



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLAS DE HIDALGO



FACULTAD DE BIOLOGÍA

Tesis para obtener el título de Maestría en Ecología y
Conservación

**Caracterización de la red de macroporos del suelo
mediante tomografía de rayos X, bajo distintos usos
de suelo y su relación con la infiltración**

PRESENTA:
Rafael Morales Chávez

Director de tesis:
Doctor en ciencias biológicas: Alberto Gómez-Tagle
Chávez

Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas

Morelia, Michoacán, México, febrero del 2014

DEDICATORIA

A ti papa que aunque te fuiste un poco antes sigues siendo el motivo para salir adelante y se que desde donde quiera que estés sigues echándome la mano, amándome y cuidándome.

A ti mama por ser ese apoyo que tanto necesite cuando mas falta me hacia, por aguantar mi mal genio, por los jalones de orejas, por tu constante preocupación y por sobre todo a tu amor incondicional.

A ti hermana por siempre estar ahí, por las risas, los pleitos, por aguantarme ya vez como soy, por tu cariño.

A todos mis abuelos, tíos, primos, sobrinos, a toda la familia, que siempre me han apoyado desde un principio que decidí meterme en esto de la biología, por su cariño y comprensión.

A ti Beto que antes de un doctor, un asesor y un gran maestro, fuiste, eres y seguirás siendo un gran amigo, por la guía, los consejos, el aprendizaje, por la paciencia y el apoyo durante los momentos difíciles que tuvimos a lo largo de este proceso, gracias mi hermano.

A mis otros dos hermanos Raúl y Sergio, a ti mi rulas por los buenos momentos, por todo el apoyo de campo q sin el esta tesis no se hubiera logrado, a ti mi serge por tus consejos, por siempre saber que decir y hacerme entrar en razón cuando lo merezco, a los dos por siempre estar al pie del cañón y haberme hecho parte de sus familia.

A todos ustedes compañeros de el laboratorio de ciencias de la tierra Dulce, Leiz, Zareth, Diana, Gore, Diandra, Caro, Chabe, Ray, Javier, Chip y Dani por las risas, los buenos momentos, las comidas, las cervezas y el estar ahí.

A todos mis demás amigos ya saben quienes son, por preocuparse, por aguantarme, por todos estos años acompañándome y ser parte de mi vida.

Gracias a todos ustedes por ser parte fundamental de mi vida y por haberme ayudado a ser quien soy ahora.

Los quiero condenadotes.

Estructura de la tesis

Para responder el ¿Por qué? de este trabajo se comienza con una introducción general en donde se expone el contexto del problema de investigación, también se puntualiza la hipótesis el objetivo general y los particulares, además de las preguntas de investigación necesarias para dejar ver el ¿Para que? de este trabajo. Se presenta un marco teórico que trata de aclarar los fundamentos conceptuales de este trabajo de investigación. En lo que respecta al ¿cómo? se realizó este trabajo; primero se presenta una descripción de la zona de estudio, posteriormente se da una descripción detallada de los materiales y los métodos utilizados para probar la hipótesis planteada. Para responder al ¿Qué se obtuvo?, en la sección de resultados se describen las características cualitativas y cuantitativas obtenidas a partir de la reconstrucción 3D de las redes de macroporos encontradas en los núcleos de suelo con los que se trabajó, así como las variables fisicoquímicas obtenidas a partir de los análisis de laboratorio y los valores de la conductividad hidráulica saturada obtenidos a partir de las pruebas de flujo normal llevadas a cabo también en el laboratorio así como el respectivo análisis de complejidad para las redes de macroporos presentes en los núcleos. En esta sección se presentan también los gráficos de cajas y bigotes, de barras, diagramas de dispersión así como las tablas obtenidas, también los resultados de los análisis de correlación entre las variables fisicoquímicas, las variables cuantitativas y cualitativas de las redes de macroporos, los índices de complejidad y los valores de la conductividad hidráulica. Finalmente en la discusión y conclusiones generales se aborda la relación de los cambios en la estructura y complejidad de la macroporosidad del suelo en los diferentes usos de suelo y su impacto o no en la conductividad hidráulica cuantificada y en las variables fisicoquímicas presentes.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Preguntas de investigación.....	7
1.2 Hipótesis.....	7
1.3 Objetivos generales.....	7
1.4 Objetivos particulares.....	7
2 MARCO TEORICO	9
2.1 Aplicaciones de la tomografía computarizada en estudios del suelo.....	9
2.2 Flujo de agua y macroporos.....	12
2.3 Cambio de uso de suelo y flujo de agua.....	15
3 ÁREA DE ESTUDIO	17
3.1 Vegetación.....	18
3.2 Clima.....	19
3.3 Geología y suelos.....	19
4 MATERIALES Y MÉTODOS	21
4.1 Muestreo.....	21
4.2 Escaneo con Tomógrafo Computarizado de rayos X y reconstrucción 3D.....	23
4.2.1 Análisis por tamaño de poro y profundidades.....	27
4.3 Pruebas de conductividad hidráulica y análisis de laboratorio.....	28
4.4 Análisis de complejidad y estructura.....	30
4.5 Índices de ramificación y acoplamiento.....	32
4.6 Procesamiento estadístico.....	33
4.6.1 Estructura y complejidad.....	33
4.6.2 Correlaciones macroporosidad, K y propiedades fisicoquímicas.....	33
5 RESULTADOS	35
5.1 Escaneo TC y reconstrucción 3D.....	35
5.1.1 Variables descriptoras del espacio macroporoso.....	43
5.1.2 Variables descriptoras del espacio de mesoporos.....	46
5.2 Análisis fisicoquímico.....	49
5.2.1 Variables físicas.....	49
5.2.2 Propiedades químicas.....	52

5.3 Reconstrucción 3D cada 9 centímetros.....	53
5.3.1 Análisis fisicoquímico por profundidad.....	54
5.3.1.1 Variables físicas.....	54
5.3.1.2 Propiedades químicas.....	56
5.3.2 Análisis de varianza y correlaciones no paramétricas.....	57
5.3.3 Relación entre prof., var. descriptoras y propiedades fisicoquímicas.....	59
5.4 Análisis de complejidad.....	60
5.4.1 Análisis estructural.....	60
5.4.2 Análisis estructural para los poros con diámetro mayor de 0.5mm.....	62
5.5 Índices de complejidad.....	64
5.5.1 Índices de complejidad poros >0.5 mm.....	66
5.6 Pruebas de Conductividad Hidráulica Saturada.....	69
5.7 Correlaciones entre las variables descriptoras y la c. hidráulica saturada.....	71
5.7.1 Macroporos.....	71
5.7.2 Mesoporos.....	73
5.8 Correlaciones entre las variables fisicoquímicas y la c. hidráulica saturada.....	76
5.9 Correlaciones los índices de complejidad y la c. hidráulica saturada.....	78
6 DISCUSION.....	81
6.1 Respondiendo a las preguntas de investigación.....	81
6.2 Tomografía de rayos X y reconstrucción del espacio poroso del suelo.....	85
6.3 Sistema de extracción de muestras.....	87
6.4 Variables Fisicoquímicas.....	88
6.5 Modelo conceptual.....	88
7 CONCLUSIONES.....	93
8 REFERENCIAS.....	95

RESUMEN

Los bosques mesófilos resultan estratégicos en el manejo hidrológico debido a su producción y captación de agua, sin embargo el flujo de agua en el suelo y el comportamiento hidrológico en estos ambientes aun son poco comprendidos. La presencia de los macroporos en un sitio están condicionadas por el tipo de suelo, la estructura, edad y composición de la comunidades vegetales y de la fauna, así como por la historia de uso del suelo y su manejo, lo cual se ve reflejado en la estructura y complejidad de la red 3D de macroporos y condiciona la importancia funcional de los macroporos y sus efectos sobre el flujo de agua en el suelo. Para predecir su dinámica bajo diferentes usos de tierra, es necesario tener información sobre su arreglo y conformación espacial. Se analizó la red macroporos de tres usos de suelo, bosque mesófilo maduro (BM), bosque mesófilo secundario (BS) y pastizal (PA) empleando tomografía computarizada. El área de estudio se localiza en la región del Cofre de Perote del estado de Veracruz. Se extrajeron núcleos inalterados de suelo en cilindros de PVC con un sistema hidráulico portátil y se escanearon con un tomógrafo digital de rayos X. Se realizaron reconstrucciones 3D a empleando AMIRA 5.0. Se encontraron diferencias significativas en la estructura y complejidad de la red de macroporos entre los distintos usos de suelo. La red más compleja se encontró en el BM. El PA obtuvo la red menos compleja. El BS tuvo la red de macroporos más extensa. La mayoría de los macroporos correspondieron a raíces vivas, raíces en descomposición parcialmente rellenos con suelo y raíces antiguas. En estos sitios la red 3D actual de los macroporos del suelo que no corresponden con el uso del suelo actual, es una suma de la red de macroporos de la vegetación previa más la red de macroporos de la vegetación actual y esta red 3D actúa como un registro de “memoria” edáfica determinado por la historia de uso y manejo. Encontramos una diferencia estadística significativa para la K_{sat} entre los distintos sitios. El BS obtuvo el promedio más alto de K_{sat} seguido por el BM y por último el P. El efecto de la compactación del suelo en la superficie del P sobre la K_{sat} fue notable. Concluimos que la K_{sat} se encontró fuertemente vinculada a los macroporos del suelo.

Palabras clave: ciclo hidrológico, uso de suelo, macroporos, tomografía computarizada, memoria, bosque mesófilo, conductividad hidráulica saturada, flujo preferencial.

ABSTRACT

The cloud forests are strategic management in the water due to its production and water harvesting, however the flow of water in the soil and hydrological behavior in these environments are still poorly understood. The presence of macropores in a site are conditioned by soil type, structure, age and composition of the plant communities and wildlife, as well as the history of land use and management, which is reflected in the structure and complexity of the 3D network of macropores and determines the functional importance of the macropores and their effect on the flow of water in the soil. To predict its dynamics under different land uses, it is necessary to have information about their spatial arrangement and conformation. The macropore network of three land uses, mature cloud forest (BM), secondary cloud forest (BS) and pasture (PA) was analyzed using computed tomography. The study area is located in the region of the Cofre de Perote in the state of Veracruz. Undisturbed soil core PVC cylinders with a portable hydraulic system is extracted and scanned using a digital X-ray tomograph 3D reconstructions were performed using AMIRA 5.0. Significant differences in the structure and complexity of the network of macropores between different land uses found. The more complex network was found in the BM. The AP obtained the least complex network. The BS has the largest network of macropores. Most macropores corresponded to living roots, decaying roots and soil partially filled with ancient roots. At these sites the present 3D macroporous network soil would not correspond to the current land, is a sum of the network of macropores vegetation prior macropore network more current 3D vegetation and this network acts as a registration of 'memory' soil determined by their history of use and handling. We found a statistically significant difference for Ksat between different sites. The BS obtained the highest average Ksat followed by BM and finally the P. The effect of soil compaction on the surface of P on the Ksat was remarkable. We conclude that the Ksat was found strongly linked to soil macropores.

Keywords: water cycle, land use, macropores, CT scan, memory, cloud forest, saturated hydraulic conductivity, preferential flow.

1 INTRODUCCIÓN

El flujo de agua en el suelo es uno de los procesos del ciclo hidrológico más importantes y de los menos comprendidos, especialmente en ambientes no dedicados a la agricultura (Sobieraj, 2003). La conductividad hidráulica, definida como la capacidad de un medio poroso para transmitir agua (Porta *et al.*, 1999), es un proceso hidroedáfico clave y complejo, que es sensible a las alteraciones en el suelo producidas por cambios en la cubierta vegetal y el uso del suelo (Wit, 2001, Perkins *et al.*, 2007, Zimmermann y Elsenbeer 2008, Gómez-Tagle, 2008b), tanto que estos autores la utilizan como descriptor del proceso de infiltración. La conductividad hidráulica depende de las propiedades del medio poroso y de las condiciones en que éste se encuentre, por lo tanto la porosidad determina el flujo de agua en el suelo; además conocer su variación es importante para describir adecuadamente su comportamiento (Eguchi y Hasegawa 2008).

