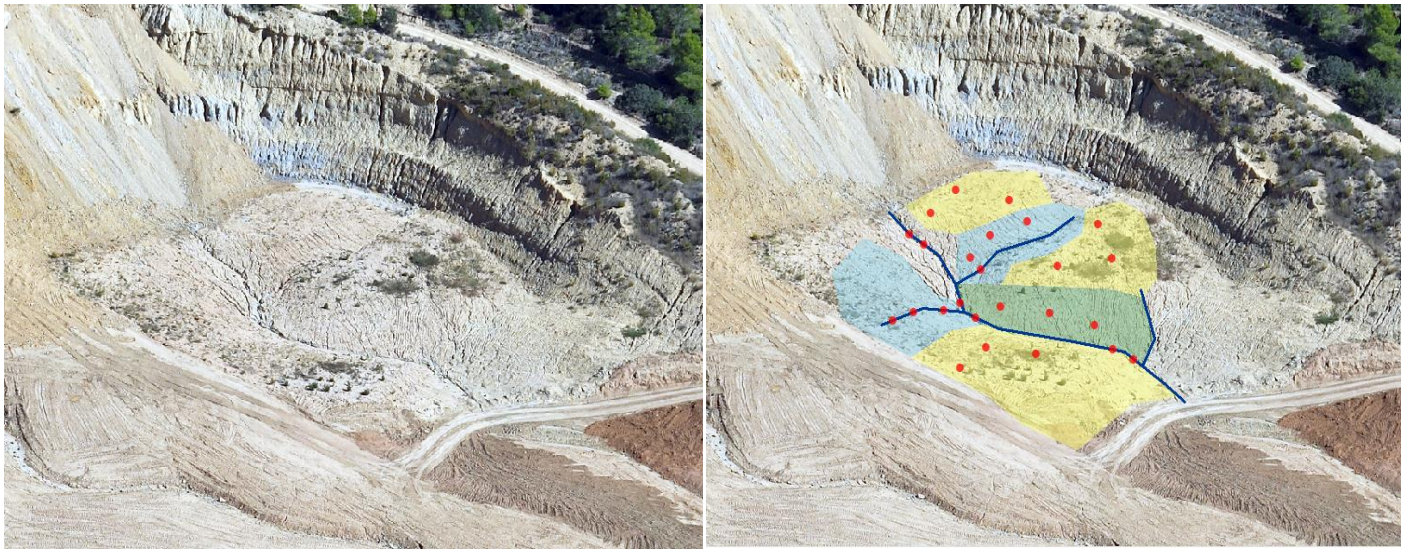


Figura 8. Distribución de puntos de muestreo sobre relieve de cantera Aurora (Tortosa). Las áreas en azul representan zonas de vaguada, las áreas en amarillo representan zonas en divisoria o ladera con mayoría de horas de solana y las áreas en verde laderas con mayoría de horas en umbría según las morfologías resultantes de GeoFluv™. La orientación de la imagen esta girada 90 º en el sentido de las agujas del reloj a fin de apreciar mejor la zona de estudio (Imagen: Paisajes Españoles S.L., y Elaboración Propia, 2015)

Estas varillas fueron las que, posteriormente y conectadas a la sonda del TDR aportaron los valores en distancias (en metros) que debieron transformarse en valores de porcentaje de humedad indicadores de los niveles reales de agua en el sustrato. Se realizaron estas medidas de forma mensual en Aurora durante los meses julio-mayo y también mensual en el Machorro en los meses septiembre-mayo.

Las diferentes unidades ambientales identificadas en cada una de las canteras se muestran en la siguiente tabla (Tabla 1). Los criterios de identificación responden al tipo de geoforma, el tipo de sustrato y la orientación para los casos en que se compartan las dos primeras características.

Tabla 1. Unidades ambientales de muestreo en canteras de estudio

Zona (Aurora)	Código	Zona (el Machorro)	Código
Divisoria Estéril Arcilloso	L3DA	**Canal Principal Tierra Vegetal**	L1C
Divisoria Coluvión	L3DC	**Vaguada Este Tierra Vegetal**	L1VE
Vaguada Coluvión Umbría	L3VU	**Vaguada Oeste Tierra Vegetal**	L1VO
Vaguada Estéril Arcilloso Solana	L3VS	**Divisoria Este Tierra Vegetal**	L1DE
Ladera Estéril Arcilloso Solana	L3LS	**Divisoria Oeste Tierra Vegetal**	L1DO
Ladera Estéril Arcilloso Umbría	L3LU	**Divisoria Principal Tierra Vegetal**	DI
Canal Principal	L3C	**Canal Principal Estéril Arenoso**	L2C
Canal Principal 2	L3C2	**Vaguada Este Estéril Arenoso**	L2VE
		Vaguada Oeste Estéril Arenoso	L2VO
		Divisoria Este Estéril Arenoso	L2DE
		Divisoria Oeste Estéril Arenoso	L2DO

2.1.2.- Obtención de valores de humedad

La metodología utilizada para transformar los resultados de lectura del TDR en valores de porcentaje de humedad en el suelo se basó en la transformación de estos datos en valores de la constante dieléctrica del suelo. Los tipos de sustrato de cada área de estudio y la pertenencia de las diferentes formas de relieve a cada uno de ellos puede consultarse en la Tabla 2. Con este fin se recogieron muestras de los diferentes sustratos para medir su contenido en humedad por el método gravimétrico, a fin de poder establecer una relación entre la lectura del TDR y el contenido real de humedad. Para ello se usó la

relación $K = (Lap/Lr)^2$ donde K es la constante dieléctrica del suelo; Lap, el resultado que aporta el TDR para esa humedad en cada sustrato y Lr es la longitud real de las varillas introducidas en cada muestra en laboratorio (en este caso, 18 cm).

En la cantera Aurora fueron recogidas dos muestras de cada tipo de sustrato identificado (estéril arcilloso y coluvión pedregoso) y en el Machorro otras dos muestras para cada sustrato (tierra vegetal arcillosa y estéril arenoso). El volumen involucrado para la medida de humedad es el correspondiente a un cilindro de altura igual a la longitud de las varillas de la sonda y cuyo diámetro es 1,4 veces la distancia entre ellas (Topp, *et al.*, 1985) como mínimo. En este caso, la longitud de las varillas es de 23 cm y la distancia entre ellas de 4 cm por lo que fue necesario un volumen mínimo de muestra de 566,20 cm^3. Para obtener este volumen de muestra se utilizaron tubos de PVC de 30 cm de largo y 11 cm de diámetro exterior (10,8 cm de diámetro interior). El procedimiento consistió en introducir los tubos de PVC en el terreno y extraerlos de forma que se mantuviese la porción de sustrato de la forma más inalterada posible.

Tabla 2. Unidades ambientales de muestreo en canteras de estudio y tipo de sustrato asociado

Zona (Aurora)	Código	Tipo Suelo	Zona (Machorro)	Código	Tipo Suelo
Divisoria Estéril Arcilloso	L3DA	Estéril Arcilloso	**Canal Principal Tierra Vegetal**	L1C	Tierra Vegetal Arcillosa
Divisoria Coluvión	L3DC	Coluvión Pedregoso	**Vaguada Este Tierra Vegetal**	L1VE	Tierra Vegetal Arcillosa
Vaguada Coluvión Umbría	L3VU	Coluvión Pedregoso	**Vaguada Oeste Tierra Vegetal**	L1VO	Tierra Vegetal Arcillosa
Vaguada Estéril Arcilloso Solana	L3VS	Estéril Arcilloso	**Divisoria Este Tierra Vegetal**	L1DE	Tierra Vegetal Arcillosa
Ladera Estéril Arcilloso Solana	L3LS	Estéril Arcilloso	**Divisoria Oeste Tierra Vegetal**	L1DO	Tierra Vegetal Arcillosa
Ladera Estéril Arcilloso Umbría	L3LU	Estéril Arcilloso	**Divisoria Tierra Vegetal**	DI	Tierra Vegetal Arcillosa
Canal Principal	L3C	Arcilloso	**Canal Principal Estéril Arenoso**	L2C	Estéril Arenoso
Canal Principal 2	L3C2	Arcilloso	**Vaguada Este Estéril Arenoso**	L2VE	Estéril Arenoso
			Vaguada Oeste Estéril Arenoso	L2VO	Estéril Arenoso
			Divisoria Este Estéril Arenoso	L2DE	Estéril Arenoso
			Divisoria Oeste Estéril Arenoso	L2DO	Estéril Arenoso

Este procedimiento se llevó a cabo en ambas zonas de estudio a finales del mes de diciembre, obteniéndose dos muestras de cada tipo de sustrato en cada área, esto es, ocho muestras en total que serían las que posteriormente se tratarían en laboratorio en el procedimiento obtención de las ecuaciones de transformación de la señal del TDR a porcentaje de humedad en volumen de sustrato. Este tratamiento a las muestras recogidas consistió en el congelado de las mismas durante dos días para posteriormente realizar un corte limpio por su parte inferior dejando la longitud del tubo en 25 cm, de los cuales aproximadamente 22 estaban rellenos de tierra. Posteriormente, todas las muestras se taparon por la zona del corte con una gasa transpirable y se saturaron desde abajo con agua colocándolas en bandejas para tal efecto.

Una vez se encontraban saturadas, se procedió a tomar medidas de humedad con el TDR durante 40 días (cada 2 días) colocando varillas en las muestras insertando las varillas 18 cm en el monolito. Asimismo, se realizaron medidas mediante el método gravimétrico durante esos mismos 40 días. El resultado final es la obtención de una ecuación distinta para cada sustrato identificado que permite la transformación de la señal de salida del TDR (en metros) en valores de porcentaje de humedad en el sustrato (en volumen/volumen), previa transformación de esta señal en valores de la constante dieléctrica. Las ecuaciones resultado para cada tipo de sustrato se muestran en la Tabla 3 en el apartado Resultados. Asimismo, en el apartado Anejos pueden consultarse las gráficas obtenidas en el procedimiento de calibración, así como las tablas completas de datos utilizados.

2.2.- Tratamiento estadístico de los datos

Tras la recopilación de los datos de humedad obtenidos en los diferentes muestreos, se procedió al análisis estadístico de los mismos, consistente en la obtención de datos estadísticos descriptivos (media, desviación típica) y en la posterior realización de un test ANOVA a fin de comprobar la influencia de los factores Orientación, Geoforma y Tipo de sustrato, así como Cuenca Principal o Secundaria y Altura de Punto de Muestreo en la cantera el Machorro, en la variable porcentaje de humedad en columen de sustrato. Asimismo, se realizó una comparación descriptiva entre los valores de ambas zonas de estudio.

Para ello, se recurrió a la prueba Kolmogorov-Smirnov para averiguar el tipo de distribución de las variables y al test de Levene para conocer la homocedasticidad

(homogeneidad de las varianzas). Para el caso en que las variables cumplían con los criterios de distribución normal y homogeneidad de varianzas se efectuó un test ANOVA para comprobar la veracidad de la hipótesis nula (no existen diferencias significativas entre los tipos de sustrato, entre las diferentes geoformas, entre las distintas orientaciones, así como entre las alturas del punto de muestreo y entre cuenca Principal y Secundaria en el Machorro). En los casos en que las variables no cumplían con criterios de normalidad, se recurrió a transformaciones matemáticas para adquirir una distribución normal.

Por último, para aquellos casos en los que las variables no cumplían con ambos criterios, ni podían ser transformadas para cumplir con ellos, se recurrió a las siguientes pruebas no paramétricas:

- U de Mann-Whitney cuando el factor tenía dos niveles de categoría, caso de la variable "Canal Principal/Canal Secundario" o "Tipo de sustrato".
- H de Kruskal-Wallis cuando el factor tenía más de dos niveles de categoría, caso de las variables "Orientación" o "Geoforma".

Excepcionalmente, en aquellos casos en los que para asumir una distribución normal de los datos se eliminaban muchos de ellos (mediante transformación matemática) también se realizaron las pruebas no paramétricas.

RESULTADOS

3.- RESULTADOS

3.1.- Obtención de ecuaciones de transformación para la señal del TDR

El procedimiento de obtención de ecuaciones de transformación de la señal del TDR en valores de porcentaje de humedad en el suelo es específico para cada tipo de sustrato analizado. Esto es debido a que la señal del TDR depende tanto de la humedad del sustrato como de su composición química.

El proceso en las dos zonas de estudio da como resultado la obtención de una ecuación para cada tipo de sustrato analizado (Tabla 3), ecuaciones polinómicas de tercer grado similares a las obtenidas por otros autores para el seguimiento de la humedad en otros ambientes como Moreno-de las Heras *et al.*, en 2011 para el caso particular de la mina de carbón el Moral en Utrillas (Teruel) con un clima mediterráneo seco. En el caso de estudio, los sustratos identificados se clasifican como estéril arcilloso y sustrato con coluvión en Aurora y como estéril areno-limoso y sustrato con tierra vegetal de carácter arcilloso en el Machorro. De modo orientativo, se incluye en la Tabla 4 una serie de valores guía en función del valor de salida del TDR. Las curvas resultado del procedimiento de calibración pueden consultarse en el Apartado Anejos, en su subapartado 7.1.

Tabla 3. Ecuaciones de transformación de la señal de TDR a porcentaje de humedad en volumen de suelo resultado del procedimiento de calibración

Tipo de Sustrato	Ecuación de Transformación
Estéril Arcilloso Aurora	$H(\%\ vol/vol) = 0{,}1001K^3 - 1{,}4886K^2 + 12{,}13K - 7{,}6904$
Coluvión Pedregoso Aurora	$H(\%\ vol/vol) = 0{,}2291K^3 - 3{,}3424K^2 + 18{,}674K - 13{,}997$
Tierra Vegetal Arcilloso Machorro	$H(\%\ vol/vol) = -0{,}0452K^3 + 0{,}2051K^2 + 6{,}1632K - 2{,}8535$
Estéril Arenoso Machorro	$H(\%\ vol/vol) = 0{,}3005K^3 - 2{,}8744K^2 + 14{,}366K - 8{,}5983$
$K = (Lap/Lr)^2$ **Lap = Señal del TDR** **Lr = Longitud de varillas insertadas en la tierra**	

Tabla 4. Valores guía obtenidos con las 4 ecuaciones de transformación tras procedimiento de calibración

Longitud Aparente Lap (mm)	Longitud Real Lr (mm)	Cte. Dieléctrica del suelo K	Humedad (% vol/vol)			
			Estéril Arcilloso Aurora	Coluvión Aurora	Tierra Vegetal Machorro	Estéril Arenoso Machorro
200	200	1	3,05	1,56	3,47	3,19
300	200	2,25	13,21	13,71	11,54	12,60
400	200	4	23,42	21,88	22,19	22,11
500	200	6,25	34,42	28,08	32,64	42,27

3.2.- Contenido de humedad en cantera Aurora

En lo referente a las diferencias de humedad entre las diferentes unidades ambientales, los resultados de la prueba H de Kruskal-Wallis aplicada a las diversas unidades resultantes del método GeoFluv™ (Tabla 5) indican la existencia de diferencias estadísticamente significativas. La unidad Ladera de Umbría sobre estéril arcilloso presenta los valores medios más altos con un porcentaje de humedad en el sustrato de 25,16%; mientras el resto de las geoformas pertenecientes al sustrato estéril arcilloso (L3DA, L3VS, L3LS) muestran los valores de contenido de humedad más bajos del estudio (16,09%; 17,28%; 16,10% respectivamente) (Figura 9). Las diferencias concretas entre pares de geoformas pueden consultarse en las Tablas 11 y 12 del apartado Anejos.