La porosidad edáfica se define como el espacio de suelo que no está ocupado por sólidos y que resulta de la agregación de las partículas minerales individuales, con participación de la materia orgánica (Porta *et al.*, 1999). Las características intrínsecas del suelo como la granulometría, la textura, la cantidad de humedad, la estructura, el contenido de materia orgánica, determinan la porosidad que podríamos llamar “primaria”, utilizando el término en forma análoga al empleado en geología. También puede depender de factores extrínsecos (porosidad secundaria) al suelo como la bioturbación, la cual a su vez se define como el desplazamiento físico de suelo o sedimento por acción de la fauna edáfica o la vegetación (Wilkinson *et al.*, 2009).

Los poros, que constituyen el espacio poroso del suelo, se encuentran en un rango continuo de tamaño, sin embargo se dividen usualmente en dos tipos: los macroporos y los microporos (Rucks *et al.*, 2004). Los microporos son los encargados de la retención del agua en suelo por capilaridad. Mientras que los macroporos favorecen la interconexión del suelo superficial y subsuperficial (Raty y Huhta, 2004). Los macroporos también tienen un impacto directo en el desarrollo microbiano, en la aireación del suelo, en la descomposición y transporte de la materia orgánica en el suelo, además incrementan el espacio poroso del suelo disminuyendo la densidad aparente (Gómez-Tagle, 2008) y aumentan la capacidad de

infiltración mediante la creación de vías de flujo preferencial de agua en el suelo (Pitkanen y Nuutinen, 1998).

La presencia y características de los macroporos en un sitio están condicionadas en primera instancia por el tipo de suelo, su granulometría y estructura (Porta *et al.*, 1999). En segunda instancia, por la estructura, edad y composición de las comunidades vegetales y de la fauna edáfica (Negrete-Yankelevich *et al.*, 2008), así como por la historia de uso del suelo y su manejo (Callahan *et al.*, 2006). En general, hay tres tipos principales de macroporos: 1) los bioporos creados por fauna edáfica (tales como lombrices de tierra o escarabajos) y la vegetación (penetración de raíces), 2) las fisuras formadas por humectación y secado o congelamiento y descongelamiento del suelo, y 3) los poros interagregados irregulares (Luo *et al.*, 2008).

Los distintos tipos de macroporos tienen geometrías diferentes y por lo tanto hidráulicamente funcionan de manera distinta (Luo *et al.*, 2008). Tanto la geometría como la funcionalidad pueden variar significativamente con la cobertura y usos del suelo (Zhou *et al.*, 2008; Gantzer y Anderson, 2002; Udawatta *et al.*, 2008; Mooney y Morris, 2008). Para entender la importancia funcional de los macroporos, sus efectos sobre el flujo de agua en el suelo y para predecir su dinámica bajo diferentes usos de tierra, es necesario tener información sobre su arreglo y conformación espacial (Joschko *et al.*, 1993; Lighthart *et al.*, 1993). Esto puede realizarse mediante la reconstrucción, la visualización y cuantificación tridimensional o 3D de la red de macroporos.

Sin embargo, esta reconstrucción, visualización y cuantificación 3D debe de hacerse mediante un método fiable, preciso, no destructivo y conveniente para la obtención de muestras de suelos naturales de tamaño adecuado para la medición de la variación espacial a pequeña escala. La mayoría de las técnicas generalmente usadas para estudiar la red de poros en el campo o en el laboratorio son altamente demandantes en tiempo y esfuerzo (com.per. Chaparro 2010, Capowiez *et al.*, 1998, Pierret *et al.*, 2002), tienen una capacidad limitada para observar la geometría 3D y la topología (Luo *et al.*, 2008), además solo proporcionan representaciones en dos dimensiones y solo de fragmentos de la red. Además

con estas técnicas, no siempre es posible realizar mediciones exactas y objetivas, necesarias para caracterizar la macroporosidad del suelo. Por lo tanto, estos métodos no pueden proporcionar una representación adecuada de la estructura inalterada de la macroporosidad del suelo.

En los últimos años, la tomografía computarizada de rayos X ha constituido una nueva y poderosa herramienta para los científicos, que permite obtener los parámetros estructurales del suelo tales como densidad o la porosidad (Anderson *et al.*, 1990, Perret *et al.*, 1999, 2000, Luo *et al.*, 2008). La técnica fue inventada en 1972 por el ingeniero británico Godfrey Hounsfield y por el físico sudafricano Allan Cormack, de la universidad Tufts de Massachusetts (Hounsfield 1972, 1973). Esta técnica es considerada rápida, no destructiva y precisa. Además ha permitido eliminar la subjetividad inherente de la separación visual de los macroporos del suelo de la matriz por parte del experimentador, y reduce la distancia de estudio entre dos secciones sucesivas de suelo (con distancias entre cortes ajustables, de decímetros a milímetros), proporcionando información en tres dimensiones para volúmenes considerables del suelo (entre 0.0001 y 0.04 m³). De esta forma, la tomografía computarizada de rayos X permite una representación global de la organización de la macroporosidad del suelo.

La fiabilidad e idoneidad de esta herramienta para la evaluación de la macroporosidad de suelos se ha probado en varios experimentos (Grevers 1989, Warner 1989, Peyton 1992). A partir de estos primeros estudios se han desarrollado varios trabajos enfocados en utilizar la tomografía computarizada de rayos X para caracterizar los efectos que tienen la fauna y la vegetación sobre la macroporosidad del suelo (Joschko *et al.*, 1991, 1993, Capowiez *et al.*, 1998, Jégou *et al.*, 1998, Pierret *et al.*, 2002, Luo *et al.*, 2008). Pero a pesar de existir una gran cantidad de literatura sobre tomografía computarizada y macroporosidad del suelo, muy pocos estudios (únicamente dos) han descrito cuantitativamente la estructura del suelo, especialmente la geometría de los macroporos, su topología y relacionado esta información con las propiedades hidráulicas del suelo en distintos usos de suelo (Lin, 2005, Luo *et al.*, 2008).

La caracterización, visualización y cuantificación 3D de las redes de macroporos y su relación con el flujo de agua en los diferentes usos del suelo, son esenciales para el desarrollo de las relaciones cuantitativas entre las características y funciones de los macroporos y las propiedades hidráulicas del suelo, así como para evaluar la potencial influencia de los macroporos sobre el flujo preferencial (Jarvis, 2007). Este conocimiento mejoraría nuestra capacidad de entender y predecir el flujo de agua a través de sus diferentes vías en suelos estructurados.

En este trabajo se cuantificó la estructura y la complejidad de la red de macroporos del suelo mediante tomografía computarizada de rayos X en distintos usos de suelo, con el fin de observar si existen diferencias cuantitativas y cualitativas en la red de macroporos entre sitios de bosque y sus ambientes de transformación y relacionar la complejidad de la macroporosidad del suelo con la conductividad hidráulica del suelo en diferentes usos .

1.1 Preguntas de investigación

¿Existen diferencias cuantitativas y (de forma) en la macroporosidad edáfica entre las diferentes coberturas vegetales y usos de suelo?, ¿Estas diferencias se ven reflejadas en la conductividad hidráulica de los sitios?

1.2 Hipótesis

1.2.1 La cobertura vegetal y el uso de suelo influyen en las características cualitativas y cuantitativas de la red de macroporos del suelo, de forma que, existe un gradiente asociado al estado de conservación de la cobertura vegetal; bosques maduros tendrán una mayor extensión, complejidad y continuidad de la red de macroporos, los pastizales tendrán la menor extensión, complejidad y continuidad de la red y los bosques secundarios se encontraran en un punto intermedio.

1.2.2 Las diferencias en la red de macroporos asociadas a la cobertura vegetal se verán reflejadas en la conductividad hidráulica saturada. De manera que a menor extensión, complejidad y mayor continuidad de la red de macroporos, habrá mayor conductividad hidráulica.

1.3 Objetivo General:

Estudiar la relación entre la cobertura vegetal/uso de suelo y la complejidad del espacio macroporoso asociado a fauna edáfica y raíces vegetales mediante tomografía computarizada de rayos X y determinar el efecto que tiene esta complejidad sobre la conductividad hidráulica, para generar un modelo conceptual del fenómeno.

1.4 Objetivos Particulares:

- Cuantificar la relación entre el uso de suelo y la complejidad de la macroporosidad edáfica empleando tomografía computarizada de rayos X.
- Relacionar el efecto de la complejidad de la macroporosidad con la conductividad hidráulica del suelo en sitios con diferente uso de suelo.
- Generar un modelo conceptual del fenómeno.

Para poner a prueba la hipótesis se trabajó con núcleos de suelo inalterados extraídos directamente de campo, en sitios de bosque mesófilo maduro, bosque mesófilo secundario y pastizal, que engloban los cambios graduales de perturbación dominantes en la región de bosque mesófilo del centro del estado de Veracruz. El trabajo se realizó en seis laderas distintas, dos para bosque mesófilo maduro, dos para bosque mesófilo secundario y dos para el pastizal. La primera etapa consistió en la adquisición de tres núcleos de suelo de cada una de las seis laderas, a fin de tener seis núcleos de suelo para cada uso de suelo distinto.

La segunda etapa consistió en el escaneo de los núcleos de suelo con un tomógrafo digital de rayos X para la adquisición de las imágenes digitales, a partir de las cuales se hizo la reconstrucción de las redes de macroporos y se realizaron análisis de laboratorio en muestras alteradas e inalteradas, a fin de conocer el comportamiento de las principales variables fisicoquímicas y hacer las pruebas de conductividad hidráulica saturada.

La tercera etapa consistió en el análisis estadístico de los datos cualitativos y cuantitativos adquiridos a partir de las reconstrucciones 3D de las redes de macroporos, los análisis fisicoquímicos y las pruebas de conductividad hidráulica. Los resultados de este trabajo contribuyen a enriquecer el conocimiento del efecto del cambio de uso de suelo en el medio edáfico, particularmente en la macroporosidad y la capacidad de infiltración del suelo.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Aplicaciones de la tomografía computarizada en estudios del suelo

La posibilidad del uso de la tomografía computarizada de rayos X en las ciencias del suelo fue reconocida pocos años después de su invención debido a que es una técnica no-destructiva y no-invasiva para observar el “interior” de los objetos de interés. Permite hacer mediciones repetidas de la misma muestra, dando lugar a un gran número de publicaciones a partir de los años 1980.

A continuación se mencionan algunos de los primeros trabajos en aplicar la tomografía computarizada en estudios fuera de las ciencias médicas y de la salud (Tabla 1).

Tabla 1.- Principales usos de la tomografía fuera de las ciencias médicas y de la salud.

Área	Uso	Autores (año)
Edafología	Determinación de la densidad aparente del suelo	Petrovic, et al., 1982).
	Análisis de distribución espacial del contenido de agua en el suelo	Hainsworth y Aylmore 1983.
	Cambios en el suelo durante una tormenta	Fohrer et al., 1999.
	Influencia de la textura en los cambios de flujo en macroporos	Mori et al., 1999.
Meteoritos	Inclusiones minerales dentro de meteoritos	Arnold et al., 1982.
Geología del petróleo	Exploración del interior de algunas rocas	Vinegar, 1986.
	Estudio del flujo de agua entre rocas	Vinegar et al., 1986.
	Dispersión y distribución espacial de los poros en rocas	Peters et al., 1996.
Paleontología	Análisis y reconstrucción 3D de un fósil de <i>Archeopteryx</i>	Haubitz et al., 1988.