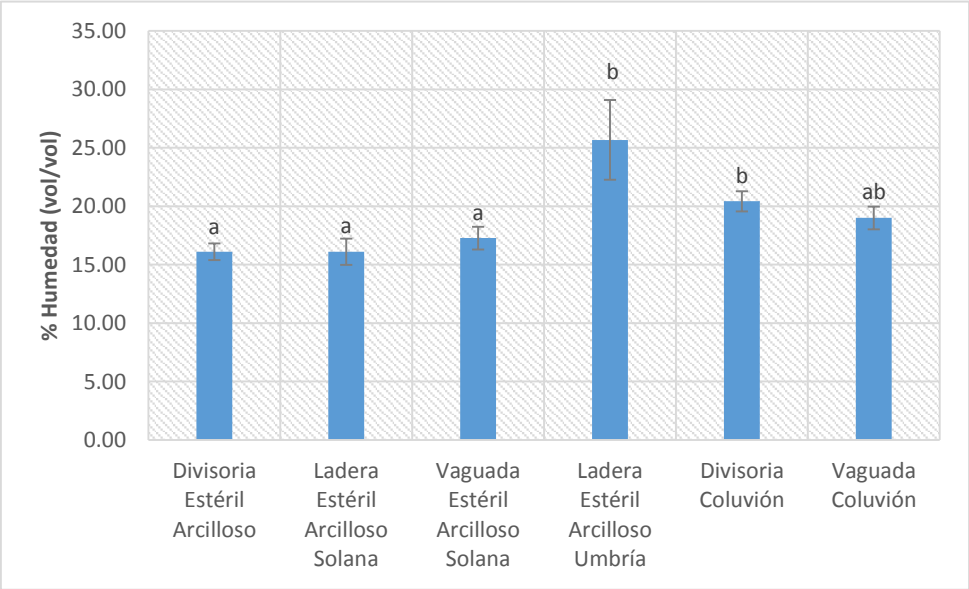


Figura 9. Medias de contenido de humedad en el sustrato durante el período de estudio en cada unidad ambiental en cantera Aurora excluyendo los resultados en el Canal Principal

Tabla 5: Resultados de prueba H de Kruskal_Wallis, definiendo en Aurora la unidad ambiental como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	H de K-W	Sig
% Humedad	Divisoria Estéril Arcillosa (L3DA)	29	16,09	3,84	22,974	**0,000**
	Ladera Estéril Arcilloso Solana (L3LS)	29	16,10	6,01		
	Vaguada Estéril Arcilloso Solana (L3VS)	30	17,28	5,33		
	Ladera Estéril Arcilloso Umbría (L3LU)	27	25,16	17,70		
	Divisoria Coluvión (L3DC)	30	20,42	4,68		
	Vaguada Coluvión Umbría (L3VU)	30	19,01	5,31		
	Total	175	19,02	8,87		

Por otra parte, los resultados de la prueba U de Mann-Whitney aplicada a los dos tipos de geoformas generadas (Tabla 6), vaguadas (formas importadoras) y laderas sin vaguadas/divisorias (formas exportadoras) indican que no existen diferencias significativas entre los grupos (Figura 10).

Tabla 6: Resultados de prueba U de Mann-Whitney, definiendo en Aurora el tipo de geoforma (vaguadas, formas importadoras y laderas/divisorias, formas exportadoras) como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	U de M-W	Sig
% Humedad	Importadoras	60	18,14	5,34	3472,500	0,699
	Exportadoras	115	19,47	10,23		
	Total	175	19,02	8,87		

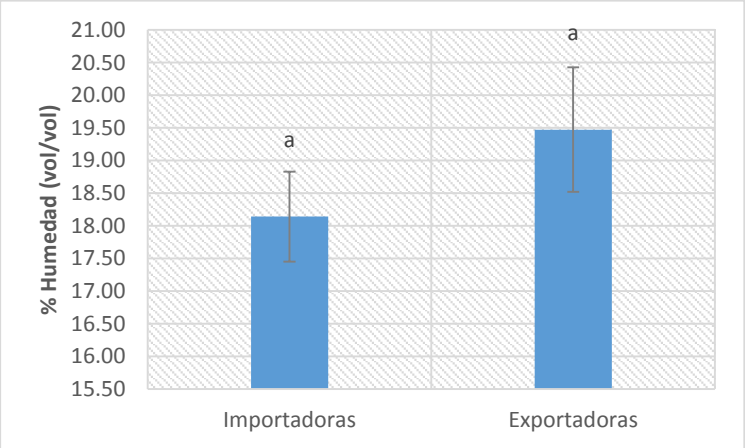


Figura 10. Medias de contenido de humedad en el sustrato durante el período de estudio en el conjunto de geoformas importadoras frente a las exportadoras en cantera Aurora

De igual modo, las formas de relieve de umbría (L3VU, L3DC y L3LU) presentan diferencias estadísticamente significativas frente a las de solana (L3LS y L3VS) (Tabla 7). Las geoformas de solana se mueven en valores medios de un 16,70% de humedad en volumen de sustrato frente al 20,19% de las geoformas de umbría (Figura 11).

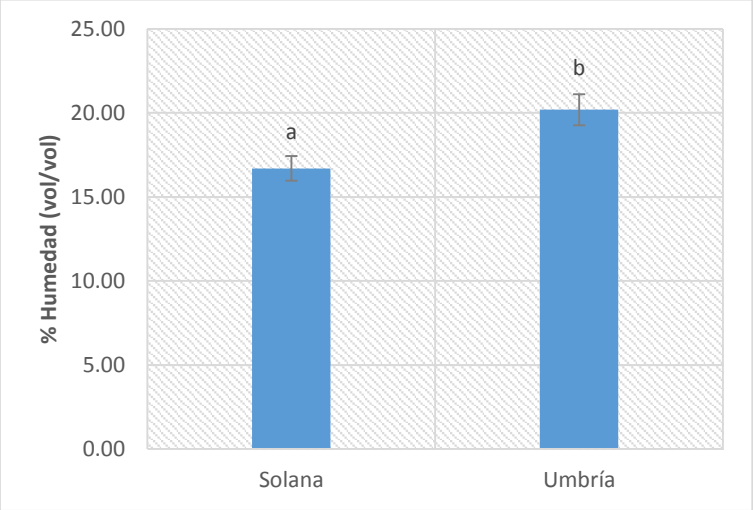


Figura 11. Medias de contenido de humedad en el sustrato durante el período de estudio en el conjunto de geoformas de solana frente a las de umbría en cantera Aurora

Tabla 7: Resultados de prueba U de Mann-Whitney, definiendo en Aurora la orientación (solana/umbría) como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	U de M-W	Sig
% Humedad	Solana	59	16,70	5,66	2460,000	**0,002**
	Umbría	116	20,19	9,94		
	Total	175	19,02	8,87		

Debe indicarse a este respecto que los valores resultantes del procedimiento de calibración no eran los apropiados para todas las unidades en el caso de Aurora. Esto se debe a que en las áreas de Canal Principal, el tipo de sustrato no era uno de los identificados inicialmente, sino que se trataba de un sustrato arcilloso donde la capa superficial de coluvión colocada como tierra vegetal había sido arrastrada, quedando a descubierto el suelo original de un carácter mucho más arcilloso e impermeable que en los alrededores por lo que sus resultados no se adecuaban a ninguna de las ecuaciones obtenidas mediante la calibración. Ello provocó que los datos del TDR en el canal fueran mucho mayores a los de cualquiera de los sustratos estudiados y su transformación a

porcentaje de humedad estuviera completamente fuera de rango (por encima de un 100% de agua en volumen). Por esto, sus valores no se incluyeron en las medias mostradas, si bien a modo estimativo se realizó el análisis estadístico de los datos directos de salida del TDR como complemento al análisis de los valores de porcentaje de humedad.

Así pues, la Tabla 8 muestra que existen diferencias estadísticamente significativas entre la señal del TDR que se recibe en los puntos de muestreo en el Canal Principal y los valores resultado en el resto de geoformas, apreciándose unos valores de salida en el TDR mucho mayores en el Canal Principal a los obtenidos en cualquier otra forma de relieve diseñada. De igual modo, en la Figura 12 pueden consultarse los valores medios de la señal directa obtenida con el TDR en todas las geoformas de estudio en Aurora. Los resultados completos de los muestreos pueden consultarse en el apartado Anejos en sus Tablas 2, 3, 4 y 5.

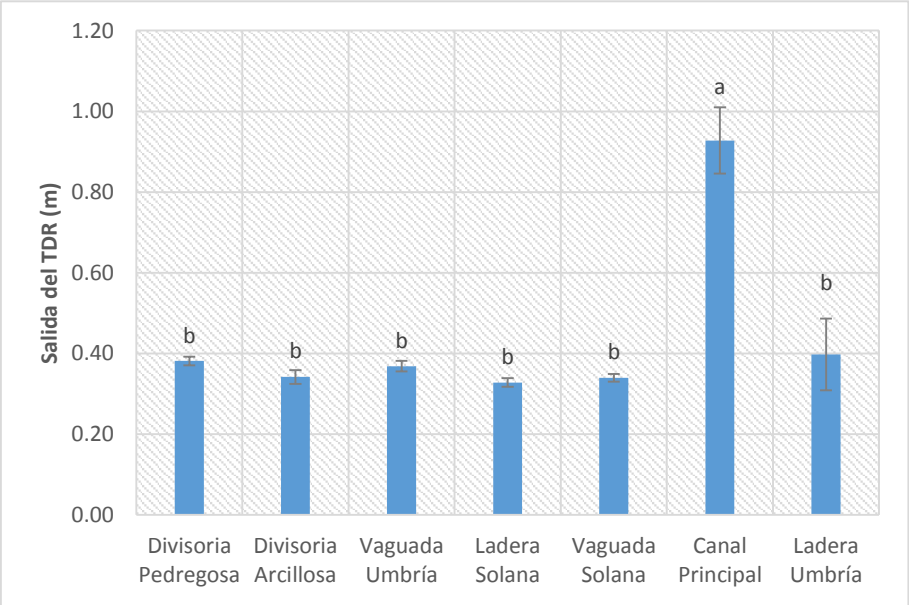


Figura 12. Valores medios de señal de salida del TDR en Aurora durante el tiempo de estudio incluyendo el Canal Principal

Tabla 8: Resultados de prueba U de Mann-Whitney entre valores de TDR tomados en el Canal Principal y el resto unidades en Aurora. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Forma	Forma	U de M-W	Sig
L3C	L3DA	15,500	**0,000**
	L3LS	0,000	**0,000**
	L3VS	0,000	**0,000**
	L3LU	23,000	**0,000**
	L3DC	3,000	**0,000**
	L3VU	0,000	**0,000**
	L3C2	328,000	0,549
L3C2	L3DA	16,000	**0,000**
	L3LS	0,000	**0,000**
	L3VS	0,000	**0,000**
	L3LU	26,500	**0,000**
	L3DC	1,500	**0,000**
	L3VU	0,000	**0,000**
	L3C	328,000	0,549

En lo referente al tipo de sustrato, los resultados permiten comprobar que las unidades pertenecientes al tipo de sustrato con estéril arcilloso presentan diferencias estadísticamente significativas respecto a las del sustrato con coluvión (Tabla 9) en lo que respecta al porcentaje de humedad medido en los primeros 20 cm, presentando este último sustrato un contenido de humedad de 19,71% frente al 18,65% del sustrato arcilloso. (Figura 13)

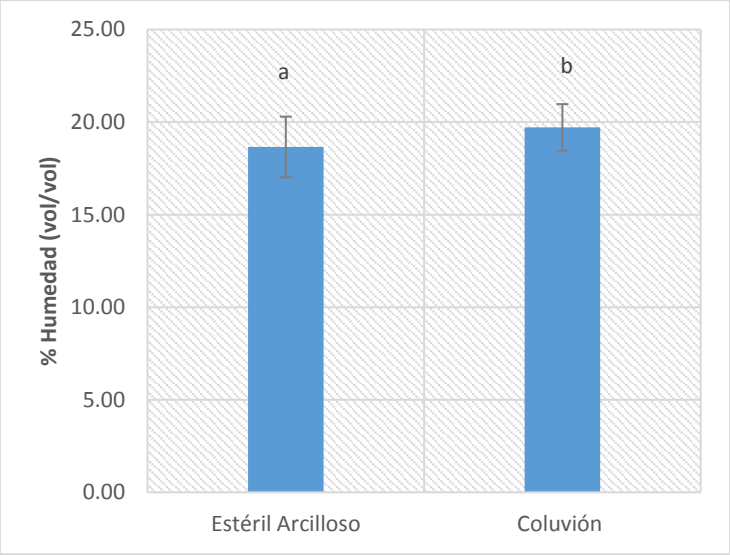


Figura 13. Contenido medio de la humedad en los dos sustratos de cantera Aurora durante el tiempo de estudio

Tabla 9: Resultados de prueba U de Mann-Whitney, definiendo en Aurora el tipo de sustrato como factor de agrupación y la variable % de Humedad por medida (Volumen/Volumen) como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	U de M-W	Sig
% Humedad	Sustrato Estéril Arcilloso	115	18,65	10,32	2528,000	**0,004**
	Sustrato Coluvión	60	19,71	5,01		
	Total	175	19,02	8,87		

3.3.- Contenido de humedad en cantera el Machorro

Los resultados del test ANOVA aplicado a las diversas unidades ambientales resultantes del método GeoFluv™ (Tabla 10) indican la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos. Los resultados completos del análisis entre las diferentes parejas de grupos pueden consultarse en el apartado Anejos en la Tabla 24. Los valores máximos de contenido de humedad durante el período de estudio los presentan el Canal Principal y la Vaguada Este sobre el sustrato de tierra vegetal con unos porcentajes de 25,14% y 25,54% de agua en volumen respectivamente, mientras que los valores mínimos aparecen en las unidades Divisoria Este y Divisoria Oeste en sustrato con Estéril Arenoso con registros de 17,82% y 18,63% (Figura 14).