	Comparación de huesos de alosauros, cocodrilos y aves desde una perspectiva evolutiva.	Rogers1999.
	Mimetización de los fósiles de Archaeoraptor	Rowe et al., 2001.
Geotécnica	Análisis de la estructura interna de rocas y caracterizaron su deformación mecánica	Raynaud et al.,1988.
	Revisión de las posibles aplicaciones de la tomografía en la sedimentología	Kenter,1988.
Sedimentología	Análisis cuantitativo de la textura de rocas metamórficas	Denison y Carlson1997.
	Abundancia de minerales en mininúcleos de montículos hidrotermales	Tivey,1998.
	Cuantificación de las redes de macroporos en núcleos de suelo inalterados	Perret, et al., 1999.
Macroporosidad	Reconstrucciones tridimensionales de las redes de macroporos construidas por lombrices de tierra	Capowiez, et al., 1998.
	Visualización y cuantificación de la macroporosidad el suelo y los patrones de flujo de agua	Mooney,2002.
	Reconstrucción y cuantificación de los macroporos del suelo	Pierret, et al., 2002.
	Análisis de un reservorio de rocas	Van Geet, et al., 2000.
Geología	Análisis de las inclusiones dentro de los diamantes	Taylor et al., 2000.
	Creación de porfidoblastos por múltiple nucleación	Spiess et al., 2001.

	Absorción y el transporte de gas en la microestructura del carbón mineral	Karacan y Okandan,2001.
Flujo de agua y solutos	Creación de un modelo de transporte de solutos	Perret et al., 2000.
	Observación del flujo de agua en el suelo cuantificando propiedades hidráulicas	Kasteel et al., 2002.

Estos trabajos pioneros sentaron las bases para estudios posteriores y permitieron el desarrollo de los métodos para la determinación de variables específicas relacionadas con los parámetros estructurales del suelo. El primer estudio con este enfoque fue el trabajo de Petrovic *et al.* (1982), donde se determinó la densidad aparente del suelo en tres dimensiones evaluando la precisión de la tomografía computarizada. Posteriormente en Brasil, el estudio realizado por Crestana *et al.* (1985) fue considerado el primero en utilizar la tomografía computarizada de rayos X para realizar mediciones de flujo de agua horizontal y vertical en el suelo. Después Anderson *et al.* (1988) determinaron que existe una relación lineal entre el coeficiente de atenuación y la fracción de volumen de sólidos del suelo.

Otra área importante dentro del estudio de suelos donde se ha evaluado la fiabilidad e idoneidad de la tomografía computarizada de rayos X es el análisis de la macroporosidad del suelo. Grevers *et al.* (1989) compararon estimaciones de macroporosidad entre la técnica de impregnación de resinas y la tomografía computarizada, demostrando la ocurrencia de artefactos asociados a la técnica de impregnación de resinas. Warner *et al.* (1989) realizaron una de las primeras caracterizaciones de macroporos del suelo usando tomografía computarizada, mientras que Anderson *et al.* (1990) analizaron la capacidad y los límites de la tomografía computarizada, para detectar la forma y tamaño, así como las variaciones de la porosidad. Peyton *et al.* (1992) utilizaron la tomografía para medir el diámetro de macroporos en suelos inalterados.

Sin embargo, no fue sino hasta 1991 que surgieron los primeros estudios enfocados a la macroporosidad producida por bioturbación. Joschko *et al.*, en 1991 propuso un método no

destrutivo para la evaluación morfológica del sistema de túneles de las lombrices en tres dimensiones utilizando tomografía computarizada y en 1993 evaluó un sistema de túneles hecho por lombrices de tierra usando el método propuesto en 1991 (Joschko *et al.* 1991, 1993). A partir de estos dos primeros trabajos se han desarrollado varios estudios enfocados en utilizar la tomografía computarizada de rayos X para caracterizar los efectos que tienen la fauna (Capowiez *et al.*, 1998 2011; Jégou *et al.*, 1998, Pierret *et al.*, 2002, Bastardie *et al.*, 2005) y la vegetación (Aylmore 1993, Heeraman *et al.*, 1997) sobre la macroporosidad del suelo.

A pesar de que en la actualidad existe una cantidad considerable de trabajos especializados que tratan sobre la porosidad del suelo y la tomografía computarizada, pocos estudios han descrito cuantitativamente la estructura del suelo, especialmente la geometría y complejidad de los macroporos en distintos usos de suelo, ligándola con las propiedades hidráulicas de éste (Luo *et al.*, 2008). La caracterización, visualización y cuantificación 3D de las redes de macroporos y su relación con el flujo preferencial y el transporte en diferentes usos del suelo son esenciales para el desarrollo de las relaciones cuantitativas entre las características de los macroporos del suelo y las propiedades hidráulicas (Luo *et al.*, 2008), así como para evaluar el potencial de los macroporos en el flujo preferencial (Jarvis, 2007), lo que mejorará nuestra capacidad para predecir y entender el flujo de agua en suelos estructurados.

2.2 Flujo de agua y macroporos

El flujo de agua en el suelo es uno de los procesos del ciclo hidrológico más importantes y de los menos comprendidos (Sobieraj, 2003). El flujo de agua en el suelo, puede darse por dos vías, la primera llamada matricial en la cual el agua atraviesa la matriz a través de los poros que esta contiene y la segunda llamada preferencial en donde el agua fluye por vías rápidas evitando el paso por la matriz.

El flujo preferencial es un proceso complejo, que tiene gran importancia en la respuesta hidrológica y calidad del agua. Este proceso depende de la estructura del suelo, de las propiedades del medio poroso y de las condiciones en que éste se encuentre (Eguchi y Hasegawa, 2008). El flujo preferencial se ha vinculado a la presencia de macroporos,

aunque también ha sido detectado en suelos donde el flujo matricial se consideraba como predominante (Eguchi y Hasegawa, 2008).

Actualmente se reconoce que los fenómenos de flujo preferencial y transporte por macroporos son omnipresentes en los suelos (Clothier *et al.*, 2008). La importancia de los macroporos en las funciones hidrológicas del suelo fue reconocida desde finales del siglo 19 (Lawes *et al.* 1882) y varios estudios demostraron la importante función ecológica que juegan los macroporos en la infiltración y flujo de agua en el suelo (Elkins *et al.* 1986, Lee & Foster 1991, Lobry de Bruyn & Conacher 1994, Lin *et al.* 2005, Luo *et al.* 2008, Zimmerman *et al.* 2008, Collof *et al.* 2010).

Los macroporos se definen como aquellos poros del suelo con diámetros equivalentes mucho más grandes que los existentes entre las partículas del suelo (Peyton *et al.*, 1992). En general, existen tres tipos principales de macroporos (Fig. 2): a) bioporos creados por la fauna edáfica (tales como lombrices de tierra) y la vegetación (penetración de raíces), b) fisuras formadas por la humectación y el secado o congelamiento y descongelamiento del suelo y c) poros interagregados irregulares (Luo *et al.* 2008).

El flujo de agua en el suelo se rige principalmente por el suministro de agua que llega a los macroporos, el flujo en los macroporos, y la transferencia de agua desde los macroporos a la matriz del suelo circundante (Beven y Germann, 1982, Buttle y House 1997, Faeh *et al.* 1997). Esto depende en gran medida de su geometría en 3D, variación, organización espacial, morfología y topología (Perret *et al.* 2000, Pierret *et al.* 2002, Bastardie *et al.* 2003; Haws and Rao, 2004; Peth *et al.* 2008), características que pueden ser significativamente diferentes bajo distintos usos de suelo (Zhou *et al.* 2008, Gantzer y Anderson, 2002, Udawatta *et al.* 2008, Mooney y Morris 2008).

Aunque el volumen de los macroporos es generalmente pequeño (<5%), puede tener un efecto sobresaliente en el flujo de agua y transporte de solutos (Perret *et al.* 2000). Alaoui y Helbling (2006) encontraron que el volumen de macroporos representa entre el 0.23 y el 2.0% del volumen total del suelo, pero llega a conducir entre el 74 y 100% del flujo total de

agua. Por otro lado Lin *et al.* (1996) reportaron que el 10% del volumen de suelo asociado a macroporos aportó cerca del 89% del flujo total de agua en el suelo.



Figura 2.- Tipos principales de macroporos, a) bioporos, b) fisuras de desecación y c) poros interagregados. Fuentes de figuras y graficas

La importancia de los macroporos como un mecanismo de flujo preferencial y de transporte de solutos ha sido reevaluado durante las últimas décadas (Beven y Germann, 1982; Barbash y Resek, 1996). Sin embargo, la adecuada descripción de su funcionamiento dentro del *continuum* edáfico sigue siendo uno de los retos no resueltos en la física e hidrología de suelos. Esto se debe a la falta de un enfoque eficaz para cuantificar la estructura del suelo, especialmente las características de los macroporos y relacionarlos con las propiedades hidráulicas del suelo, resultando en la falta de una estimación precisa del flujo y transporte en suelos estructurados y con presencia de macroporos de diversos orígenes (Flühler *et al.* 1996, Feyen *et al.* 1998, Šimůnek *et al.* 2003).

2.3 Cambio de usos de suelo y flujo de agua

Los impactos de los cambios en el uso de suelo sobre la dinámica del ciclo del agua han sido investigados y documentados en varias regiones del mundo (Cherkauer *et al.* 2000, Goteti y Lettenmaier, 2001; Yin y Li, 2001; Van der Molen, 2002; Yang *et al.*, 2002, Bruijnzeel 2006). Después del cambio de uso de suelo, las características físicas de la vegetación reemplazante (por ejemplo, la masa, profundidad, volumen de raíces, biomasa total, las características del dosel incluyendo el índice de área foliar, morfología de las hojas) difieren de la original. Los mecanismos y las vías de partición de agua de lluvia (intercepción del dosel, la infiltración y el encharcamiento de agua) serán diferentes a las de la vegetación reemplazada (Bruijnzeel *et al.* 2000, Bruijnzeel 2004, Giambelluca 2002, Zimmermann *et al.* 2006).

Estos cambios pueden derivar en impactos sobre la hidrología continental de distintas temporalidades, alterando el balance entre la precipitación, la evapotranspiración y el escurrimiento (Li *et al.* 2007). En el corto plazo, pueden alterar el ciclo hidrológico en cuencas mediante el incremento o bien disminución del rendimiento hídrico, o incluso eliminar el caudal base en algunas circunstancias durante las épocas de estiaje (Croke *et al.* 2001, Bruijnzeel 1990, 2004). En el largo plazo, las reducciones en la evapotranspiración y en el reciclaje de agua hacia la atmósfera, pueden accionar mecanismos que conlleven a una progresiva reducción de la precipitación a escalas regionales y subcontinentales (Savenije, 1996,; D'Almeida *et al.*, 2006).

La reducción de la infiltración se reporta frecuentemente como una consecuencia del cambio de uso de suelo (Ziegler y Giambelluca, 1997; Sidle *et al.* 2006; Tobón *et al.* 2004). Una consecuencia es un aumento en el flujo hortoniano, causado cuando la intensidad de lluvia supera la capacidad de infiltración y de almacenamiento del suelo (Horton, 1933), lo cual conduce a escurrimientos superficiales que pueden incrementar la erosión y la pérdida de suelo.

La interacción entre el tipo y uso de suelo así como el cambio en la composición florística, la edad del bosque y la estructura de la comunidades vegetales tienen también impacto en el

número, la tortuosidad y el radio hidráulico de los macroporos causados por bioturbación (Luo *et al.* 2008; Colloff *et al.* 2010). La investigación de macroporos en diferentes usos de suelo es fundamental para evaluar el potencial de flujo preferencial al interior del suelo (Jarvis, 2007).

En este trabajo se cuantificó la estructura y complejidad de los macroporos en distintos usos de suelo: Bosque mesófilo maduro, Bosque secundario y Pastizal, mediante una serie de variables descriptoras obtenidas a partir de la tomografía computarizada de rayos X, para observar los cambios cuantitativos y cualitativos en la red de macroporos entre los distintos usos y relacionar estos cambios en la macroporosidad con la conductividad hidráulica del suelo. El propósito fue observar si existe un cambio entre los valores de la conductividad hidráulica saturada con respecto a los distintos usos de suelo y cuantificar también el cambio en las características cuantitativas y cualitativas de la red de macroporos entre los distintos uso, a fin de relacionar los cambios de las características de la red de macroporos y los valores de K_{sat} . Cabe señalar que en este estudio se trabajó con muestras inalteradas de suelo extraídas directamente de campo, lo cual es raro en este tipo de trabajos, ya que la gran mayoría se realiza con muestras alteradas o recompactadas en laboratorio (p. ej., Joschko *et al.* 1991, 1993; Capowiez *et al.* 1998, 2011).

3 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en el municipio de Coatepec, dentro de la subcuenca “Los Gavilanes” (Figura 3), en la parte alta de la cuenca La Antigua, entre las coordenadas 97°06'09.46" y 96°59'52.67" W y 19°31'46.38" y 19°27'33.2" N, en la Reserva municipal “La Cortadura” ubicada a 12.5 km al oeste de la ciudad de Coatepec en el estado de Veracruz en el este del centro de México. La cuenca del río Gavilanes cuenta con una superficie de 36.8 km² y una longitud de 15 kilómetros de longitud, y es de tipo exorreico. Se ubica en la ladera de barlovento en el estrato-volcán del Cofre de Perote dentro de la Cuenca del Río Papaloapan.

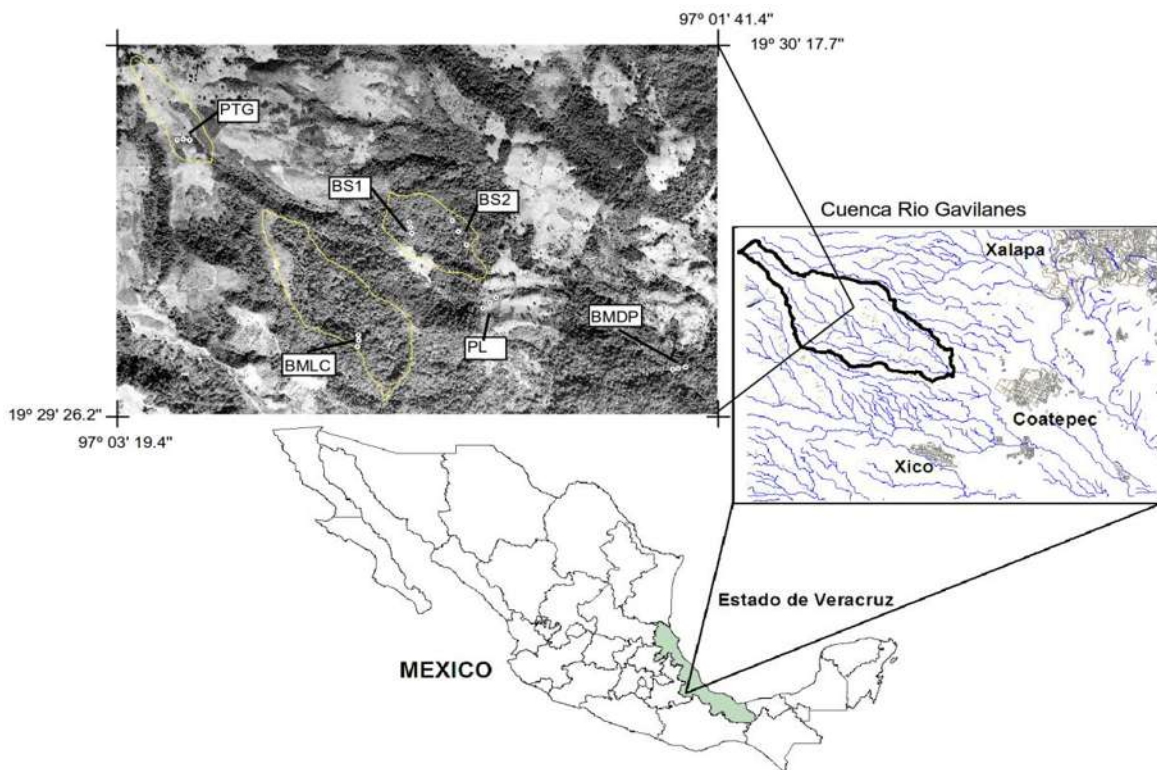


Figura 3.- Cuenca del río Gavilanes, Veracruz, México. PTG: pastizal Tierra Grande, BS1: bosque secundario 1, BS2: bosque secundario 2, PL: pastizal Leónides, BMLC: bosque maduro La Cortadura, BMDP: bosque maduro Don Pedro.

Esta zona se caracteriza por una densa red de drenaje en la que predominan los escurrimientos temporales y efímeros de primer y segundo orden (García-Coll, 2004). El desnivel altitudinal es de 1970 m, iniciando desde una altitud mínima de 1180 m hasta alcanzar una máxima de 2960 m con un promedio de 2170 m. El terreno es montañoso y

disecado, dominan las pendientes fuertes a muy fuertes (20° a 45°) que cubren más de la mitad (52%) de la superficie de la cuenca (Muñoz-Villers 2008).

3.1 Vegetación

A continuación se presenta la tabla (Tabla 2) con los principales tipos de vegetación y usos de suelo presentes en la cuenta:

Tabla 2.- Principales tipos de vegetación y usos de suelo presentes en la cuenta

Uso de suelo	Tipo de vegetación	Porcentaje en la cuenca
Bosque de niebla maduro	<i>Quercus germana</i> , <i>Q. salicifolia</i> , <i>Q. xalapensis</i> , <i>Juglans sp.</i> , <i>Liquidamber styraciflua var. mexicana</i> , <i>Cornus disciflora</i> , <i>Carpinus caroliniana</i> , y <i>Ostrya virginiana</i> , varias especies de la familia <i>Bromeliaceae</i> y especies de orquídeas.	36.3
Bosque secundario	Esta compuesto predominantemente por <i>Alnus jorullensis</i> , también están presentes las especies de <i>Miconia glaberrima</i> , <i>Prunus tetradenia</i> , <i>Quercus corrugada</i> y <i>Clethra microphylla</i> ; también hay una alta abundancia del helecho <i>Pteridium sp.</i>	17.71
Pastizal	Es resultado del aclareo del bosque original y con uso ganadero desde hace más de 30 años; la vegetación comprende plantas de uso pastoril como: <i>Alchemilla pectinada</i> , herbáceas de la familia <i>Rosaceae</i> y <i>Axonaputs compressus</i>	21.08
Bosque de pino	Está compuesto de <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>P. Ayacahuite</i> y <i>P. Patula</i> mezclados con <i>Abies spp.</i> , <i>Cupressus spp.</i>	14.55
Estrato arbustivo	Se compone de especies de <i>Bacharis</i> Y <i>Pteridium</i>	3.03
Cafetales, huertas agrícolas y asentamientos humanos.	<i>Coffea Arabica</i> , <i>Coffea Robusta</i> , <i>Zea mays</i> ,	5.03

Fuente

3.2 Clima

Las condiciones ambientales son el resultado de tres subtipos climáticos diferentes de acuerdo al sistema Köppen modificado por García (2004): subtropical húmedo en la parte inferior, templado y húmedo en el medio, y templado frío húmedo en la parte más alta (Gómez-Tagle *et al.*, 2011). El clima se ve influenciado por los vientos alisios y el cinturón subtropical de alta presión (Metcalf, 1987), por lo que se distinguen tres periodos: una temporada de lluvias de mayo a octubre; una época seca y fría con influencia de “Nortes” de noviembre a febrero y una época seca y cálida de marzo a abril (Holwerda *et al.* 2010). La precipitación promedio es de 2500 mm al año, en la parte alta y baja la cuenca recibe cantidades similares de precipitación durante el año, mientras que la parte central recibe una cantidad significativamente mayor (Geissert 1999).

La temperatura media anual oscila entre los 12° y los 18° C (Holwerda *et al.* 2010). El mes más caliente es Mayo y el más frío es Enero. La intercepción de niebla ocurre exclusivamente durante la estación seca y representa $\leq 2\%$ de la precipitación anual (Holwerda *et al.* 2010). La evapotranspiración potencial anual estimada por el método de Thornthwaite modificado (1948) para la cuenca es de 964.7 mm y el balance anual de agua estimado es de +1222.5 mm (Gómez-Tagle *et al.*, 2011). La parte baja de la cuenca tiene siete meses (Noviembre-Mayo) de balance hídrico negativo, mientras que la parte alta tiene sólo tres (Marzo-Abril y Diciembre). Las cifras del balance hídrico para la parte media indican sólo un mes de déficit (Marzo). Todas las estimaciones del balance hídrico resultan positivas lo que indica superávit anual total de agua en toda la cuenca (Gomez-Tagle *et al.*, 2011).

3.3 Geología y suelos

La geología de la región está conformada por la acumulación de andesita del Oligoceno-Neógeno (Terciario) recubierta por capas delgadas de cenizas volcánicas, basalto y flujos piroclásticos, provenientes de los distintos eventos eruptivos del Cofre de Perote y de la Caldera de Los Humeros, durante el Pleistoceno inferior y medio (Geissert *et al.*, 1994, 1999; Meza y Geissert 2007). Desde el punto de vista geomorfológico es un sistema joven, el cual aún sigue siendo modelado por procesos de erosión fluvial característica del clima

húmedo.

Los Andosoles úmbricos (FAO-UNESCO 1997) ó Andosoles taptohídricos (según WRB, 2007) son los suelos dominantes derivados de cenizas volcánicas (Geissert *et al.* 1994). Por lo general son suelos profundos (> 200 cm) con una morfología de horizontes de tipo A-C y varios subhorizontes. La textura es limo-arcillosa compuesta de 44% de limo, 21% de arena y 34% arcilla en promedio y el contenido de materia orgánica es alto (Marín-Castro 2010). Las propiedades físicas particulares son la baja densidad aparente (0.2-0.6 g cm⁻³) y la alta porosidad (80%), lo cual favorece la aireación, la alta retención de agua dentro del suelo y la conductividad hidráulica (Juo y Franzluebbers 2003).

Los suelos se desarrollaron sobre brechas volcánicas andesíticas permeables, moderadamente erosionadas sustentada a su vez por saprolita permeable que ha resistido la fractura de la roca andesítica-basáltica. La profundidad hasta la roca madre oscila aproximadamente entre 4 m y 10 m (Muñoz-Villers, 2012).

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Muestreo

Se seleccionaron seis sitios de muestreo teniendo dos sitios distintos para cada una de las siguientes coberturas vegetales: Bosque mesófilo maduro, Bosque secundario y Pastizal. De cada sitio se extrajeron tres núcleos inalterados de suelo, a lo largo de una toposecuencia, uno en la parte alta, otro en la parte media y el último en la parte baja de la ladera. El muestreo se efectuó al final de la temporada de estiaje (abril), y al finalizar el muestreo se obtuvieron 18 núcleos de suelo, seis para cada tipo de vegetación. Además se extrajeron muestras alteradas de suelo en cada uno de los sitios para los análisis fisicoquímicos, en los puntos inmediatos a los de extracción de las muestras inalteradas (< 50 cm), a cada 10 cm de profundidad hasta los 40 cm. Para el muestreo se trabajó con tubos de PVC de 16 centímetros de diámetro interno y 4.5 mm de grosor de pared, por 45 centímetros de largo. Se trazó un transecto paralelo a la pendiente de 150 metros de largo, en el cual se marcaron tres puntos, en la parte alta, otro en la parte media y el último en la parte baja. De cada punto se extrajo una muestra de suelo inalterado con los tubos de PVC en cada uno de los seis sitios de muestreo, los cuales se insertaron al suelo mediante un sistema de presión hidráulico diseñado especialmente para el experimento y que reduce el riesgo de deformación de la estructura interna del suelo (Figura 4).