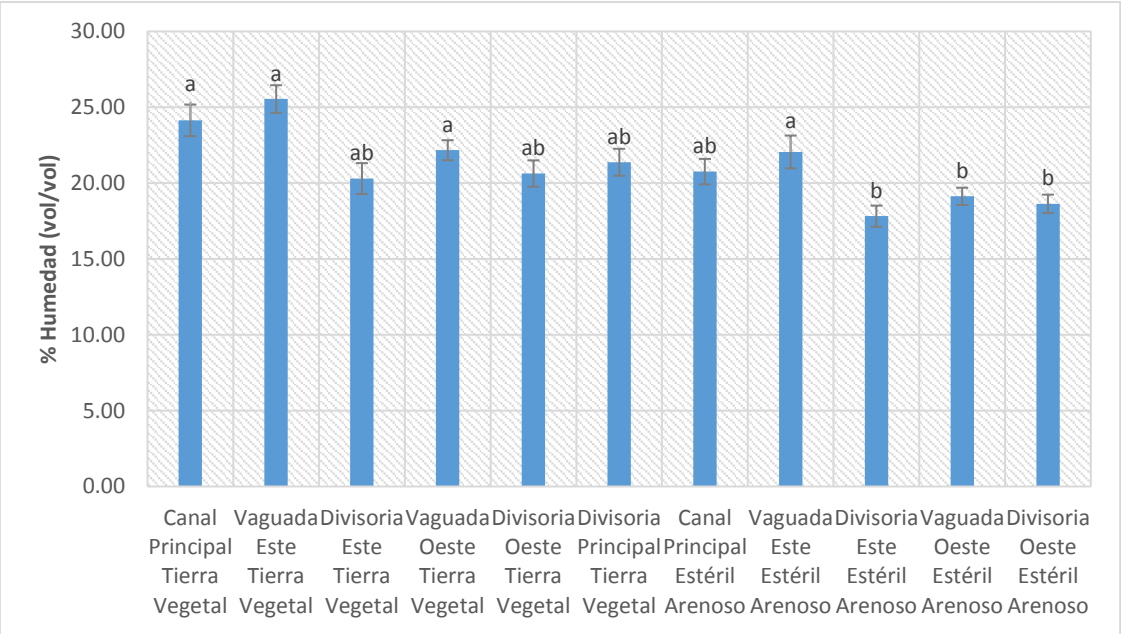


Figura 14. Medias de contenido de humedad durante el período de estudio en cada unidad ambiental en cantera el Machorro

Tabla 10: Resultados de test ANOVA definiendo en el Machorro la unidad ambiental como factor de agrupación y la variable % de Humedad por medida (Volumen/Volumen) como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	F	Sig
% Humedad	Canal Principal Tierra Vegetal (L1C)	22	24,13	4,89	7,541	**0,000**
	Vaguada Este Tierra Vegetal (L1VE)	24	25,54	4,44		
	Divisoria Este Tierra Vegetal (L1DE)	19	20,30	4,22		
	Vaguada Oeste Tierra Vegetal (L1VO)	24	22,17	3,24		
	Divisoria Oeste Tierra Vegetal (L1DO)	24	20,63	4,28		
	Divisoria Principal (DI)	24	21,37	4,38		
	Canal Secundario Estéril Arenoso (L2C)	22	20,76	3,93		
	Vaguada Este Estéril Arenoso (L2VE)	24	22,05	5,30		
	Divisoria Este Estéril Arenoso (L2DE)	24	17,82	3,43		
	Vaguada Oeste Estéril Arenoso (L2VO)	24	19,13	2,81		
	Divisoria Oeste Estéril Arenoso (L2DO)	23	18,63	2,94		
	Total	254	21,14	4,55		

Limitando el análisis a la comparación entre vaguadas y divisorias (Tabla 11), los resultados indican la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos presentando las vaguadas un porcentaje de humedad mayor (22,22% frente a 19,29%) (Figura 15).

Tabla 11: Resultados de test ANOVA, definiendo en el Machorro la forma vaguada/divisoria como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	F	Sig
% Humedad	Vaguada	96	22,22	4,60	21,844.	**0,000**
	Divisoria	90	19,29	3,86		
	Total	254	20,80	4,49		

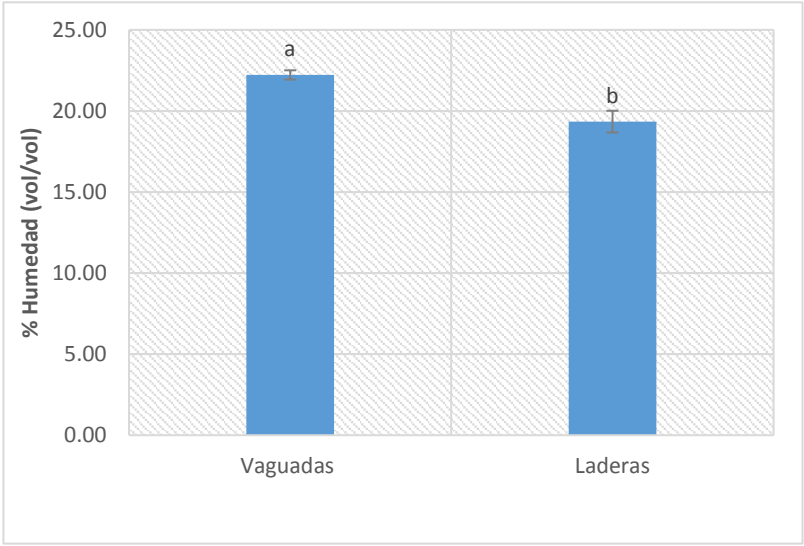


Figura 15. Medias de contenido de humedad durante el período de estudio en geoformas de Divisoria y de Vaguada en el Machorro

En lo referente al factor Orientación, la Tabla 12 muestra que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las formas de relieve orientadas al este y las orientadas al oeste con ambas orientaciones en valores oscilantes entre el 20% y el 21,5% de agua en volumen durante el tiempo de estudio (Figura 16). Respecto a este factor Orientación, debe explicarse que las unidades del sustrato con tierra vegetal orientadas al este se disponían sobre una zona de la cantera en la que se extendió una enmienda orgánica por lo que también se realizó el análisis solamente sobre este grupo que se corresponden con la cuenca del Canal Principal sin que aparecieran diferencias estadísticamente significativas. (Tabla 13)

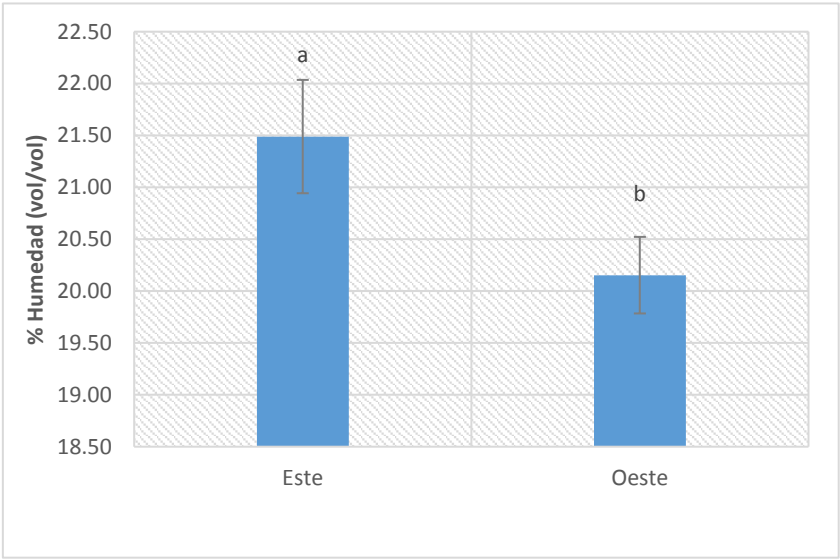


Figura 16. Medias de contenido de humedad durante el período de estudio en unidades orientadas al oeste y al este en el Machorro

Tabla 12: Resultados de prueba H de Kruskal-Wallis, definiendo en el Machorro la orientación (este/oeste) como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente. Los valores indefinidos en cuanto a su orientación (pertenecientes a la divisoria principal no se incluyen en el análisis). La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	H de K-W	Sig
% Humedad	Este	91	21,49	5,21	3823,00.	0,174
	Oeste	95	20,15	3,60		
	Otras (Divisoria Principal)	68	22,07	4,59		
	Total	254	21,14	4,55		

Tabla 13: Resultados de test ANOVA, definiendo en el Machorro la orientación (este/oeste) como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente solamente en la Cuenca Principal de sustrato con tierra vegetal arcillosa. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	F	Sig
% Humedad	Este	43	23,22	5,04	3,833	0,053
	Oeste	48	21,40	3,83		
	Total	91	22,26	4,52		

Adicionalmente, para la cantera el Machorro se procedió al análisis del factor altura del punto de muestreo, pues la zona de estudio presentaba una morfología acorde a la colocación de los puntos de muestreo en favor de la pendiente en cada una de las unidades generadas. Los resultados del análisis estadístico se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14: Resultados de test ANOVA definiendo la altura de punto de muestreo como factor de agrupación y la variable % de Humedad por medida (Volumen/Volumen) como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	F	Sig
% Humedad	Altura 3 (bajo)	85	22,04	3,71	3,514	**0,031**
	Altura 2 (medio)	82	21,14	4,68		
	Altura 1 (alto)	87	20,22	5,02		
	Total	254	21,14	4,55		

Los resultados del test ANOVA para el factor de agrupación altura de punto de muestreo demuestran la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes alturas. Apreciando las medias de los valores de humedad en cada altura de punto de muestreo, puede observarse cómo la humedad en el suelo va en aumento a favor de la pendiente presentando los puntos de muestreo con menor altura un contenido de humedad

mayor, con valores que aumentan desde una media de un 20% de humedad en los puntos más altos a en torno a un 22% en los más bajos.

Por otra parte, los resultados del test ANOVA (Tabla 15) demuestran la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los dos tipos de sustrato, con tierra vegetal de carácter arcilloso y con estéril arenoso, reconocidos en la cantera el Machorro que se corresponden con las cuencas asociadas al Canal Principal y Canal Secundario respectivamente. Puede apreciarse como la Cuenca Principal desarrollada en el sustrato con tierra vegetal presenta un porcentaje de humedad en los primeros 20 cm mayor a la Cuenca Secundaria con estéril arenoso aventajándola en casi 3 puntos porcentuales (22,41% frente a 19,67%). (Figura 17)

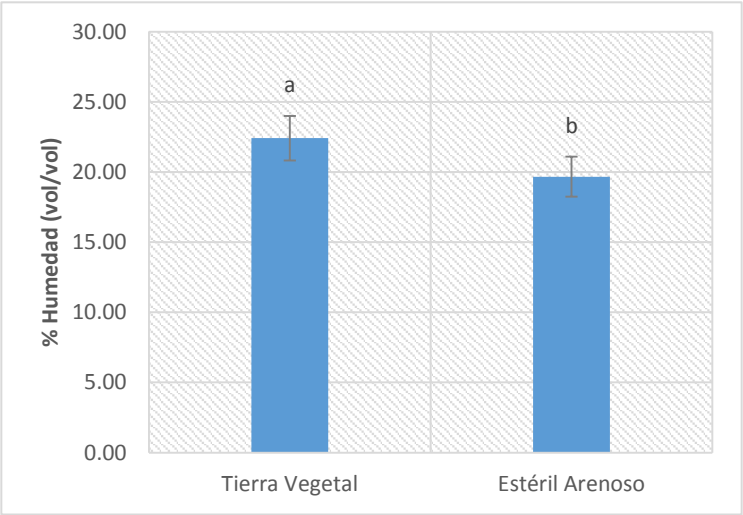


Figura 17. Contenido medio de la humedad en los dos sustratos de cantera el Machorro durante el tiempo de estudio

Tabla 15: Resultados de test ANOVA definiendo en el Machorro el tipo de sustrato como factor de agrupación y la variable % de Humedad por medida (Volumen/Volumen) como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	F	Sig
% Humedad	Sustrato Tierra Vegetal (Cuenca principal)	137	22,41	4,59	25,073	**0,000**
	Sustrato Estéril Arenoso (Cuenca secundaria)	117	19,67	4,03		
	Total	254	21,14	4,55		

3.4.- Comparación entre canteras Aurora y el Machorro

Los valores medios mensuales en ambas zonas de estudio son mayores en la cantera el Machorro, presentándose los valores máximos de humedad en los muestreos

de final de febrero y principios de mayo (Tabla 17). Asimismo, la cantera el Machorro presenta diferencias estadísticamente significativas frente a la cantera Aurora (Tabla 16), siendo la humedad media en el Machorro de 21,14% y en Aurora de 19,02% durante el tiempo de estudio.

Tabla 16: Resultados de prueba U de Mann-Whitney, definiendo la cantera como factor de agrupación y la variable % de Humedad por medida (Volumen/Volumen) como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	U de M-W	Sig
% Humedad	Cantera el Machorro	254	21,14	4,55	14776,000	**0,000**
	Cantera Aurora	175	19,02	8,87		
	Total	434	20,04	7,03		

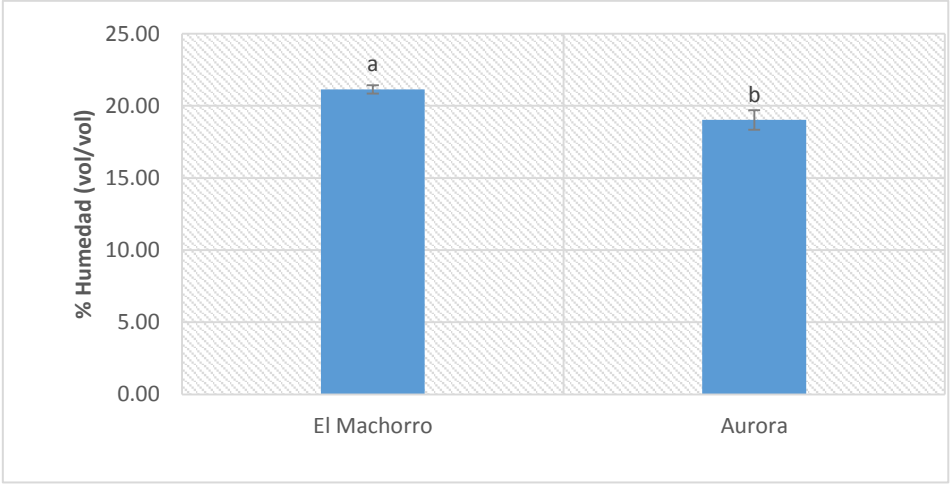
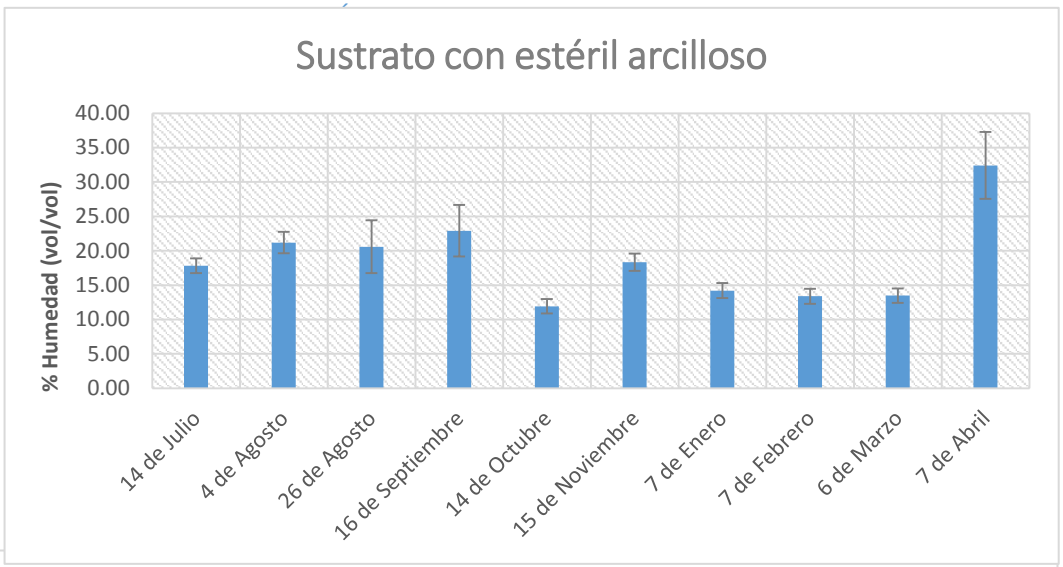
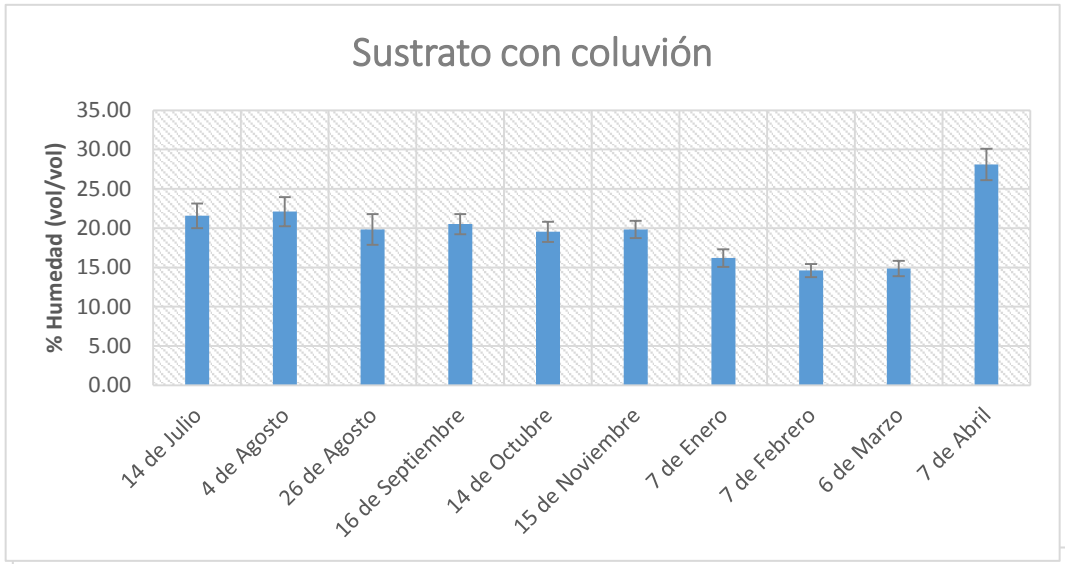


Figura 18. Contenido medio de la humedad en las dos canteras durante el tiempo de estudio

En la serie de figuras (Figuras 19-22) puede apreciarse la evolución mensual del porcentaje de humedad para los primeros 20 cm de suelo en cada tipo de sustrato para cada cantera de estudio.