Figura 4.- Sistema hidráulico de extracción de núcleos, a) placas de metal, b) tensores, c) bandolas, d) cadena, e) gato hidráulico, f) poste ganadero metálico.

El sistema de extracción consta de dos placas de metal (25 x 25 cm, 1 cm de grosor) una de las placas tiene cuatro agujeros en las esquinas, cuatro tensores de metal (tamaño 3/8 por 10¹/₄, capacidad 160 kg), ocho bandolas de acero con seguro (tamaño 3/8, capacidad 1200 kg), cuatro tramos de cadena (tamaño 3/8, largo 1.5m), cuatro postes ganaderos metálicos (largo 1.83 m) y por último, un gato hidráulico de botella para 2.5 toneladas con tramo telescópico y tiro efectivo de 32.8 cm.

El sistema funciona de la siguiente manera (Figura 5): primero se define el sitio de inserción del tubo PVC y se anclan los postes ganaderos al suelo siguiendo un patrón en forma de cruz. Los postes se insertan a una distancia aproximada de 50 cm del sitio donde se va a poner el tubo de PVC (Figura 5a). A continuación se coloca el tubo de PVC sobre el suelo presionándolo un poco contra éste, de forma que se mantenga en pie por si solo (Figura 5b). Después se coloca la placa de metal sin los agujeros por encima del tubo de PVC, se pone el gato hidráulico sobre la placa, mientras a la placa que tiene los cuatro agujeros se le coloca una bandola con un tensor en cada uno de los cuatro agujeros (Figura 5c). Tras de colocar las bandolas y los tensores a la placa con los agujeros, ésta se coloca sobre el pistón que se eleva del gato hidráulico (Figura 5d). Para esta operación se requiere que una persona detenga la placa con las bandolas, y que otra fije las cadenas a los postes ganaderos y asegure las bandolas a los tensores. Los tensores se emplean para tensar al máximo las cadenas y la placa de metal situada en la parte superior del gato hidráulico.



Figura 5.- Funcionamiento del sistema hidráulico extractor de núcleos, a) colocación de los postes, b) acomodo del tubo de pvc, c) colocación de bandolas y tensores, d) anclaje de cadena a poste ganadero.

Una vez que el sistema está tenso y se mantiene en pie por si solo, se extiende el pistón del gato hidráulico, hasta su máxima capacidad. Si el tubo no ha penetrado completamente en el suelo, entonces se libera la presión del gato hidráulico y se comprime el vástago hasta que llegue a su posición de reposo. Después se vuelve a tensar el sistema y se extiende otra vez el pistón del gato hidráulico, y así sucesivamente hasta insertar el tubo de PVC completamente.

Una vez insertado el tubo de PVC (Figura 6a) es necesario excavar y remover el suelo alrededor para realizar una extracción más sencilla y cuidadosa de los núcleos (Figura *b). Una vez extraídos, los núcleos de suelo fueron forrados con plástico y materiales protectores (Figura 6c) para un traslado más seguro al laboratorio, donde se les agregaron 100 ml de cloroformo (Bastardie *et al.*, 2005) para evitar la creación de nuevos macroporos por actividades de la fauna después de la extracción. Por último, las muestras se trasladaron del laboratorio al sitio de escaneo (Figura 6d).



Figura 6.- a) el tubo de PVC insertado en el suelo, b) se excava la tierra alrededor del tubo, c) se envuelve en plástico para su traslado a laboratorio, d) escaneo del núcleo.

4.2 Escaneo con Tomógrafo Computarizado de rayos X y reconstrucción 3D

Los núcleos inalterados de suelo se trasladaron a la empresa CT Scanner Lomas Altas (México, D.F.) donde fueron escaneados con un tomógrafo computarizado helicoidal

General Electric de cuarta generación. Es un escáner médico que tiene una matriz máxima de píxeles de 512 x 512 con una distancia mínima entre cortes de 0.62 mm y un máximo de 2000 cortes en una longitud máxima de 1.70 metros, con una potencia de 80 kilovatios a 250 microamperios. Varias fuentes de rayos X (y los detectores asociados) giran en torno a la muestra a una velocidad de 60 cortes por minuto generando imágenes digitales. En este tipo de escaneo, la intensidad del rayo en el detector sigue una ley negativa exponencial de atenuación, que depende principalmente de la naturaleza de los materiales encontrados y el espesor de la muestra penetrada. El resultado de una sesión de escaneo de un núcleo es un conjunto de imágenes 2D transversales, que representan cortes transversales de la muestra (Figura 7).

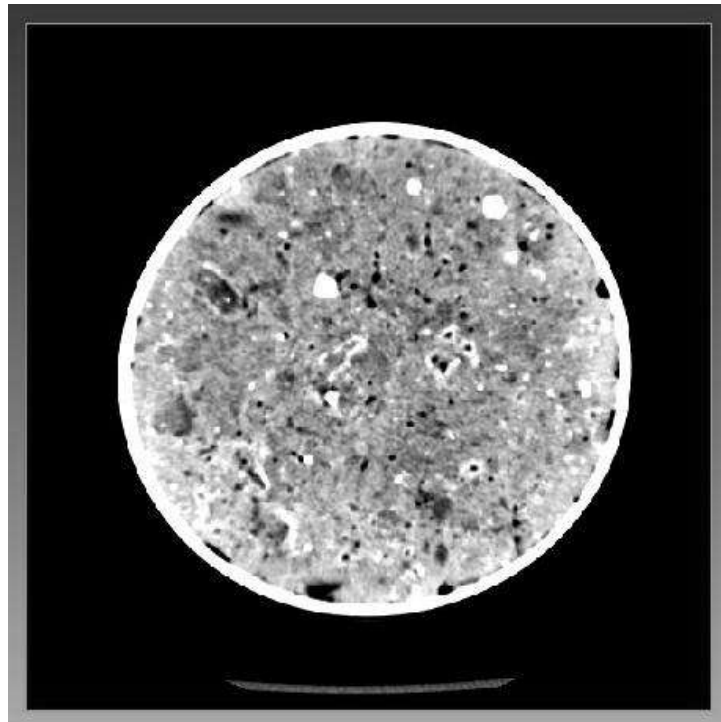


Figura 7.- Imagen en 2D de un núcleo de suelo muestreado, resultado del escaneo con el tomógrafo digital de rayos X.

Las imágenes 2D para este trabajo tuvieron una resolución de 0.445 mm x 0.445 mm x 2.5 mm y fueron procesadas con el software AMIRA v5.0 (Visage Imaging), siguiendo el procedimiento que se detalla a continuación.

Primero se hicieron recortes en las imágenes a fin de evitar errores derivados de la técnica de muestreo y evitar cuantificar objetos que no sean matriz de suelo, como por ejemplo el

tubo de PVC. Estos recortes fueron de 226 x 198 x 129 (píxeles), lo que representa un volumen de 2857.74 cm³ para todos núcleos, a excepción de los sitios de bosque maduro La Cortadura arriba y el bosque secundario 2 arriba, los cuales se recortaron con límites de 226 x 198 x 93 (píxeles), lo que represento un volumen de 2060.23 cm³.

Segundo, se realiza la segmentación de las imágenes 2D a partir de un valor umbral que se selecciona a partir de pruebas y calibración de las muestras empleando el histograma de valores de atenuación en la escala de grises que genera el programa AMIRA (Figura 8), lo cual permite distinguir el espacio poroso (poros llenos de aire o agua) de la matriz de suelo (matriz de suelo y clastos). En este caso se seleccionó el valor umbral a partir de pruebas y calibración de las muestras, empleando la escala Hounsfield (Capowiez *et al.* 1998), quedando como valor umbral máximo -180 y como valor umbral mínimo -1024.

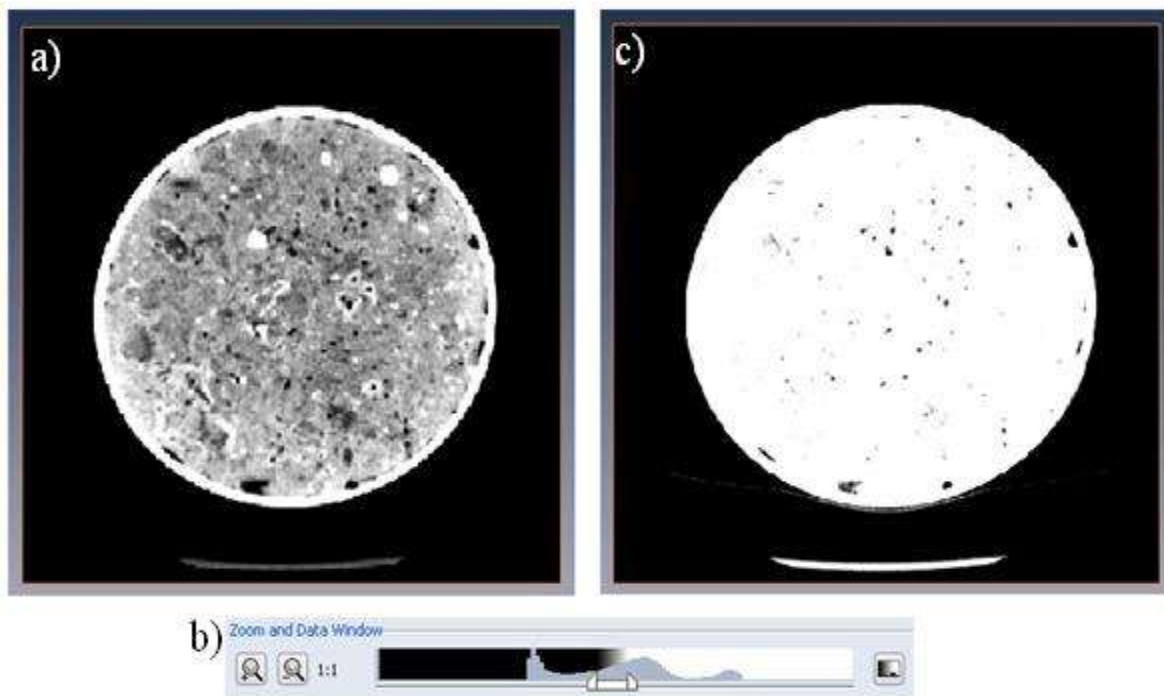


Figura 8.- a) Imagen 2D obtenida a partir del escaneo, b) Histograma de valores de atenuación en la escala de grises, c) Imagen 2D después de la segmentación a partir del histograma de grises.

A partir de la segmentación de las imágenes en 2D, se generó la reconstrucción 3D del espacio poroso mediante el cálculo de la superficie isométrica (Figura 9b), a través de la interpolación de los valores digitales del valor umbral (Figura 10a). Para la evaluación de la continuidad de los poros entre las imágenes sucesivas, el algoritmo de interpolación aplica

el criterio de superposición de McDonald *et al.* (1986), el cual menciona que para cada objeto seleccionado ($O(i)$) en una imagen ($I(j)$), la continuidad del macroporo se determina mediante la proyección vertical de este objeto en la imagen siguiente, $I(j+1)$. Todos los objetos que tienen al menos un píxel en común con el objeto proyectado ($O(i)$), se consideran conectados (Figura 10).

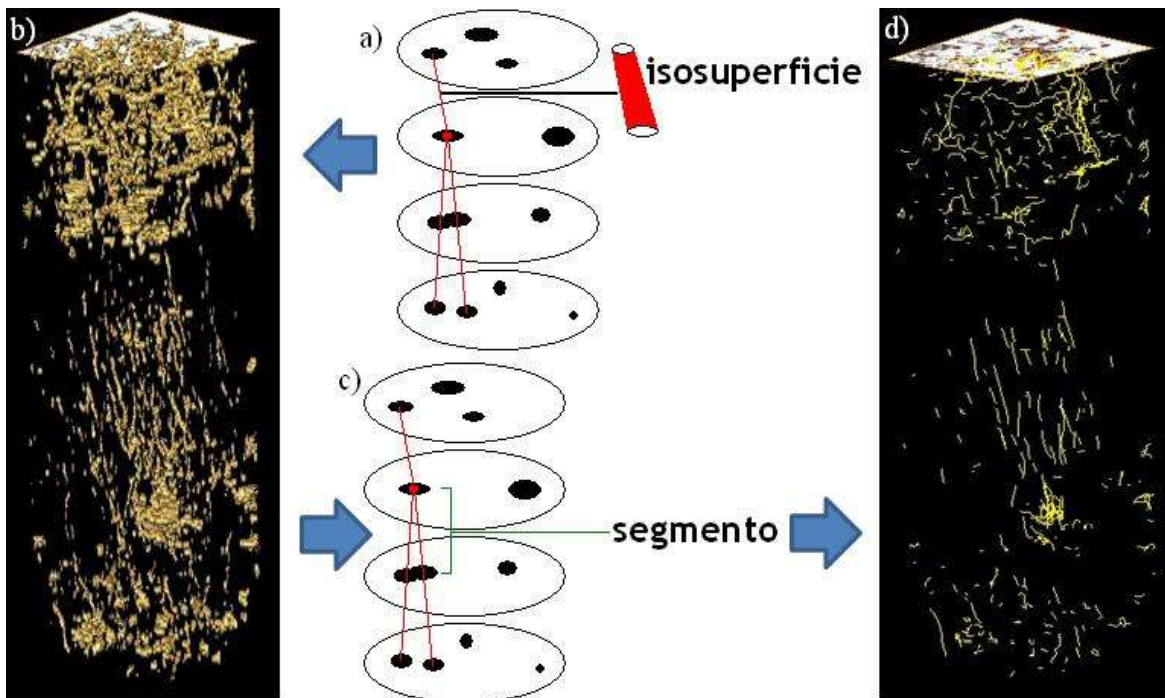


Figura 9.- Proceso para la obtención de las variables descriptoras del espacio poroso, a) Interpolación de los valores digitales del valor umbral, b) Reconstrucción de la superficie isométrica de los poros, c) Criterio de Capowiez para la interconexión de segmentos, d) Reconstrucción esquelética del espacio macroporoso.

Una vez que las imágenes fueron procesadas y la continuidad de macroporos evaluada, se hizo la reconstrucción esquelética empleando el criterio de Capowiez *et al.* (1998) (Figura 9d), el cual procesa los macroporos identificados como un conjunto de pequeños segmentos que se unen en los centroides de dos objetos conectados (Figura 9c), por lo que a un conjunto de segmentos continuos se le llama poro (que puede estar ramificado) y la suma de los poros en un núcleo representa al esqueleto de la red de macroporos. A partir de este esqueleto y las reconstrucciones isométricas se obtuvieron los descriptores de estadística espacial: longitud total de los poros en la muestra, longitud individual de cada poro en la muestra, volumen total de los poros en la muestra, volumen de cada poro encontrado en la

muestra, grosor de cada uno de los poros y rango de cada poro en su árbol correspondiente.

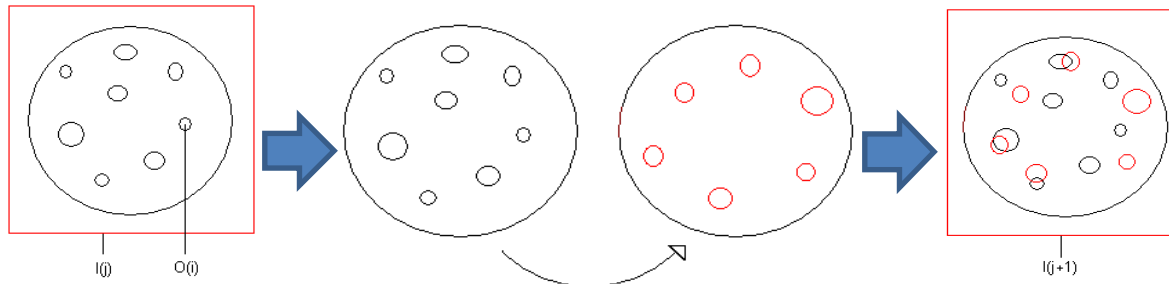


Figura 9.- Criterio de superposición de McDonald et al. (1986).

4.2.1 Análisis por tamaño de poro y profundidades

Se realizaron dos análisis de las variables descriptoras: uno abarcando el total de poros en el volumen del núcleo y otro dividiendo los poros en macroporos y mesoporos, empleando como valor umbral 0.5 mm de diámetro. Esto se realizó con la finalidad de conocer cuántos mesoporos y macroporos existían en cada núcleo y cómo cambiaban en las diferentes coberturas, así como para observar si existían correlaciones entre las variables descriptoras del espacio poroso, los valores de la conductividad y las variables fisicoquímicas.

A partir de las representaciones visuales de la red de macroporos general del núcleo, se hizo una nueva reconstrucción 3D de las muestras, ésta a cada 9 centímetros de profundidad (Figura 11) obteniendo 4 profundidades distintas por muestra: de 0 a 9 cm, de 10 a 19 cm, de 20 a 29 cm y de 30 a 39 cm. Para cada muestra se realizaron cortes independientes y en la mayoría de los casos se tuvieron que eliminar los primeros 5 cm de imágenes, ya que los núcleos fueron extraídos con todo y hojarasca, y es justamente en las primeras imágenes donde se registró la información correspondiente a esta parte y no al suelo en sí.

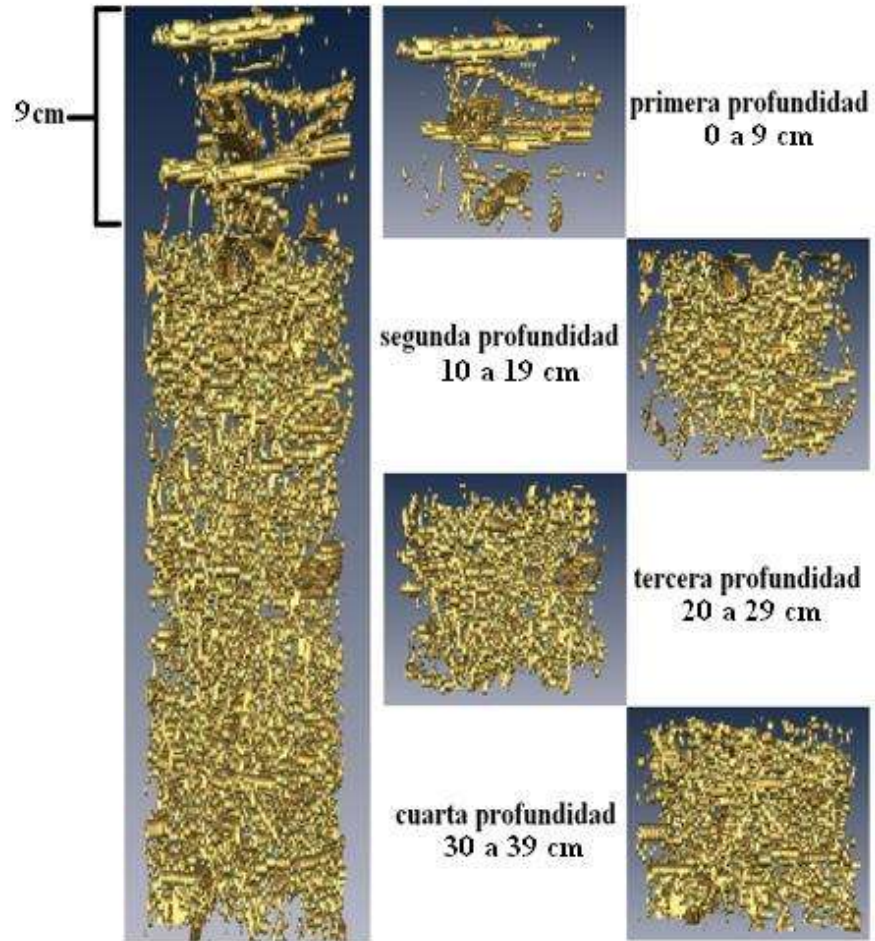


Figura 11.- Reconstrucción de la isosuperficie cada 9 cm de profundidad.

Los recortes de imágenes siguieron el esquema utilizado para el análisis de los núcleos completos para evitar los errores derivados de la técnica de muestreo. Los recortes individuales quedaron de 226 x 198 x 37 (píxeles) a una resolución de 0.445 x 0.445 x 2.5mm. Este análisis se llevó a cabo con el objetivo de observar si existen diferencias entre las variables descriptoras del espacio poroso y los factores fisicoquímicos, según la profundidad y entre los sitios.

4.3 Pruebas de conductividad hidráulica y análisis de laboratorio

Las muestras inalteradas fueron sometidas a pruebas de conductividad hidráulica saturada en condiciones de laboratorio empleando un sistema de carga constante y aplicando la ley de Darcy. Ésta indica que la descarga de agua es directamente proporcional a la sección

transversal de la columna y a la diferencia de carga o potencial hidráulico, e inversamente proporcional a la longitud de la columna, lo cual se expresa la siguiente ecuación:

$$Q = K \left(\frac{\Delta H}{L} \right) A \quad [2]$$

Donde Q es el gasto, K es la conductividad hidráulica saturada, ΔH el gradiente hidráulico (diferencia entre la columna de suelo y la lamina de agua), L es la longitud del núcleo y A la superficie del interior del tubo de PVC (sección cruzada). El cálculo del flujo se hizo empleando una adaptación del sistema diseñado por Gómez-Tagle *et al.* (2012). Estas pruebas se realizaron con un permeámetro de carga constante construido *ex profeso* para este proyecto en el laboratorio.

El montaje experimental (Figura 12) se realizó suspendiendo en un anaquel metálico reforzado una tina plástica reforzada con capacidad de 35.0 l de capacidad, al cual se le acondicionó un sistema de llenado automático con válvula y flotador, similar al empleado en tinacos y cisternas. Junto a la tina se colocaron dos núcleos de suelo y se fijaron empleando abrazaderas de metal de forma que los núcleos queden fijos a la altura de la tina. Ésta sirve para el establecer la carga hidráulica constante durante el experimento. El agua es transferida a través de pequeñas mangueras de plástico transparente con luz interior de aproximadamente 1 cm. Las mangueras se llenan de agua y un extremo se coloca en la tina por debajo del nivel del agua y el otro extremo se coloca en la superficie de los núcleos. El agua pasa a través de los núcleos y mantiene una carga constante gracias al sistema de válvula y flotador.

El agua que sale de los núcleos es colectada en la parte inferior de estos por medio de un embudo. La medición del volumen de agua se realiza en una cubeta con capacidad de 20 l y sección circular. Las cubetas (dos) están equipadas con sensores de presión diferencial Honeywell 26PCB en el fondo y estos están conectados al sistema de automatización descrito por Gómez-Tagle *et al.* (2012).



Figura 12.-Sistema para medición de la conductividad hidráulica saturada diseñado para los núcleos de suelo.

4.4 Análisis de complejidad y estructura

Para realizar el análisis de complejidad y estructura de la red de macroporos del suelo se desarrollaron un conjunto de índices que describen la complejidad y la estructura. El software principal para el análisis de imágenes tomográficas AMIRA tiene la capacidad de definir la estructura tridimensional de los nodos y segmentos que conforman la red de poros a partir de la interpolación de la superficie isométrica de los poros detectados en las imágenes (ver sección 4.2). Estos nodos y segmentos conforman el llamado “esqueleto” del sistema de poros (Figura 13).