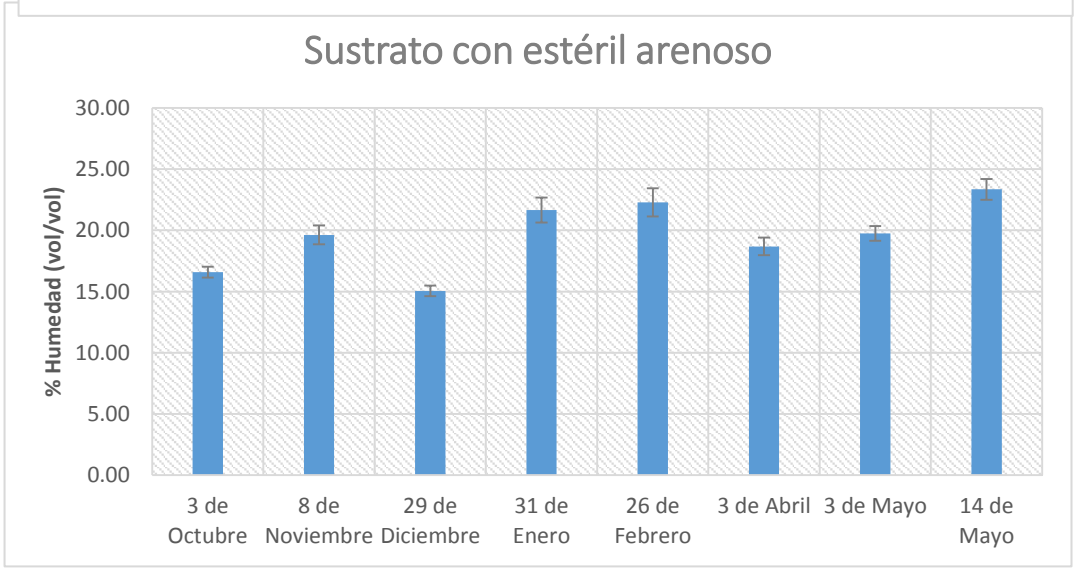


Figura 21. Evolución de la humedad del sustrato con estéril arenoso de cantera el Machorro

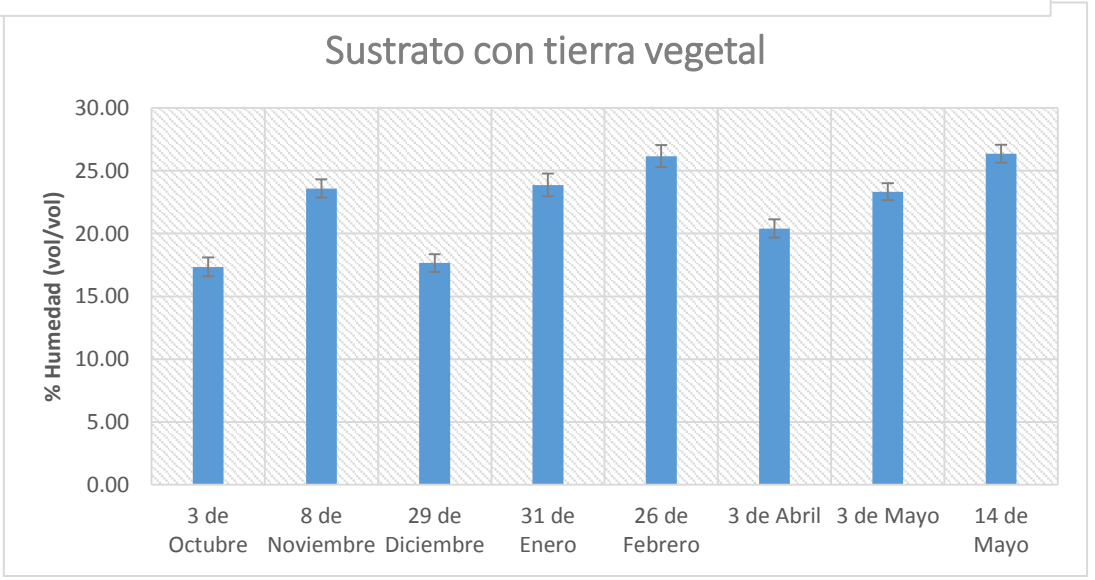


Figura 22. Evolución de la humedad del sustrato con tierra vegetal de cantera el Machorro

Por otra parte, en el Machorro puede apreciarse que los valores de precipitación acumulada más altos entre muestreos (Tabla 17) ocurridos tras los meses lluviosos de febrero y abril (120 y 135 mm de precipitación) se corresponden con las medias más altas de humedad tanto generales, en torno al 24% frente a la media del total del estudio del 21%, como entre tipos de geoformas generadas (Divisorias/Laderas sin vaguadas, Vaguadas y Canal Principal), constando además una mayor humedad en el Canal Principal y las Vaguadas que en las Divisorias y formas de ladera sin vaguadas (Figura 23).

Tabla 17: Datos de precipitación acumulada e intensidad máxima de precipitación entre muestreos en cantera el Machorro

Lluvia (mm)	Intensidad Máxima (mm)	Nº Eventos	Humedad Media	Vaguadas	Laderas	Canal Principal	Muestreo
21.2	7.8	11	17.01	18.04	15.44	17.87	3 de Octubre
73.4	23.4	24	21.68	22.74	20.68	20.17	8 de Noviembre
13	3.4	16	16.40	17.51	15.06	17.15	29 de Diciembre
133.6	41	26	22.87	24.82	20.57	23.76	31 de Enero
119.8	28.6	17	24.40	25.65	21.72	25.94	26 de Febrero
50.8	16.8	22	19.62	20.58	17.82	21.99	3 de Abril
135.6	34	15	21.71	22.39	19.90	23.49	3 de Mayo
70	11.8	11	24.99	26.03	22.93	26.68	24 de Mayo

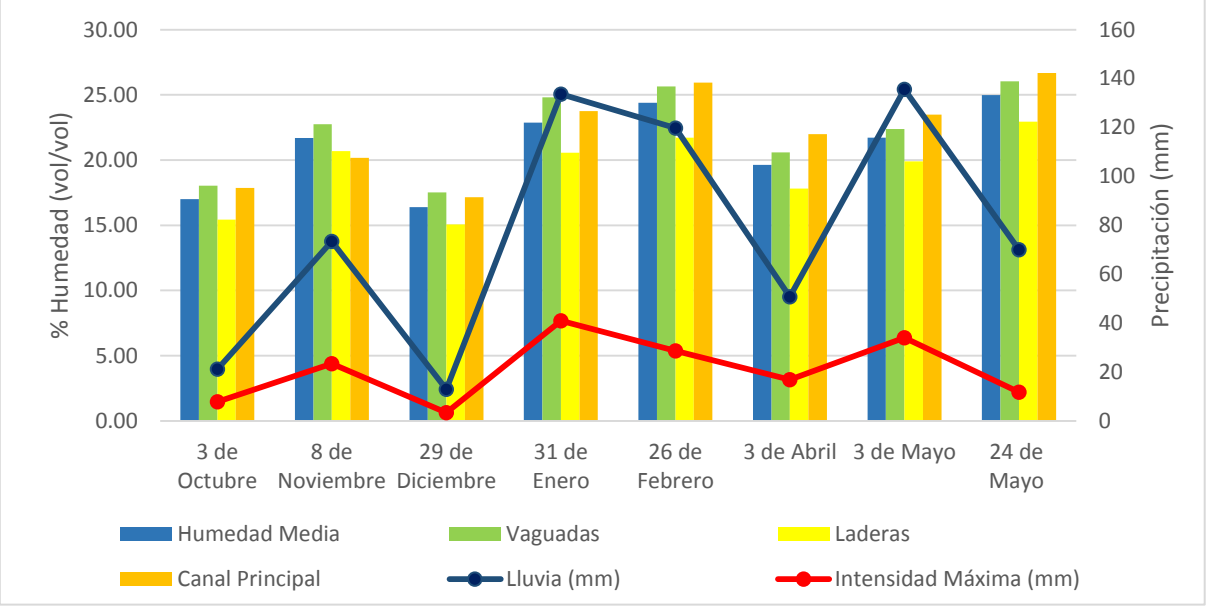


Figura 23. Medias de humedad en cantera el Machorro durante el tiempo de estudio (Eje Principal) frente a precipitación acumulada y evento de intensidad máxima entre muestreos (Eje Secundario)

Mientras, en Aurora (Tabla 18) los datos de Canal Principal no se incluyen en el análisis y la importante sequía de final del año 2015 y principios de 2016 con lluvias poco

superiores a los 0 mm es apreciable en los bajos valores de la humedad del sustrato en los muestreos de principios de enero y de febrero en todas las unidades con valores de humedad de un 15%, observándose igualmente el hecho de que el mes lluvioso de abril tras la sequía presente con clara diferencia los valores de humedad más altos en el sustrato con valores medios de en torno al 30% de agua en volumen frente a los valores medios del resto de muestreos del estudio que bordean el 17%. (Figura 24).

Tabla 18: Datos de precipitación acumulada e intensidad máxima de precipitación entre muestreos en cantera Aurora

Lluvia (mm)	Intensidad Máxima (mm)	Nº Eventos	Humedad Media	Vaguadas	Laderas	Muestreo
20.2	19.2	2	19.42	19.64	19.25	14 de Julio
46.8	38.4	6	21.49	21.02	21.72	4 de Agosto
7.4	5	2	20.34	18.88	21.07	28 de Agosto
42.8	18.4	7	22.11	19.93	23.19	16 de Septiembre
11.4	7	6	14.45	14.99	14.18	14 de Octubre
63.6	55.4	5	18.87	18.42	19.12	15 de Noviembre
4.6	3.8	2	14.87	14.94	14.84	7 de Enero
2	1	4	13.79	12.98	14.19	7 de Febrero
21.4	14	6	13.94	13.27	14.27	6 de Marzo
52.2	10.4	7	30.97	27.33	32.79	7 de Abril

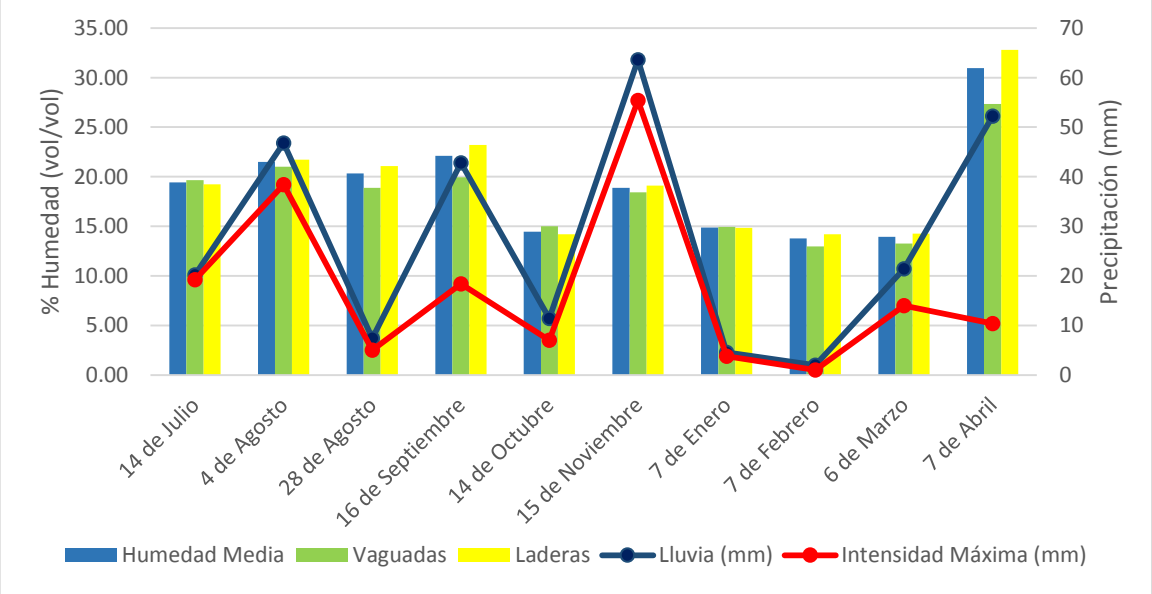


Figura 24. Medias de humedad en cantera Aurora durante el tiempo de estudio (Eje Principal) frente a precipitación acumulada y evento de intensidad máxima entre muestreos (Eje Secundario)

DISCUSIÓN

4.- DISCUSIÓN

4.1.- Contenido de humedad

4.1.1.- Cantera Aurora

Los resultados señalan la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los dos sustratos analizados. El sustrato con estéril arcilloso presenta contenidos de humedad menores, con mayor tendencia a permitir que el agua fluya antes de poder infiltrarse en un efecto favorecido además en las zonas de solana por el aumento de la evaporación. Siguiendo el dato anterior, las unidades pertenecientes al tipo de sustrato de estéril arcilloso (L3DA, L3LS, L3VS) presentan diferencias estadísticamente significativas respecto a las unidades con coluvión (L3DC, L3VU) en lo referente al contenido de humedad medido en los primeros 20 cm presentándose en éstas un porcentaje de humedad mayor. Es conocido el comportamiento hídrico de los sustratos con una cierta pedregosidad como el coluvión para, una vez infiltrada el agua, evitar las pérdidas por evaporación conservando la humedad. De hecho, es recomendable su utilización como sustrato en la restauración de canteras en climas con déficit hídrico ya que, por un lado la pedregosidad favorece la infiltración de la escorrentía superficial y por otro, reduce la pérdida de agua por evaporación y tiene un efecto protector frente a la erosión. Su escasez en materia orgánica puede compensarse, pues ésta puede incorporarse mediante la revegetación.