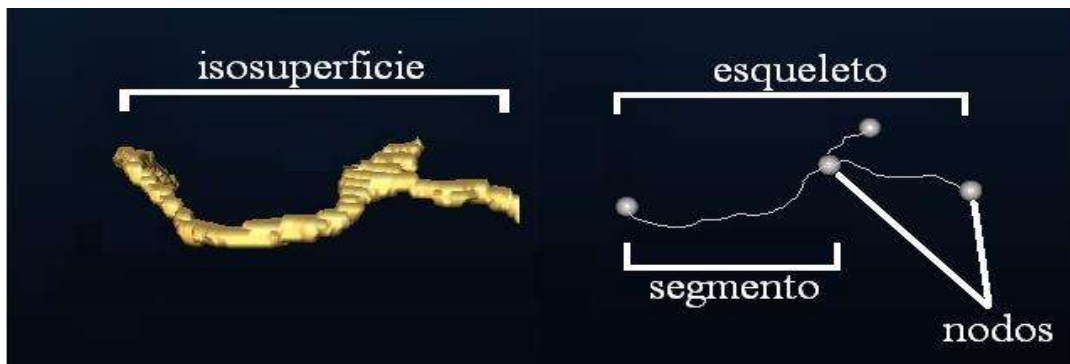


Figura 13.- Caracterización de la superficie isométrica de un poro en un núcleo de suelo y su respectiva esqueletización.

Para cada conjunto de imágenes que conforma cada núcleo, AMIRA genera un archivo de salida en formato *.xml que contiene tablas que describen el “esqueleto” del sistema de poros. En este archivo de salida, que puede leerse como una hoja de cálculo, los datos son agrupados de acuerdo a su interconexión. En este caso específico se decidió nombrar “árbol” a todos los segmentos de poro que se interconectan unos con otros. En la Figura 14 se presenta un ejemplo de árbol. Por otro lado, cada uno de los segmentos que conforman el árbol tiene a su vez un conjunto de variables descriptoras: longitud, grosor promedio, volumen y el número de rango o nivel jerárquico de ramificación del segmento dentro del árbol.

Los archivos originales fueron procesados para obtener una nueva tabla donde el conjunto de datos se agrupa para cada árbol. Se generaron descriptores globales para cada árbol. Los valores de longitud de todos los segmentos del árbol se sumaron para generar la longitud del árbol. El volumen se procesó en forma análoga. Además se generaron otras dos variables nuevas a partir de estas variables: a) la variable “superficie” la cual se calculó con la siguiente fórmula:

$$S=(\pi \times D) \times Lt \quad [3]$$

Donde S es la superficie, π es una constante (3.1416), D es el diámetro promedio de los poros del árbol, Lt es la longitud total de los poros en el árbol, y b) la variable “nivel de ramificación” que se define como el valor máximo del número de rango existente por alguno de los segmentos de poro presentes en el árbol.

De esta forma, cada núcleo de suelo tiene un cierto número de árboles y cada árbol un conjunto de características que lo definen. Esta perspectiva permitió generar un conjunto de índices que reflejan la mayor o menor complejidad de los árboles y de sus características.

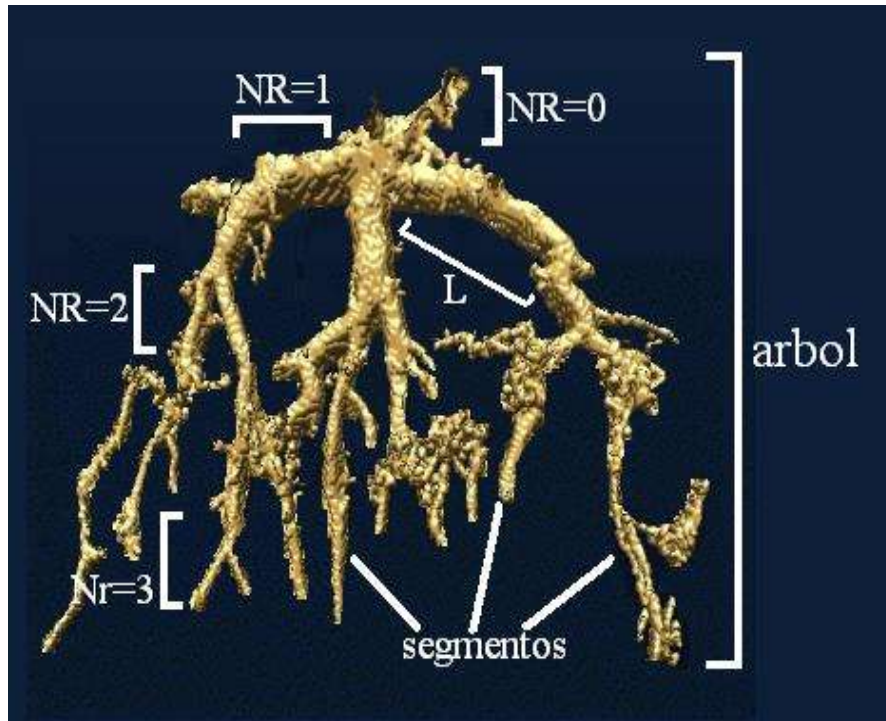


Figura 14.- Esquema de un árbol y de los segmentos que lo conforman: L es la longitud del segmento y NR es el número de rango.

4.5 Índices de ramificación y acoplamiento

Se define como índice de ramificación para un árbol la sumatoria de la longitud o volumen de los segmentos mayores o menores a un nivel de ramificación (Nrm) dividida por la longitud total del árbol:

$$R_b^a = \frac{\sum_{i=1}^n L_{(Nrm)}}{L_t} \quad [4]$$

Donde R_b^a es el índice de ramificación. Este índice se aplicó empleando un valor umbral de ramificación de 5, por lo que se generaron dos subíndices, uno de ramificación baja R_b y otro de ramificación alta R_a . La adecuación del índice de ramificación en estos dos subíndices requiere del cálculo de $\sum_{i=1}^n L_{(Nrm)}$, que es la sumatoria de las longitudes de los segmentos por debajo o mayores al nivel de ramificación con el que se esté trabajando y el valor de L_t es la longitud total del árbol.

De esta forma, R_b indica la proporción de la longitud total de los árboles con poca ramificación en relación la longitud total de los árboles. En forma contraria, R_a indica la proporción de árboles con un nivel de ramificación mayor a 5. Ambos índices adquieren valores de 0.0 a 1.0, un valor de $R_b = 1$ indica que en el núcleo analizado, el 100% de los árboles están poco ramificados y con niveles jerárquicos < 5 . Un $R_a = 1$ indica que en la muestra analizada el 100 % de los árboles presentan árboles ramificados y con niveles jerárquicos > 5 . El R_b y el R_a son complementarios y su adición debe dar 1.0.

A partir de los índices de ramificación bajo y alto (R_a , R_b) se derivó un tercer índice llamado “Índice de acoplamiento” (I_c). Éste índice se calcula de la siguiente manera:

$$I_{ac} = \frac{R_b}{R_a} \quad [5]$$

Éste indica si la red de poros se encuentra más o menos acoplada, un valor de I_c que tiende a 0.0 indica la dominancia de árboles de alta ramificación sobre los de baja ramificación. Un valor de 1.0 indicará la existencia de un balance entre los árboles de baja y alta ramificación, y un valor > 1 indicará la dominancia de árboles con valores bajos de ramificación.

4.6 Procesamiento estadístico

4.6.1 Estructura y complejidad

Se realizaron comparaciones estadísticas empleando análisis de varianza (ANOVA) de las variables descriptoras del espacio macroporoso del suelo: longitud promedio de túnel, volumen total de túnel por muestra, número de segmentos, longitud total de túnel y el grosor medio de túnel, y para las variables fisicoquímicas, así como pruebas de diferencia honesta significativa de Tukey entre tratamientos (coberturas/ usos de suelo).

4.6.2 Correlaciones macroporosidad, K y propiedades fisicoquímicas

Las variables hidrofísicas del suelo se relacionaron con las variables descriptoras del espacio poroso, los índices de complejidad y las variables fisicoquímicas, empleando correlaciones de Pearson. Se aplicarán análisis de componentes principales, correlaciones y

regresiones múltiples para identificar las variables con mayor poder explicativo para las variables hidrofísicas para todos los sitios y por tratamiento (coberturas/usos de suelo). Además se hicieron pruebas de Kruskal-Wallis no paramétricas y pruebas de correlación de Spearman para trabajar con los datos de profundidad, ya que no presentan una distribución normal. Todos los análisis estadísticos se llevarán a cabo con el ambiente y lenguaje de programación estadístico R v. 2.13.0 (<http://www.R-project.org>).

5 RESULTADOS

A fin de una mejor comprensión de la lectura se decidió una nomenclatura más clara, corta y accesible para el nombre de los sitios la cual se presenta en la siguiente tabla (Tabla 3):

Tabla 3.- Nomenclatura abreviada utilizada para los sitios de muestreo.

Uso de suelo	Abreviatura general	Abreviatura sitio	Abreviatura posición en la ladera
Bosque maduro	BM	BMDP (BM Don Pedro)	BMDPa (BMDP alto)
			BMDPm (BMDP medio)
		BMLC (BM La Cortadura)	BMDPb (BMDP bajo)
			BMLCa (BMLC alto)
		BMLCm (BMLC medio)	
		BMLCb (BMLC bajo)	
Bosque secundario	BS	BS1 (BS uno)	BS1a (BS1 alto)
			BS1m (BS1 medio)
			BS1b (BS1 bajo)
		BS2 (BS dos)	BS2a (BS2 alto)
			BS2m (BS2 medio)
			BS2b (BS2 bajo)
Pastizal	P	PL (P Leónides)	PLa (PL alto)
			PLm (PL medio)
			PLb (PL bajo)
		PTG (P Tierra Grande)	PTGa (PTG alto)
			PTGm (PTG medio)
			PTGb (PTG bajo)

5.1 Escaneo TC y reconstrucción 3D

Se obtuvieron un total de 200 imágenes digitales en 2D para cada uno de los 18 núcleos, a partir de las cuales se hizo la reconstrucción del espacio poroso mediante la generación de la superficie isométrica.

En la Figura 15 se muestran las reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios de BMDP.

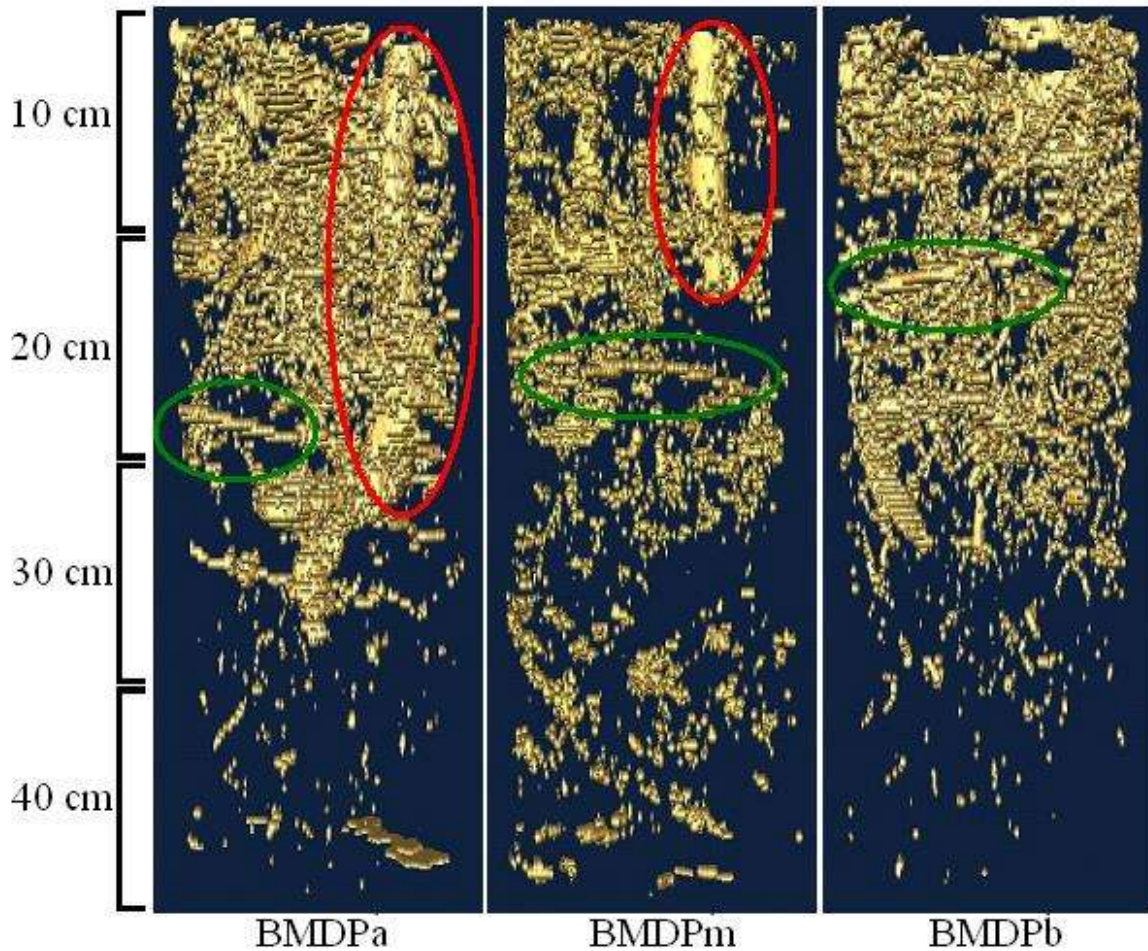


Figura 15.- Reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios BMDP. Círculos rojos = poros más grandes. Círculos verdes = poros transversales.