El caso particular de la Ladera de Umbría (L3LU), de sustrato con estéril arcilloso pero con porcentaje de humedad elevado, puede deberse a que recibe la escorrentía que discurre en la unidad inmediatamente superior, Divisoria Arcillosa (L3DA), en su camino al Canal Principal lo que favorece en su caso una mayor concentración de agua, circunstancia incrementada por la condición de umbría casi permanente que experimenta. Se trata de una característica estudiada por otros autores (Nicolau *et al.*, 2013) en restauración convencional, la importancia de la entrada de agua exógena a los taludes desde las cabeceras, que se ve amplificada cuanto mayor es el ancho de estas cabeceras (en restauración convencional en forma de bermas o cunetas) provocando un aumento de la humedad en el relieve inferior. Las diferencias concretas entre pares de unidades pueden consultarse en la Tabla 11 y 12 del apartado Anejos.

Por último, el análisis de la Tabla 8 del apartado Resultados permite comprobar cómo los valores de la señal del TDR en el Canal Principal son muy superiores a los obtenidos en

el resto de geoformas. Como era previsible, la humedad se concentra en los canales incrementándose aguas abajo. Ello tiene consecuencias importantes de cara a la revegetación, pues la mayor disponibilidad de agua en los canales puede permitir la implantación de especies con un cierto carácter freatófito. Esta implantación debería realizarse en los bordes de los canales y no en sus fondos, para evitar la intensa erosión, mayor aún en este ambiente proclive a eventos de torrencialidad permitiendo que las raíces puedan aprovechar la humedad del cauce sin sufrir el efecto nocivo de la erosión en los fondos. Este resultado, no definitivo a nivel de valores reales de humedad en el sustrato resulta en una estimación coherente con el tipo de geomorfología diseñada, pues los datos del TDR, y en consecuencia el porcentaje de humedad en el suelo, en el Canal Principal deben ser mayores a los presentes en otras formas de relieve.

Del análisis de los resultados puede concluirse que en el área estudiada, el factor sustrato, responsable de la infiltración inicial resulta determinante en el porcentaje de humedad en los primeros 20 cm pues debido al carácter superficial ligeramente impermeable del sustrato estéril arcilloso, en sus unidades ambientales el agua discurre por la superficie con limitaciones para infiltrarse, mientras que en las unidades de sustrato con coluvión de cierta pedregosidad, esta primera infiltración está facilitada, circunstancia que se refuerza por la capacidad del coluvión de mantener el agua una vez se ha infiltrado reduciendo la evaporación. Puede añadirse además, que en el caso de la cantera Aurora las geoformas de vaguada no presentan contenidos de humedad mayores a las geoformas de divisoria y ladera en general debido a esta primera dificultad para la infiltración del agua en el suelo y al hecho de que el espacio de estudio es de pequeño tamaño y las formas de ladera/divisoria y vaguada no son especialmente pronunciadas manteniéndose el tipo de geoforma en un plano secundario en importancia frente al tipo de sustrato. En todo caso, las geoformas facilitan la llegada del agua de escorrentía al Canal Principal evitando la formación de regueros de calibre importante.

De igual modo, el análisis de las precipitaciones acumuladas y los eventos de intensidad máxima muestran el carácter ligeramente torrencial de las lluvias de la zona de estudio con épocas de marcada sequía estacional y pocos episodios de lluvia cada mes pero momentos puntuales de intensidad lo que es responsable del contraste entre los valores en el Canal Principal y el resto de geoformas. Este conjunto de circunstancias conlleva que, a la hora de plantear las labores de revegetación, el agua deba valorarse como un

factor limitante a considerar junto al tipo de sustrato y las geoformas planificando riegos de apoyo en épocas de sequía.

4.1.2.- Cantera el Machorro

Los resultados del test ANOVA (Tabla 15 del apartado Resultados) demuestran la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los dos tipos de sustrato, tierra vegetal de carácter arcilloso y estéril arenoso, reconocidos en la cantera el Machorro que se corresponden con las cuencas asociadas al Canal Principal y Canal Secundario respectivamente. Puede apreciarse como la Cuenca Principal de un carácter arcilloso presenta un porcentaje de humedad en los primeros 20 cm mayor a la Cuenca Secundaria arenosa. Es bien sabido que la capacidad de retención de agua de los sustratos con granulometrías gruesas –arenosas- es reducida.

El análisis entre parejas de unidades muestra que las diferencias estadísticamente significativas se dan de forma esporádica entre ciertas vaguadas y laderas sin responder a un patrón concreto que permita agruparlas en su pertenencia a un tipo de sustrato o su orientación, no obstante, como conjunto se da una mayor humedad en las vaguadas frente a las laderas. Se da en el contexto general de la explotación una distribución espacial bastante homogénea de la humedad. Siguiendo este razonamiento, la Tabla 12 en apartado Resultados mostraba que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las unidades orientadas al este y las del oeste. Como ya se citó, en el caso de la Cuenca Principal, todas las unidades se encuentran sobre sustrato con tierra vegetal de carácter arcilloso, sin embargo, las orientadas al este se sitúan en una zona de la cantera sobre la que se distribuyó una enmienda orgánica superficial, que podría afectar a las posibilidades de germinación y favorecer la cobertura vegetal variando la cantidad de agua presente en el sustrato. Los datos de la Tabla 13 del apartado Resultados muestran que, si bien el valor resultado del análisis se encuentra bordeando el límite de la significación, no existen diferencias estadísticamente significativas entre las unidades orientadas al este (con enmienda orgánica) y las orientadas al oeste (sin enmienda orgánica) pertenecientes a la Cuenca Principal de sustrato con tierra vegetal , por lo que la enmienda orgánica no viene afectando a la capacidad de infiltración del agua en el sustrato, debido a que durante el tiempo de estudio la siembra y plantación realizadas han tenido una efectividad de germinación pareja en ambas zonas (con y sin enmienda orgánica) y la cobertura vegetal es similar en ambos espacios, siendo la infiltración similar en uno y otro.

Del análisis de los resultados puede concluirse que en el área estudiada, el factor sustrato tiene una importancia relevante en el contenido de humedad en los primeros 20 cm, permitiendo a las unidades de la Cuenca Principal situadas sobre un sustrato con tierra vegetal de granulometría arcillosa mantener un porcentaje de humedad mayor. Asimismo, pese a que a diferencia de la cantera Aurora donde las limitaciones de espacio no permiten la definición total de las geoformas, en el Machorro las formas de relieve generadas son muy pronunciadas, las diferencias entre las distintas geoformas no presenta un patrón en cuanto a los contrastes entre vaguadas y divisorias, si bien las vaguadas presentan como conjunto mayor humedad que las divisorias, siendo el tipo de sustrato el factor preponderante, dándose en todo caso el hecho de que los puntos más altos de muestreo (los más cercanos a la cabecera de la ladera) muestran valores de humedad menores a los encontrados en los puntos bajos a favor de la pendiente y en los canales, ejemplo de la capacidad de GeoFluv^{TM} para reproducir relieves naturales donde el agua discurra (ya sea en superficie o tras infiltración) hacia los fondos. Del mismo modo, el análisis de las precipitaciones durante el tiempo de estudio permite constatar el carácter más o menos firme de las lluvias durante el año que posibilita una distribución homogénea del agua por toda la superficie del sustrato evitándose episodios torrenciales como los observados en Aurora al tiempo que el tamaño de las laderas concede mayor oferta de espacio para la infiltración del agua antes de llegar a los canales principales sin que se produzca gran escorrentía que genere redes de regueros, por lo que la disponibilidad de agua deja ser un factor limitante a la hora de plantear una revegetación. En el caso de el Machorro, los períodos de primavera y otoño disponen de la cantidad de agua necesaria para el establecimiento de la comunidad vegetal, si bien el frío de invierno impide el desarrollo durante esta parte del año por lo que quizá la época de primavera resulta óptima para las acciones de siembra y plantación permitiendo a las plantas el suficiente crecimiento y desarrollo radicular como para aguantar las bajas temperaturas invernales.

4.2.- El modelado GeoFluv^{TM} en relación al modelado topográfico convencional

En los procedimientos de restauración minera convencional, las morfologías talud-berma, especialmente en climas secos, acaban siendo fallidas a causa de la acción erosiva de la escorrentía que limita el desarrollo del suelo y la vegetación. Bajo esta perspectiva, la restauración ha de basarse en la integración de tres componentes básicos: la construcción de un relieve estable, el desarrollo de un suelo funcional y el establecimiento de comunidades vegetales (Nicolau, 2003). Una forma eficiente de llevar

a cabo esta metodología consiste en la restitución de un ecosistema en el que se mantenga la escorrentía controlada.

La interacción de la escorrentía superficial en restauración convencional como proceso hidrológico ha venido estudiándose en zonas como el Moral (Utrillas, Teruel) gracias a un conjunto de laderas de características similares diferenciadas exclusivamente en el volumen de escorrentía generado en su cabecera causa del funcionamiento de las cunetas y bermas de su parte superior (Nicolau *et al*., 2013). Sobre estas laderas se identificaban tres tipos de trayectorias de evolución eco-hidrológica: a) laderas con densas redes de regueros en las que la sucesión ecológica se encuentra bloqueada; b) laderas con regueros discontinuos y zonas inter-regueros donde se han desarrollado comunidades vegetales herbáceas en manchas discontinuas; c) laderas sin geoformas asociadas a procesos de erosión en las que se produce el establecimiento de matorrales facilitadores que favorecen el establecimiento y la sucesión. Moreno-de las Heras (2009) señalaba cómo en las condiciones de el Moral, unos niveles superiores al 50% de cobertura vegetal y tasas de erosión en regueros inferiores a 5 T/ha·año conducirían a una cubierta vegetal continua a partir de una primera matorralización. En base a esto, las morfologías provocadas por el control incorrecto de la escorrentía que genera redes de regueros en restauraciones convencionales, especialmente cuando las cunetas y bermas superiores son de gran tamaño, contribuyen a evacuar el agua de las laderas, a distribuir la humedad de forma ineficiente y dificultan el establecimiento de la comunidad vegetal en un proceso que se retroalimenta resultado de la acumulación del agua en los regueros donde las posibilidades de crecimiento son escasas y su salida de la ladera que provoca aridez en el terreno.

En el caso de las canteras analizadas, la cobertura vegetal durante el tiempo de estudio era todavía escasa al haberse finalizado recientemente las tareas de restauración geomorfológica, por lo que en condiciones similares a las de una restauración convencional, el riesgo del avance de la erosión y la generación de redes de regueros e incluso cárcavas es alto. Bajo esta perspectiva, el método GeoFluv^{TM}, si bien las características de las canteras analizadas difieren en cuanto a clima y tipos de sustrato a las de los estudios mencionados, ha proporcionado un relieve en el que la humedad en el suelo se reparte de una forma más homogénea a lo visto mediante la metodología convencional, especialmente en el caso de el Machorro aunque la cobertura vegetal no sea mayor al 30%. Se evita de este modo la pérdida de agua asociada a la metodología

talud-berma donde la disponibilidad de agua es muy diferente en la cabecera de las laderas y en los pies de las mismas.

Las formas de relieve generadas permiten que el tipo de sustrato se manifieste como el factor fundamental que condiciona el recurso de agua facilitando los primeros estadíos de la sucesión ecológica al tiempo que la morfología evita que se formen amplias redes de regueros. Puede observarse que en los momentos de mayor precipitación acumulada entre muestreos, el agua fluye hacia los canales principales en un efecto más notable en Aurora que en el Machorro sin generarse formas erosivas reseñables.

En las canteras analizadas, la homogeneidad es patente siendo además las diferencias entre geoformas de vaguada/ladera/divisoria, que actúan como zonas de transición del agua hacia los canales principales, frente a los canales menores en el Machorro. La explicación reside en que en la cantera Aurora, la infiltración tras lluvia es relativamente pequeña en comparación con la escorrentía y el Canal Principal recoge mayor volumen de agua que en el Machorro, donde probablemente una buena parte del agua de lluvia caída se infiltra antes de llegar a estos canales. Igualmente, debe considerarse que la distancia de las laderas a los canales principales es mayor en el Machorro maximizando el tiempo para la infiltración. Asimismo, la influencia del clima permite que nos encontremos con un ambiente en Aurora más proclive a episodios torrenciales en momentos concretos del año y poca precipitación durante el resto del tiempo que favorece estas diferencias, mientras que en el Machorro el clima mediterráneo-continental viene asociado a un régimen de lluvias firme durante el año.

CONCLUSIONES

5.- CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos durante este Trabajo Fin de Master en las canteras el Machorro y Aurora, puede concluirse que:

- GeoFluv^{TM} ha demostrado ser una metodología eficiente a la hora de distribuir el agua de manera uniforme por la superficie diseñada, permitiendo su circulación desde formas de ladera en vaguada o divisoria a formas de canal evitando la generación de redes de regueros.
- Las geomorfologías diseñadas han permitido reducir el impacto de las pendientes en la pérdida de agua en las laderas permitiendo que el factor sustrato sea determinante en la capacidad de infiltración del agua en el suelo por su granulometría, presentándose en el Machorro sustratos arcillosos con porcentajes de humedad mayores a los arenosos y afectando al mantenimiento de la humedad en Aurora en el caso del sustrato con coluvión.
- En ambos casos, el tipo de sustrato ha resultado más determinante que la distinción de geoformas de divisoria y vaguada en el contenido de humedad, si bien los canales principales muestran en todo caso contenidos de humedad mayores a ambas zonas de transición.
- El régimen de precipitaciones es fundamental a la hora de entender las diferencias entre los valores de ladera y canal en ambas canteras. El régimen de lluvias de el Machorro de menor intensidad y más constante durante el año permite una distribución homogénea del agua por la superficie, mientras el régimen de Aurora propenso a eventos torrenciales y episodios prolongados de sequía genera gran cantidad de escorrentía hacia los canales en momentos puntuales.
- A la hora de plantear la revegetación, la disponibilidad de agua en Aurora resultaría en un factor limitante a considerar junto al tipo de sustrato mientras que en el Machorro esta circunstancia no es un problema, si bien deben tenerse en cuenta las bajas temperaturas invernales.
- El procedimiento de calibración del TDR en los diferentes sustratos estudiados permitirá facilitar la realización del seguimiento del contenido de humedad en el suelo en Aurora y el Machorro en años venideros.

BIBLIOGRAFÍA

6.- BIBLIOGRAFÍA

- BALAGUER, L., ESCUDERO, A., MARTÍN DUQUE, J.F., MOLA, I., ARONSON, J., 2014. *The historical reference in restoration ecology: Re-defining a conrnerstone concept.* Biological conservation 176, 12-20
- BODOQUE, J.M., LUCÍA, A., BALLESTERO, J.A., MARTÍN DUQUE, J.F., RUBIALES, JM., GENOVA, M., 2011. *Measuring médium-term sheet erosion in gullies from tres: A case study using dendrogeomorphological analysis of exposed pine roots in central Iberia.* Geomorphology 134, 417-425
- CEMEX ESPAÑA S.A., UNIVERSIDAD DE BARCELONA, UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, 2012. *Proyecto LIFE12 Ecorestclay. Holistic Ecological Restoration of a mining area in Tarragona (Spain) with seven clay Quarries.*
- CERDA, A., IBÁÑEZ, S., CALVO, A., *Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain.* Soil Technology 11, 163-170
- ESPIGARES, T., MERINO-MARTÍN, L., MORENO-DE LAS HERAS, M., OCLAU, J.M., 2013. *Intensity of ecohydrological interactions in reclaimed Mediterranean slopes: effects of run-off redistribution on plants performance.* Ecohydrology 6, 836-844
- GRAFF, W., 1977. *The rate law in fluvial geomorphology.* American Journal of Science 27, 178-191
- HERNANDO, N., MARTÍN-MORENO, C., SÁNCHEZ, L., MARTÍN DUQUE, J.F., SANZ, M.A., NICOLAU, J.M., 2009. *Hacia una minería sostenible en el entorno del Parque Natural del Alto Tajo. La escombrera experimental de la mina El Machorro (Poveda de la Sierra, Guadalajara).* Congreso de Minería Sostenible 2009, 17 pp
- HOOKE, R., MARTÍN DUQUE, J.F., PEDRAZA, J., 2012. *Land transformation by humans. A review.* GSA Today, Vol. 22, Number 12, 4-10
- LUCIA, A., SANZ, M.A., MARTÍN, J.F., VICENTE, F., BODOQUE, J.M., PEDRAZA, J., LÓPEZ, N., 2007. *A proposal to study gully erosiono n silica sand and arkose slopes in central Spain*. IV International Symposium on Gully Erosion. Universidad Pública de Navarra, 6 pp
- 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™ 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, Departmen of Interior, United States, 14 pp

- MARTÍN DUQUE, J.F., MARTÍN MORENO, C., NICOLAU, J.M., SANZ, M.A., LUCÍA, A., 2009. *Impacto hidrogeomorfológico de las minas y escombreras de Peñalén (Guadalajara) sobre el Parque Natural del Alto Tajo.* Revista C & G, 23, 27-44
- MARTÍN DUQUE, J.F., ZAPICO, I., OYARZUN, R., LÓPEZ GARCÍA, J.A., CUBAS, P., 2015. *A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain.* Geomorphology 239, 1-16
- MARTÍN MORENO, C., 2013. *Cuantificación de la producción de sedimentos en la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo. Tesis Doctoral.* Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 379 pp
- MARTÍN-MORENO, C., FIDALGO, C., MARTÍN-DUQUE, J.F., GONZÁLEZ MARTÍN, J.A., ZAPICO, I., LARONNE, J.B., 2014. *The Ribagorda sand gully (east-central Spain): Sediment yield and human-induced origin.* Geomorphology 224, 122-138
- MARTÍN-MORENO, C., MARTÍN DUQUE, J.F., NICOLAU, J.M., HERNANDO, N., SANZ, M.A., SÁNCHEZ, L., 2013. *Effects of topography surface soil cover on erosion for mining reclamation: The experimental spoil heap at el Machorro Mine (Central Spain).* Land Degradation & Development, 15 pp
- MARTÍN MORENO, C., ZAPICO, I., NICOLAU, J.M., MARTÍN DUQUE, J.F., LUCÍA, A., SANZ, M.A., 2008. *Geomorfología y gestión del Parque Natural del Alto Tajo. Estimación de la emisión de sedimentos de la cuenca del arroyo Peñalén mediante RUSLE 1.06.* Trabajos de Geomorfología en España, 2006-2008. 4 pp
- MERINO, L., MORENO-DE LAS HERAS, M., DOMINGO, S., ESPIGARES, T., NICOLAU, J.M., 2012. *Hydrological heterogeneity in Mediterranean reclaimed slopes:runoff and sediment yield at the patch and slope scales along gradient of overland flow.* Hydrology and Earth System Sciences 16, 1305-1320

- MERINO, L., MORENO-DE LAS HERAS, M., ESPIGARES, T., NICOLAU, J.M., 2015. *Overland flow directs soil moisture and ecosystem processes at patch scale in Mediterranean restored hillslopes.* Catena 133, 71-84
- MORENO-DE LAS HERAS, M., MERINO-MARTÍN, L., NICOLAU, J.M., 2009. *Effect of vegetation cover on the hidrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-Continental climate.* Catena 77, 39-47
- MORENO-DE LAS HERAS, M., ESPIGARES, T., MERINO-MARTÍN, M., NICOLAU, J.M., 2011. *Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes.* Catena 84, 114-124
- NICOLAU, J.M., 2003. *Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation.* Land degradation and development 14, 215-226
- NICOLAU, J.M., 2013. *Bases eco-hidrológicas para aplicar la restauración ecológica en minería.* Restauración Ecológica de Espacios Degradados, Jornadas Científico-Técnicas de Restauración Ecológica de Espacios Degradados por la Minería, 2012, 18 pp
- ORTEGA, A., 2015. *Respuesta erosiva de una restauración geomorfológica en la zona minera del entorno del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara, España).* Trabajo Fin Máster, Universidad de Alcalá/Universidad Complutense de Madrid, 42 pp
- SANZ, M.A., MARTÍN DUQUE, J.F., MARTÍN MORENO, A., LUCÍA, A., NICOLAU, J.M., PEDRAZA, J., SÁNCHEZ, L., RUIZ, R., GARCÍA, A., 2008. *Silica sand slope gullying and mining in Central Spain: Erosion processes and geomorphic reclamation of contour mining.* Geo-Environment and Landscape Evolution III, 5-14
- RAJKAI, K., RYDEN, B.E., 1992. *Measuring areal soil moisture distribution with the TDR method.* Geoderma 52, 73-85
- TAPIAS PANTEBRE, J.C., SALGOT DE MARÇAY, M., CASAS PONSATI, A., 2001. *Utilidad de la técnica TDR para la medida de la variación espacial y temporal de la humedad del suelo en campos de golf.* Edafología, Vol 8 (3), 1-10
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., 1985. *Measurement of soil wáter content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation.* Soil Sciencie Society American Journal 49, 19-24

- VALLADARES, F., BALAGUER, L., MOLA, I., ESCUDERO, A., ALFAYA, V., 2011. *Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte. Bases científicas para soluciones técnicas.* Fundación Biodiversidad, Madrid, España

ANEJOS

7.- ANEJOS

7.1.- Ecuaciones de transformación de la señal del TDR en valores de Humedad volumétrica en %

Nota: La medida de longitud aparente de las varillas obtenidas con el TDR hay que transformarla en valores de la constante dieléctrica del suelo usando la relación $K=(Lap/Lr)^2$, donde K es la constante dieléctrica del suelo a un nivel de humedad particular, Lap es la longitud aparente de las varillas medida con el TDR a esa humedad particular del suelo (la señal de salida del TDR) y Lr es la longitud real de las varillas que fue insertada en el suelo.

Tabla 1. Ecuaciones de transformación de la señal de TDR a porcentaje de humedad en volumen de suelo resultado del procedimiento de calibración

Tipo de Sustrato	Ecuación de Transformación
Estéril Arcilloso Aurora	$H(\%\ vol/vol) = 0{,}1001K^3 - 1{,}4886K^2 + 12{,}13K - 7{,}6904$
Coluvión Pedregoso Aurora	$H(\%\ vol/vol) = 0{,}2291K^3 - 3{,}3424K^2 + 18{,}674K - 13{,}997$
Tierra Vegetal Arcilloso Machorro	$H(\%\ vol/vol) = -0{,}0452K^3 + 0{,}2051K^2 + 6{,}1632K - 2{,}8535$
Estéril Arenoso Machorro	$H(\%\ vol/vol) = 0{,}3005K^3 - 2{,}8744K^2 + 14{,}366K - 8{,}5983$
$K = (Lap/Lr)^2$ **Lap = Señal del TDR** **Lr = Longitud de varillas insertadas en la tierra**	

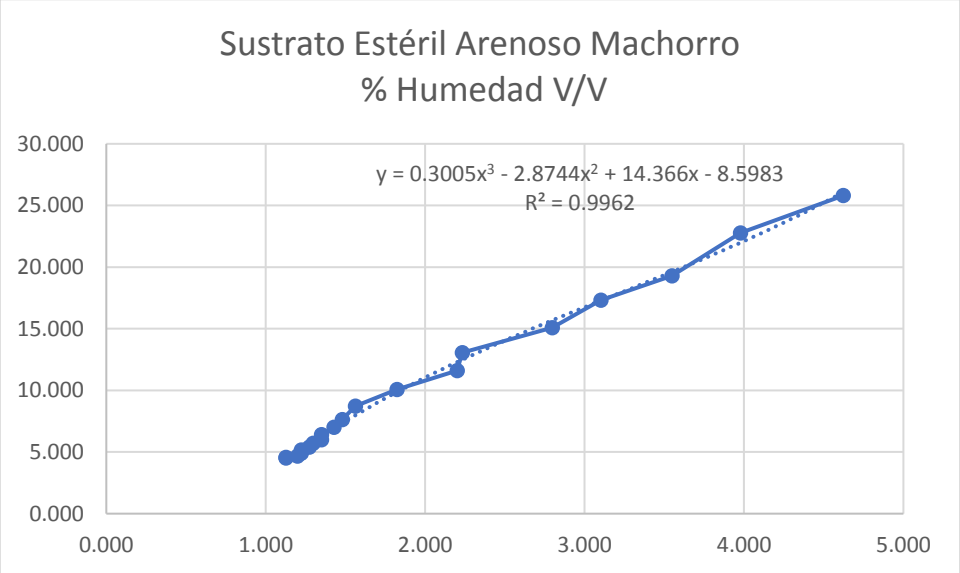


Figura 1. Ecuación de transformación de señal del TDR en % de Humedad para sustrato estéril arenoso en cantera el Machorro. En el eje Y se muestra el % de humedad correspondiente al valor K del eje X

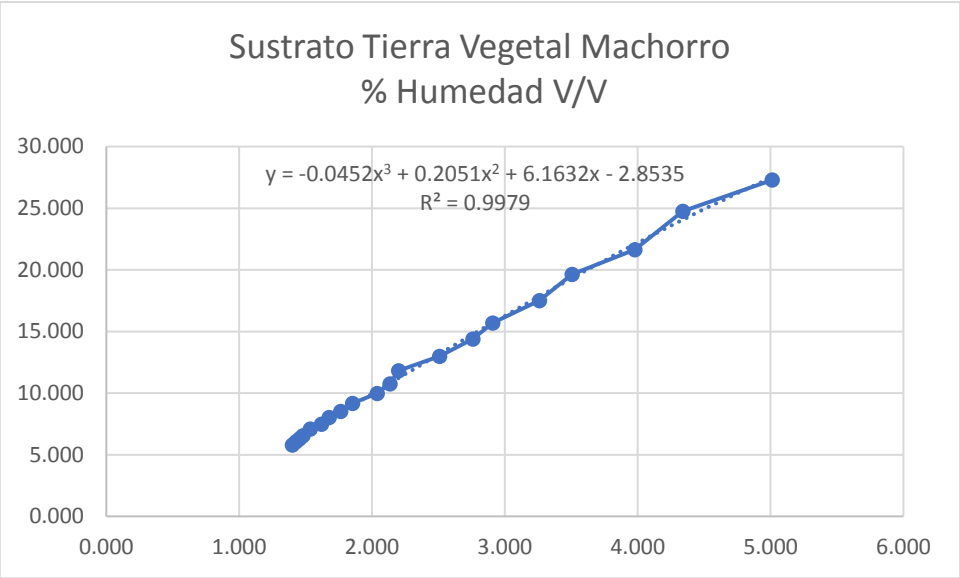


Figura 2. Ecuación de transformación de señal del TDR en % de Humedad para sustrato con tierra vegetal en cantera el Machorro. En el eje Y se muestra el % de humedad correspondiente al valor K del eje X

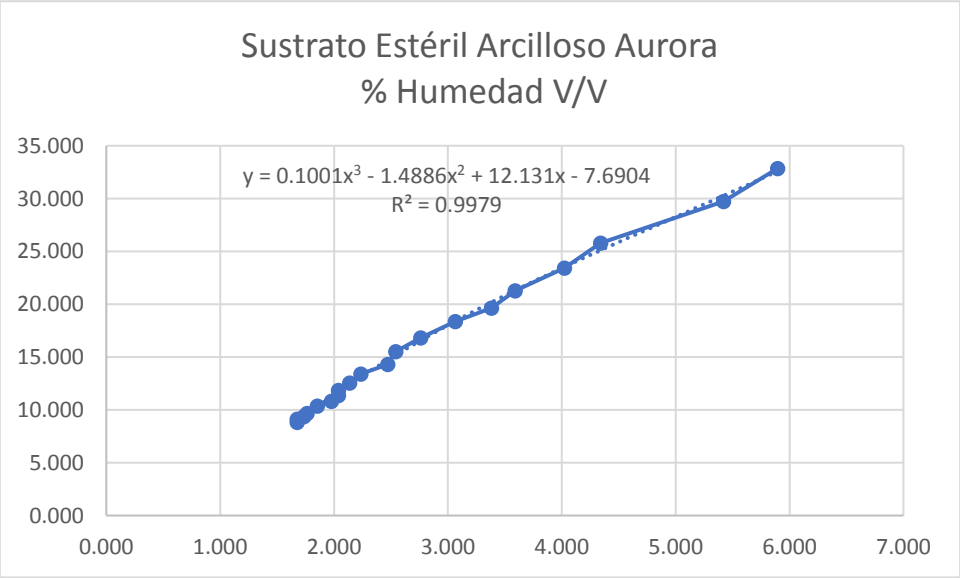


Figura 3. Ecuación de transformación de señal del TDR en % de Humedad para sustrato estéril arcilloso en cantera Aurora. En el eje Y se muestra el % de humedad correspondiente al valor K del eje X

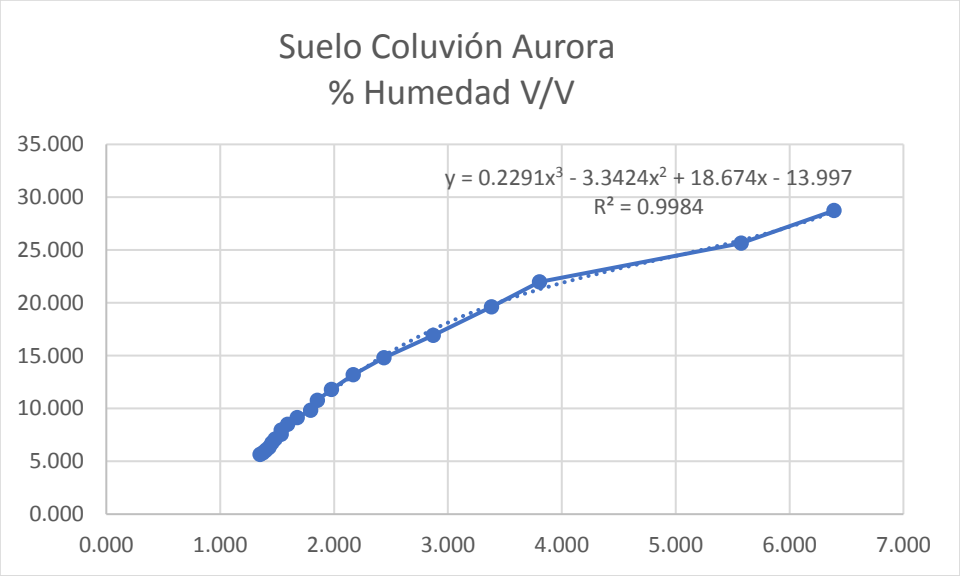


Figura 4. Ecuación de transformación de señal del TDR en % de Humedad para sustrato con coluvión en cantera Aurora. En el eje Y se muestra el % de humedad correspondiente al valor K del eje X

7.2.- Resultados de los muestreos

Tabla 2. Valores de salida de la señal de TDR en muestreos realizados en cantera Aurora

PARCELA		14/07/2015	04/08/2015	26/08/2015	16/09/2015	14/10/2015	15/11/2015	07/01/2016	07/02/2016	06/03/2016	07/04/2016
L3DC1	Divisoria Pedregosa	0.386	0.39	0.353	0.377	0.359	0.351	0.321	0.309	0.309	0.459
L3DC2	Coluvión	0.399	0.392	0.371	0.375	0.379	0.377	0.313	0.307	0.305	0.447
L3DC3		0.456	0.477	0.429	0.433	0.39	0.413	0.341	0.327	0.335	0.559
L3DA1	Divisoria Arcillosa	0.352	0.373	0.335	0.373	0.294	0.343	0.303	0.291	0.297	0.403
L3DA2	Estéril Arcilloso	0.319	0.338	0.295	0.319	0.253	-0.011	0.299	0.351	0.347	0.779
L3DA3		0.338	0.352	0.329	0.351	0.281	0.333	0.295	0.289	0.283	0.399
L3VU1	Vaguada Umbría	0.467	0.496	0.463	0.429	0.426	0.407	0.377	0.335	0.343	0.519
L3VU2	Coluvión	0.39	0.388	0.369	0.372	0.355	0.369	0.323	0.299	0.305	0.463
L3VU3		0.31	0.31	0.281	0.313	0.303	0.315	0.286	0.279	0.277	0.479
L3VU3Reguero				1.923	0.903	0.629	0.677	0.575	0.559	0.581	0.719
L3LS1	Ladera Solana	0.328	0.346	0.299	0.339	0.26	0.318	0.277	0.271	0.271	0.425
L3LS2	Estéril Arcilloso	Error	0.335	0.311	0.343	0.269	0.329	0.297	0.301	0.291	0.503
L3LS3		0.358	0.364	0.347	0.355	0.283	0.314	0.301	0.291	0.305	0.477
L3VS1	Vaguada Solana	0.31	0.376	0.349	0.359	0.275	0.345	0.303	0.299	0.303	0.408
L3VS2	Estéril Arcilloso	0.406	0.388	0.377	0.403	0.297	0.351	0.319	0.295	0.305	0.454
L3VS3		0.346	0.359	0.337	0.346	0.272	0.334	0.291	0.269	0.261	0.453
L3C1	Canal Principal	0.692	0.668	0.707	0.715	0.586	0.549	0.563	0.539	0.549	0.665
L3C2		0.842	0.874	0.779	1.105	0.611	0.869	0.701	0.619	0.699	0.923
L3C3		Error	1.924	1.903	1.941	1.329	1.353	1.378	0.729	1.319	1.649
L3C1up			1.092		0.841		0.677	0.559	0.611	0.637	0.649
L3C2up			0.88	0.899	0.957	0.603	0.753	0.565	0.551	0.595	0.753
L3C3up			1.934	1.825	1.941	0.709	0.771	0.611	0.627	0.629	1.649
L3LU1	Ladera Umbría		0.374	0.329	0.355	0.271	0.335	0.287	0.259	0.263	0.444
L3LU2	Estéril Arcilloso		0.392	0.377	0.399	0.309	0.379	0.329	0.317	0.325	0.497
L3LU3			0.52	0.625	0.629	0.389	0.466	0.417	0.389	0.381	0.673

Tabla 3. Porcentaje de Humedad en muestreos realizados en cantera Aurora

Parcela		14/07/2015	04/08/2015	26/08/2015	16/09/2015	14/10/2015	15/11/2015	07/01/2016	07/02/2016	06/03/2016	07/04/2016
		% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad
L3DA1	Divisoria Arcillosa	18.57	20.70	16.83	20.70	12.58	17.65	13.52	12.26	12.89	23.72
L3DA2	Estéril Arcilloso	15.18	17.14	12.68	15.18	8.32		13.10	18.47	18.06	21.31
L3DA3		17.14	18.57	16.21	18.47	11.22	16.63	12.68	12.06	11.43	23.32
L3LS1	Ladera Solana	16.11	17.96	13.10	17.24	9.04	15.08	10.80	10.18	10.18	25.95
L3LS2	Estéril Arcilloso		16.83	14.35	17.65	9.97	16.21	12.89	13.31	12.26	34.81
L3LS3		19.18	19.79	18.06	18.88	11.43	14.66	13.31	12.26	13.72	31.57
L3VS1	Vaguada Solana	14.25	21.00	18.27	19.29	10.60	17.86	13.52	13.10	13.52	24.22
L3VS2	Estéril Arcilloso	24.02	22.21	21.11	23.72	12.89	18.47	15.18	12.68	13.72	28.98
L3VS3		17.96	19.29	17.04	17.96	10.28	16.73	12.26	9.97	9.14	28.88
L3LU1	Ladera Umbría		20.80	16.21	18.88	10.18	16.83	11.85	8.93	9.35	27.92
L3LU2	Estéril Arcilloso		22.61	21.11	23.32	14.14	21.31	16.21	14.97	15.80	34.02
L3LU3			37.21	62.03	63.52	22.31	30.31	25.13	22.31	21.51	84.13
L3DC1	Divisoria Pedregosa	21.03	21.28	18.67	20.43	19.14	18.51	15.84	14.65	14.65	25.11
L3DC2	Coluvión	21.82	21.40	20.02	20.30	20.57	20.43	15.06	14.44	14.24	24.44
L3DC3		24.94	26.24	23.48	23.69	21.28	22.62	17.67	16.41	17.15	37.13
L3VU1	Vaguada Umbría	25.59	27.72	25.35	23.48	23.32	22.29	20.43	17.15	17.84	30.15
L3VU2	Coluvión	21.28	21.15	19.88	20.09	18.82	19.88	16.04	13.60	14.24	25.35
L3VU3		14.75	14.75	11.60	15.06	14.03	15.26	12.17	11.37	11.14	26.38

Tabla 4. Valores de salida de la señal de TDR en muestreos realizados en cantera el Machorro

PARCELA	OBSERVACIONES	03/10/2015	08/11/2015	29/12/2015	31/01/2016	26/02/2016	03/04/2016	03/05/2016	24/05/2016
L1C1	Cuenca arcillosa Canal Principal Tierra Vegetal	0.336	0.351	0.329	0.397	0.417	0.405	0.408	0.424
L1C2		0.349	No encontrada	No encontrada	0.429	0.431	0.437	0.442	0.442
L1C3		0.429	0.427	0.411	0.473	0.495	0.411	0.46	0.488
L1VE1	Cuenca arcillosa Vaguada Este Tierra Vegetal	0.355	0.433	0.369	0.421	0.443	0.405	0.42	0.436
L1VE2		0.387	0.449	0.391	0.469	0.489	0.423	0.434	0.498
L1VE3		0.385	0.449	0.381	0.481	0.485	0.409	0.436	0.496
L1DE1	Cuenca arcillosa Divisoria Este Tierra Vegetal	0.347	No encontrada	0.373		0.409	0.369	0.394	0.41
L1DE2		0.381	No encontrada		0.335	0.389	0.369	0.338	0.4
L1DE3		0.325	No encontrada	0.329	0.417	0.449	0.367	0.416	0.456
L1VO1	Cuenca arcillosa Vaguada Oeste Tierra Vegetal	0.353	0.419	0.379	0.437	0.451	0.385	0.408	0.442
L1VO2		0.363	0.408	0.361	0.419	0.431	0.377	0.394	0.442
L1VO3		0.371	0.399	0.369	0.393	0.411	0.361	0.41	0.412
L1DO1	Cuenca arcillosa Divisoria Oeste Tierra Vegetal	0.325	0.405	0.344	0.397	0.399	0.371	0.432	0.42
L1DO2		0.293	0.423	0.377	0.423	0.415	0.321	0.398	0.416
L1DO3		0.337	0.413	0.329	0.405	0.409	0.405	0.382	0.412
DI1	Divisoria Principal Tierra Vegetal	0.375	0.389	0.343	0.411	0.397	0.381	0.396	0.428
DI2		0.359	0.395	0.341	0.385	0.507	0.363	0.41	0.418
DI3		0.325	0.414	0.331	0.411	0.435	0.351	0.406	0.446
L2C1	Cuenca arenosa Canal Principal Estéril arenoso	0.351	0.381	0.333	0.405	0.421	0.385	0.396	0.432
L2C2		0.361	No encontrada	0.433		0.431	0.361	0.38	0.442
L2C3		0.325	0.367	0.329	0.337	0.405	0.389	0.386	0.402
L2VE1	Cuenca arenosa Vaguada Este Estéril arenoso	0.373	0.369	0.313	0.381	0.345	0.357	0.388	0.39
L2VE2		0.362	0.427	0.349	0.389	0.427	0.387	0.396	0.416
L2VE3		0.361	0.417	0.341	0.471	0.471	0.429	0.42	0.456
L2DE1	Cuenca arenosa Divisoria Este Estéril arenoso	0.313	0.363	0.319	0.369	0.339	0.321	0.398	0.352
L2DE2		0.309	0.347	0.301	0.379	0.335	0.333	0.328	0.372
L2DE3		0.349	0.409	0.363	0.397	0.409	0.389	0.331	0.422
L2VO1		0.357	0.355	0.329	0.393	0.377	0.343	0.376	0.388

L2VO2	Cuenca arenosa Vaguada Oeste Estéril arenoso	0.327	0.345	0.329	0.403	0.399	0.365	0.368	0.41
L2VO3		0.337	0.375	0.343	0.399	0.409	0.371	0.368	0.418
L2DO1	Cuenca arenosa Divisoria Oeste Estéril arenoso	0.355	No encontrada	0.293	0.371	0.399	0.335	0.372	0.396
L2DO2		0.359	0.357	0.323	0.381	0.401	0.373	0.38	0.404
L2DO3		0.329	0.363	0.319	0.377	0.385	0.347	0.367	0.414

Tabla 5. Porcentaje de Humedad en muestreos realizados en cantera el Machorro

PARCELA	OBSERVACIONES	03/10/2015	08/11/2015	29/12/2015	31/01/2016	26/02/2016	03/04/2016	03/05/2016	24/05/2016
		% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad	% Humedad
L1C1	Cuenca arcillosa Canal Principal Tierra Vegetal	15.16	16.75	14.43	21.85	24.10	22.75	23.09	24.89
L1C2		16.54			25.44	25.66	26.33	26.87	26.87
L1C3		25.44	25.22	23.43	30.13	32.21	23.43	28.80	31.57
L1VE1	Cuenca arcillosa Vaguada Este Tierra Vegetal	17.19	25.89	18.72	24.55	26.98	22.75	24.44	26.22
L1VE2		20.73	27.63	21.17	29.72	31.66	24.77	26.00	32.47
L1VE3		20.50	27.63	20.05	30.91	31.29	23.20	26.22	32.30
L1DE1	Cuenca arcillosa Divisoria Este Tierra Vegetal	16.32			19.16	23.20	18.72	21.51	23.31
L1DE2		20.05			15.05	20.95	18.72	15.37	22.19
L1DE3		14.02		14.43	24.10	27.63	18.50	23.99	28.38
L1VO1	Cuenca arcillosa Vaguada Oeste Tierra Vegetal	16.97	24.33	19.83	26.33	27.85	20.50	23.09	26.87
L1VO2		18.06	23.09	17.84	24.33	25.66	19.61	21.51	26.87
L1VO3		18.94	22.08	18.72	21.40	23.43	17.84	23.31	23.54
L1DO1	Cuenca arcillosa Divisoria Oeste Tierra Vegetal	14.02	22.75	16.00	21.85	22.08	18.94	25.78	24.44
L1DO2		10.87	24.77	19.61	24.77	23.88	13.61	21.96	23.99
L1DO3		15.26	23.65	14.43	22.75	23.20	22.75	20.17	23.54
DI1		19.38	20.95	15.90	23.43	21.85	20.05	21.74	25.33

DI2	Divisoria Principal Tierra Vegetal	17.62	21.62	15.69	20.50	33.23	18.06	23.31	24.21
DI3		15.16	23.76	14.64	23.43	26.11	16.75	22.86	27.31
L2C1	Cuenca arenosa Canal Principal Estéril arenoso	17.16	20.04	15.54	22.70	24.76	20.46	21.65	26.38
L2C2		18.09			26.53	26.22	18.09	19.94	28.01
L2C3		14.83	18.66	15.18	15.90	22.70	20.88	20.56	22.34
L2VE1	Cuenca arenosa Vaguada Este Estéril arenoso	19.24	18.85	13.76	20.04	16.62	17.71	20.77	20.99
L2VE2		18.18	25.62	16.98	20.88	25.62	20.67	21.65	24.09
L2VE3		18.09	24.22	16.26	33.93	33.93	25.92	24.63	30.62
L2DE1	Cuenca arenosa Divisoria Este Estéril arenoso	13.76	18.28	14.29	18.85	16.08	14.47	21.88	17.25
L2DE2		13.40	16.80	12.69	19.84	15.72	15.54	15.09	19.14
L2DE3		16.98	23.19	18.28	21.76	23.19	20.88	15.36	24.90
L2VO1	Cuenca arenosa Vaguada Oeste Estéril arenoso	17.71	17.53	15.18	21.32	19.64	16.44	19.54	20.77
L2VO2		15.00	16.62	15.18	22.46	21.99	18.47	18.75	23.31
L2VO3		15.90	19.44	16.44	21.99	23.19	19.04	18.75	24.35
L2DO1	Cuenca arenosa Divisoria Oeste Estéril arenoso	17.53		11.96	19.04	21.99	15.72	19.14	21.65
L2DO2		17.90	17.71	14.65	20.04	22.22	19.24	19.94	22.58
L2DO3		15.18	18.28	14.29	19.64	20.46	16.80	18.66	23.82

7.3.- Serie de Tablas del análisis estadístico realizado complementarias de Resultados

7.3.1.- Resultados en Cantera Aurora

Tabla 6. Resultados a la prueba Kolmogorov-Smirnov para la variable porcentaje de humedad y la variable señal de TDR en Aurora. La distribución es la normal a partir de Sig > 0,05

Variable	Z de K-S	Significación	N
% de Humedad	2,049	0,000	175
TDR	3,617	0,000	229

Tabla 7: Resultados de prueba U de Mann-Whitney, definiendo en Aurora el tipo de sustrato como factor de agrupación y la variable % de Humedad por medida (Volumen/Volumen) como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	U de M-W	Sig
% Humedad	Sustrato Estéril Arcilloso	115	18,65	10,32	2528,000	**0,004**
	Sustrato Coluvión	60	19,71	5,01		
	Total	175	19,02	8,87		

Tabla 8: Resultados de prueba H de Kruskal_Wallis, definiendo en Aurora el tipo de forma de relieve como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	H de K-W	Sig
% Humedad	Divisoria Estéril Arcillosa (L3DA)	29	16,09	3,84	22,974	**0,000**
	Ladera Estéril Arcilloso Solana (L3LS)	29	16,10	6,01		
	Vaguada Estéril Arcilloso Solana (L3VS)	30	17,28	5,33		
	Ladera Estéril Arcilloso Umbría (L3LU)	27	25,16	17,70		
	Divisoria Coluvión (L3DC)	30	20,42	4,68		
	Vaguada Coluvión Umbría (L3VU)	30	19,01	5,31		
	Total	175	19,02	8,87		

Tabla 9: Resultados de prueba U de Mann-Whitney, definiendo en Aurora el tipo de geoforma (vaguadas, formas importadoras y laderas/divisorias, formas exportadoras) como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	U de M-W	Sig
% Humedad	Importadoras	60	18,14	5,34	3472,500	0,699
	Exportadoras	115	19,47	10,23		
	Total	175	19,02	8,87		

Tabla 10: Resultados de prueba U de Mann-Whitney, definiendo en Aurora la orientación (solana/umbría) como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	U de M-W	Sig
% Humedad	Solana	59	16,70	5,66	2460,000	**0,002**
	Umbría	116	20,19	9,94		
	Total	175	19,02	8,87		

Tabla 11: Resultados de prueba U de Mann-Whitney entre parejas de geoformas en Aurora. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Forma	Forma	U de M-W	Sig
L3DA	L3LS	374,500	0,474
	L3VS	381,000	0,413
	L3LU	229,500	**0,008**
	L3DC	203,000	**0,000**
	L3VU	305,000	**0,049**
L3LS	L3DA	374,500	0,474
	L3VS	354,000	0,219
	L3LU	220,000	**0,005**
	L3DC	184,000	**0,000**
	L3VU	277,000	**0,017**
L3VS	L3DA	381,000	0,413
	L3LS	354,000	0,219
	L3LU	277,500	**0,042**
	L3DC	279,000	**0,011**
	L3VU	359,000	0,178
L3LU	L3DA	229,500	**0,008**
	L3LS	220,000	**0,005**
	L3VS	277,500	**0,042**
	L3DC	371,000	0,587
	L3VU	328,000	0,218
L3DC	L3DA	203,000	**0,000**
	L3LS	184,000	**0,000**
	L3VS	279,000	**0,011**
	L3LU	371,000	0,587
	L3VU	380,000	0,301
L3VU	L3DA	305,000	**0,049**
	L3LS	277,000	**0,017**
	L3VS	359,000	0,178
	L3LU	328,000	0,218
	L3DC	371,000	0,587

Tabla 12: Resultados de prueba U de Mann-Whitney entre valores de TDR tomados en el Canal Principal y el resto geoformas en Aurora. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Forma	Forma	U de M-W	Sig
L3C	L3DA	15,500	**0,000**
	L3LS	0,000	**0,000**
	L3VS	0,000	**0,000**
	L3LU	23,000	**0,000**
	L3DC	3,000	**0,000**
	L3VU	0,000	**0,000**
	L3C2	328,000	0,549
L3C2	L3DA	16,000	**0,000**
	L3LS	0,000	**0,000**
	L3VS	0,000	**0,000**
	L3LU	26,500	**0,000**
	L3DC	1,500	**0,000**
	L3VU	0,000	**0,000**
	L3C	328,000	0,549

7.3.2.- Resultados en Cantera el Machorro

Tabla 13. Resultados a la prueba Kolmogorov-Smirnov para la variable porcentaje de humedad en el Machorro. La distribución es la norma a partir de Sig > 0,05

Variable	Z de K-S	Significación	N
% de Humedad	0,641	**0,806**	254

Tabla 14. Resultados al test de Levene para conocer la homogeneidad de las varianzas para el factor tipo de sustrato y la variable porcentaje de humedad en el Machorro. Las varianzas son homogéneas a partir de Sig > 0,05

Variable	Estadístico de Levene	Significación	N
% de Humedad	0,641	**0,120**	254

Tabla 15: Resultados de test ANOVA definiendo en el Machorro el tipo de sustrato como factor de agrupación y la variable % de Humedad por medida (Volumen/Volumen) como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	F	Sig
% Humedad	Sustrato Tierra Vegetal (Cuenca principal)	137	22,41	4,59	25,073	**0,000**
	Sustrato Estéril Arenoso (Cuenca secundaria)	117	19,67	4,03		
	Total	254	21,14	4,55		

Tabla 16. Resultados al test de Levene para conocer la homogeneidad de las varianzas para el factor tipo de geoforma de relieve y la variable porcentaje de humedad en el Machorro. Las varianzas son homogéneas a partir de Sig > 0,05

Variable	Estadístico de Levene	Significación	N
% de Humedad	1,482	**0,147**	254

Tabla 17: Resultados de prueba H de Kruskal-Wallis, definiendo en el Machorro la orientación (este/oeste) como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente. Los valores indefinidos en cuanto a su orientación (pertenecientes a la divisoria principal no se incluyen en el análisis). La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	H de K-W	Sig
% Humedad	Este	91	21,49	5,21	3823,00.	0,174
	Oeste	95	20,15	3,60		
	Otras (Divisoria Principal)	68	22,07	4,59		
	Total	254	21,14	4,55		

Tabla 18: Resultados de test ANOVA definiendo en el Machorro la geoforma como factor de agrupación y la variable % de Humedad por medida (Volumen/Volumen) como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	F	Sig
% Humedad	Canal Principal Tierra Vegetal (L1C)	22	24,13	4,89	7,541	**0,000**
	Vaguada Este Tierra Vegetal (L1VE)	24	25,54	4,44		
	Divisoria Este Tierra Vegetal (L1DE)	19	20,30	4,22		
	Vaguada Oeste Tierra Vegetal (L1VO)	24	22,17	3,24		
	Divisoria Oeste Tierra Vegetal (L1DO)	24	20,63	4,28		
	Divisoria Principal (DI)	24	21,37	4,38		
	Canal Secundario Estéril Arenoso (L2C)	22	20,76	3,93		
	Vaguada Este Estéril Arenoso (L2VE)	24	22,05	5,30		
	Divisoria Este Estéril Arenoso (L2DE)	24	17,82	3,43		
	Vaguada Oeste Estéril Arenoso (L2VO)	24	19,13	2,81		
	Divisoria Oeste Estéril Arenoso (L2DO)	23	18,63	2,94		
	Total	254	21,14	4,55		

Tabla 19. Resultados al test de Levene para conocer la homogeneidad de las varianzas para la variable porcentaje de humedad en Canal Principal y en Canal Secundario por separado en el Machorro. Las varianzas son homogéneas a partir de Sig > 0,05

Variable	Estadístico de Levene	Significación	N
% de Humedad Canal Principal	3,739	**0,056**	91
% de Humedad Canal Secundario	3,947	0,004	95

Tabla 20: Resultados de test ANOVA, definiendo en el Machorro la orientación (este/oeste) como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente solamente en la Cuenca Principal. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	F	Sig
% Humedad	Este	43	23,22	5,04	3,833	0,053
	Oeste	48	21,40	3,83		
	Total	91	22,26	4,52		

Tabla 21: Resultados de prueba U de Mann-Whitney, definiendo en el Machorro la orientación (este/oeste) como factor de agrupación y la variable % de Humedad (Volumen/Volumen) por medida como variable dependiente solamente en la Cuenca Secundaria. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	U de M-W	Sig
% Humedad	Este	48	19,93	4,90	1052,500	0,574
	Oeste	47	18,88	2,85		
	Total	95	19,41	4,04		

Tabla 22. Resultados al test de Levene para conocer la homogeneidad de las varianzas para el factor altura de punto de muestreo y la variable porcentaje de humedad en el Machorro. Las varianzas son homogéneas a partir de Sig > 0,05

Variable	Estadístico de Levene	Significación	N
% de Humedad	3,041	**0,050**	254

Tabla 23: Resultados de test ANOVA definiendo en el Machorro la altura de punto de muestreo como factor de agrupación y la variable % de Humedad por medida (Volumen/Volumen) como dependiente. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig < 0,05

Variable	Factor	Número de casos	Media	Desv. estándar	F	Sig
% Humedad	Altura 3 (bajo)	85	22,04	3,71	3,514	**0,031**
	Altura 2 (medio)	82	21,14	4,68		
	Altura 1 (alto)	87	20,22	5,02		
	Total	254	21,14	4,55		

Tabla 24: Resultados de test ANOVA entre parejas de geoformas en el Machorro. La prueba considera la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos a partir de valores de Sig< 0,05

Forma	Forma	Sig.	Forma	Forma	Sig.	Forma	Forma	Sig.
Canal Principal 1 (L1C)	L1VE	0.985	Divisoria Oeste C1 (L1DO)	L1C	0.120	Divisoria Este C2 (L2DE)	L1C	**0.000**
	L1DE	0.094		L1VE	**0.002**		L1VE	**0.000**
	L1VO	0.861		L1DE	1.000		L1DE	0.655
	L1DO	0.120		L1VO	0.966		L1VO	**0.011**
	DI	0.431		DI	1.000		L1DO	0.370
	L2C	0.178		L2C	1.000		DI	0.091
	L2VE	0.813		L2VE	0.980		L2C	0.336
	L2DE	**0.000**		L2DE	0.370		L2VE	**0.016**
	L2VO	**0.002**		L2VO	0.971		L2VO	0.989
	L2DO	**0.000**		L2DO	0.839		L2DO	1.000
Vaguada Este C1 (L1VE)	L1C	0.985	Divisoria Principal (DI)	L1C	0.431	Vaguada Oeste C2 (L2VO)	L1C	**0.002**
	L1DE	**0.002**		L1VE	**0.019**		L1VE	**0.000**
	L1VO	0.134		L1DE	0.999		L1DE	0.997
	L1DO	**0.002**		L1VO	1.000		L1VO	0.255
	DI	**0.019**		L1DO	1.000		L1DO	0.971
	L2C	**0.004**		L2C	1.000		DI	0.704
	L2VE	0.105		L2VE	1.000		L2C	0.956
	L2DE	**0.000**		L2DE	0.091		L2VE	0.309
	L2VO	**0.000**		L2VO	0.704		L2DE	0.989
	L2DO	**0.000**		L2DO	0.425		L2DO	1.000
Divisoria Este C1(L1DE)	L1C	0.094	Canal Secundario (L2C)	L1C	0.178	Divisoria Oeste C2 (L2DO)	L1C	**0.000**
	L1VE	**0.002**		L1VE	**0.004**		L1VE	**0.000**
	L1VO	0.918		L1DE	1.000		L1DE	0.963
	L1DO	1.000		L1VO	0.984		L1VO	0.102
	DI	0.999		L1DO	1.000		L1DO	0.839
	L2C	1.000		DI	1.000		DI	0.425
	L2VE	0.945		L2VE	0.992		L2C	0.803
	L2DE	0.655		L2DE	0.336		L2VE	0.131
	L2VO	0.997		L2VO	0.956		L2DE	1.000
	L2DO	0.963		L2DO	0.803		L2VO	1.000
Vaguada Oeste C1 (L1VO)	L1C	0.861	Vaguada Este C2 (L2VE)	L1C	0.813			
	L1VE	0.134		L1VE	0.105			
	L1DE	0.918		L1DE	0.945			
	L1DO	0.966		L1VO	1.000			
	DI	1.000		L1DO	0.980			
	L2C	0.984		DI	1.000			
	L2VE	1.000		L2C	0.992			
	L2DE	**0.011**		L2DE	**0.016**			
	L2VO	0.255		L2VO	0.309			
	L2DO	0.102		L2DO	0.131			

7.4.- Anexos de autorización y vistos buenos de tutor académico y director

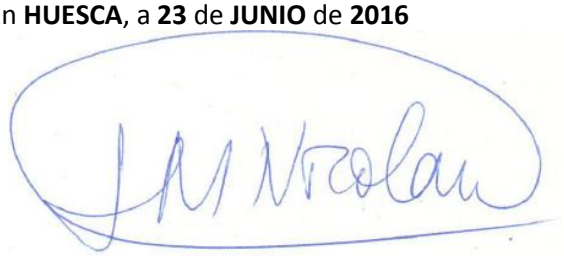
ANEXO 2

D./Dª **JOSÉ MANUEL NICOLAU IBARRA**

CERTIFICA:

Que el trabajo titulado: **DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD EDÁFICA EN CANTERAS RESTAURADAS POR EL MÉTODO GEOFLUV**, ha sido realizado bajo mi dirección por el alumno/a D./Dª **MIGUEL LALAGUNA DOMÍNGUEZ**

En **HUESCA**, a **23** de **JUNIO** de **2016**



Firmado:

ANEXO 3

D./Dª **JOSÉ FRANCISCO MARTÍN DUQUE**

CERTIFICA:

Que el trabajo titulado: **DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD EDÁFICA EN CANTERAS RESTAURADAS POR EL MÉTODO GEOFLUV**, ha sido realizado bajo mi tutorización académica por el alumno/a D./Dª **MIGUEL LALAGUNA DOMÍNGUEZ**

En **MADRID**, a **23** de **JUNIO** de **2016**

Firmado:

ANEXO 4

ANEXO 4

FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA INCLUSIÓN DEL TRABAJO DE FIN DE MASTER EN LOS ARCHIVO ABIERTOS INSTITUCIONALES DE LAS UNIVERSIDADES QUE IMPARTEN LA TITULACIÓN

TÍTULO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:
DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD EDÁFICA EN CANTERAS RESTAURADAS POR EL MÉTODO GEOFLUV

1.- ESTUDIANTE (AUTOR)

APELLIDOS Y NOMBRE:	**DNI:**
MIGUEL LAZAGUNA DOMÍNGUEZ	18054477-Y
TITULACIÓN:	
Máster Universitario en RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS	

2.- TUTOR DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

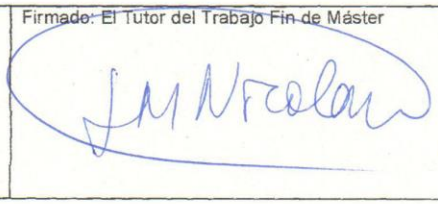
APELLIDOS Y NOMBRE:	**DNI:** 17705431-M
NICOLAU IBARRA, JOSE MANUEL	
DEPARTAMENTO O INSTITUCIÓN:	
Depto. CIENCIAS AGRARIAS Y DEL MEDIO NATURAL UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA	

Los abajo firmantes:

☒ AUTORIZAN
☐ NO AUTORIZAN

El depósito y puesta a disposición del Trabajo Fin de Máster en los Repositorios Institucionales de las Universidades que imparten la titulación, de acceso libre y gratuito a través de Internet, y otorgando las condiciones de uso de la licencia Creative Commons *reconocimiento-uso no comercial-sin obra derivada.*

Más información en:

Firmado: El Autor	Firmado: El Tutor del Trabajo Fin de Máster
	

11

ANEXO 5

ANEXO 4

FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA INCLUSIÓN DEL TRABAJO DE FIN DE MASTER EN LOS ARCHIVO ABIERTOS INSTITUCIONALES DE LAS UNIVERSIDADES QUE IMPARTEN LA TITULACIÓN

TÍTULO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:
DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD EDÁFICA EN CANTERAS RESTAURADAS POR EL MÉTODO GEOFLUV

1.- ESTUDIANTE (AUTOR)

APELLIDOS Y NOMBRE:	**DNI:**
MIGUEL LAZAGUNA DOMÍNGUEZ	18054477-Y
TITULACIÓN: **Máster Universitario en** RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS	

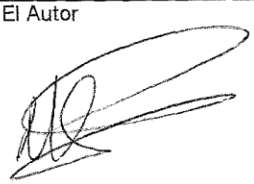
2.- TUTOR DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

APELLIDOS Y NOMBRE:	**DNI:**
JOSE FRANCISCO MARTIN DUQUE	03449400-K
DEPARTAMENTO O INSTITUCIÓN: UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID FACULTAD CIENCIAS GEOLÓGICAS. DEPARTAMENTO DE GEODINÁMICA	

Los abajo firmantes:

☒ AUTORIZAN
☐ NO AUTORIZAN

El depósito y puesta a disposición del Trabajo Fin de Máster en los Repositorios Institucionales de las Universidades que imparten la titulación, de acceso libre y gratuito a través de Internet, y otorgando las condiciones de uso de la licencia Creative Commons *reconocimiento-uso no comercial-sin obra derivada*.

Más información en:

Firmado: El Autor	Firmado: El Tutor del Trabajo Fin de Máster