A primera vista, tanto en BMDPa como en BMDPm, se observan dos grandes poros en la parte superior de la imagen (círculos rojos). En el BMDPa este poro va desde la superficie hasta los 30 cm de profundidad, en el BMDPm, solo está presente en los primeros 10 cm. El análisis morfológico y visual de estos grandes poros indica que son raíces o canales de raíz. Además se observa un conjunto de poros que cruzan la muestra transversalmente (círculos verdes). El sitio donde se observa una mayor complejidad en el sistema de red de macroporos es el BMDPa, mientras que el BMDPm es el menos complejo de estos tres. En estos tres sitios se puede ver que la mayor parte de la red se encuentra en la parte superficial del suelo, es decir en los primeros 30 cm del núcleo. En los últimos 10 cm se aprecia una menor cantidad de poros discontinuos. De estos tres sitios, el BMDPm es donde se observa la mayor macroporosidad en la parte profunda del núcleo.

En la figura 16 se muestran las reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios de BMLC.

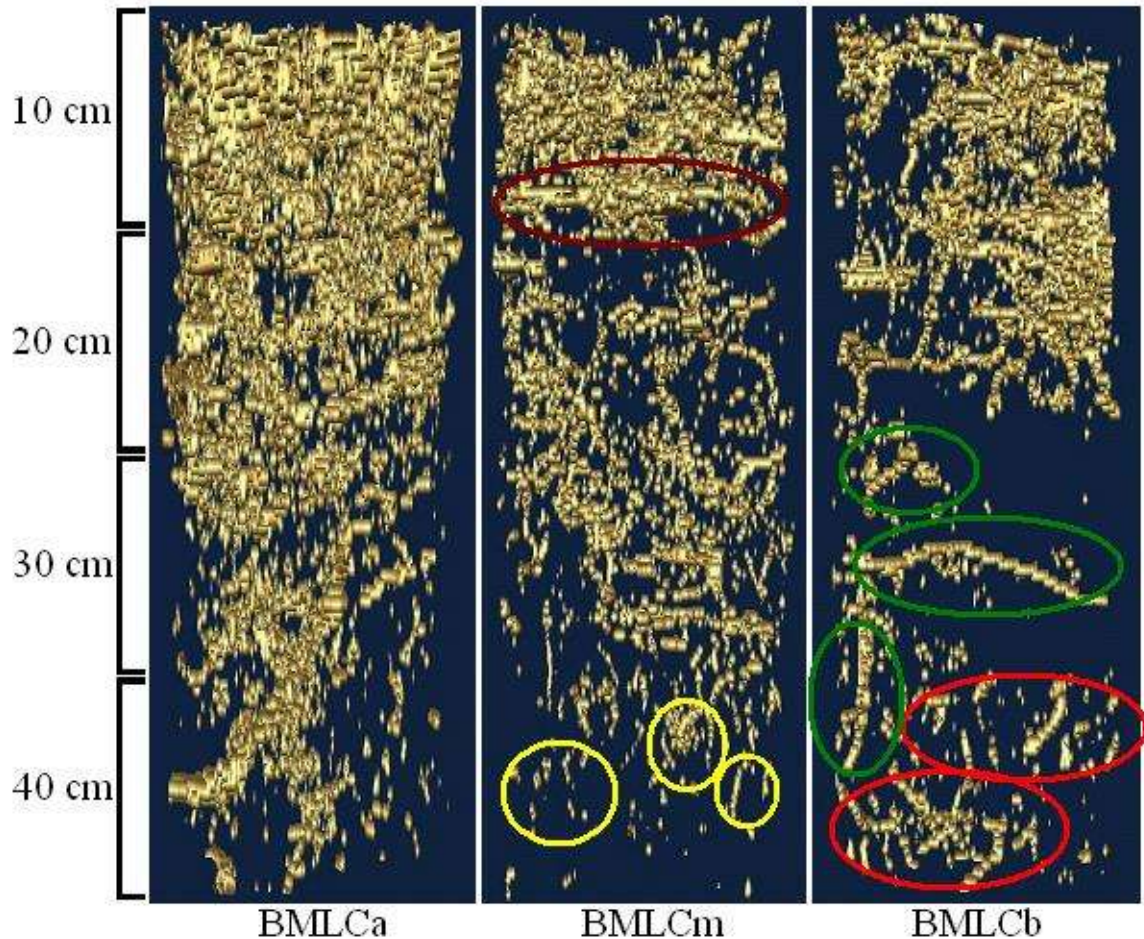


Figura 16.- Reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios BMLC. Círculo café = macroporo transversal grande. Círculos amarillos = macroporos dispersos. Círculos verdes = conjuntos de macroporos grandes. Círculos rojos = cúmulos de macroporos.

En estas tres reconstrucciones se puede observar que el BMLCa claramente presenta una red de macroporos más en la parte superior y disminuyendo conforme la profundidad de la muestra. La red de macroporos menos compleja se observa en BMLCb, en donde la mayor parte de la red está en los primeros 20 cm de la muestra. Cerca de los 30 cm se observa un espacio donde solo se perciben unos cuantos poros (círculos verdes) y en los últimos 10 cm se distinguen dos poros claramente más largos y de un grosor mayor, el resto es un conjunto de poros pequeños. En el BMLCm, en los primeros 10 cm se observa una red compleja donde resalta un gran poro que atraviesa la muestra transversalmente (círculo

café) a partir de los 20 cm y hasta los 30 cm, se observa un cambio en la complejidad y densidad de la red, y en los últimos 10 cm, se observan macroporos claramente aislados (círculos amarillos).

La Figura 17 muestra las reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios BS1.

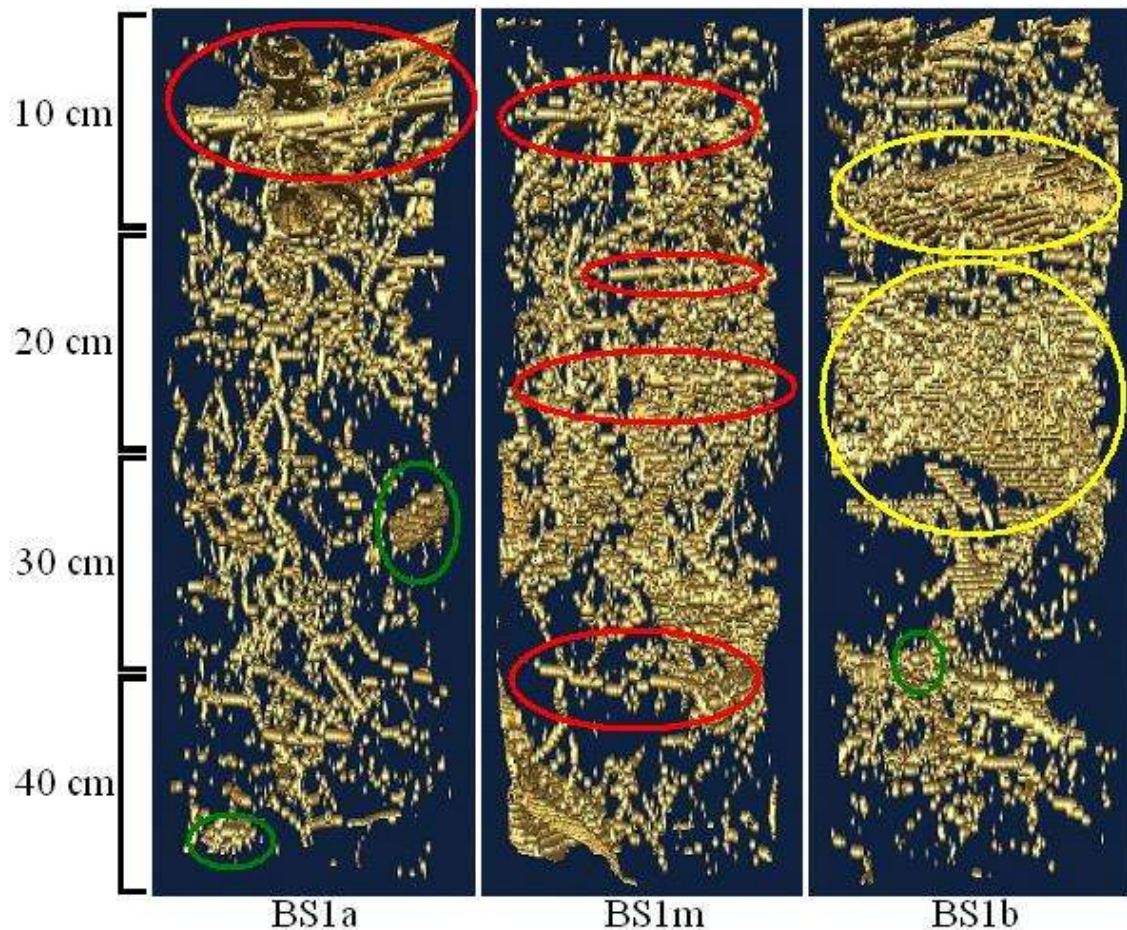


Figura 17.- Reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios BS1. Círculos rojos = poros de raíz transversales. Círculos verdes = formas ovales que podrían pertenecer a coleópteros o lombrices de tierra. Círculos amarillos = grandes acumulaciones de porosidad.

Para los sitios del bosque secundario 1, encontramos que en el BS1m se observa una mayor complejidad en la porosidad, mientras que en el BS1a se nota una red menos compleja. En este sitio en los primeros 10 cm de la imagen, se notan claramente varios poros de raíz transversales (círculo rojo). En este núcleo, la conformación general del los

poros es bastante clara. En el BS1b se observan grandes parches de porosidad (círculos amarillos). En el BS1m se observan muchos poros que atraviesan transversalmente la muestra (círculos rojos). A diferencia de los sitios de bosque maduro (Figuras 15 y 16) en los cuales se presentaba una clara disminución de la complejidad de la porosidad con la profundidad, en estos núcleos de bosque secundario no es posible apreciar esa tendencia. En este caso es clara la presencia de una red más uniforme en todo el núcleo (Figura 17), y también en BS1a y BS1b se notan pequeñas formas óvales y esferas (círculos verdes) que pueden estar asociadas a madrigueras de coleópteros o lombrices de tierra.

La Figura 18 muestra las reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios del BS2.

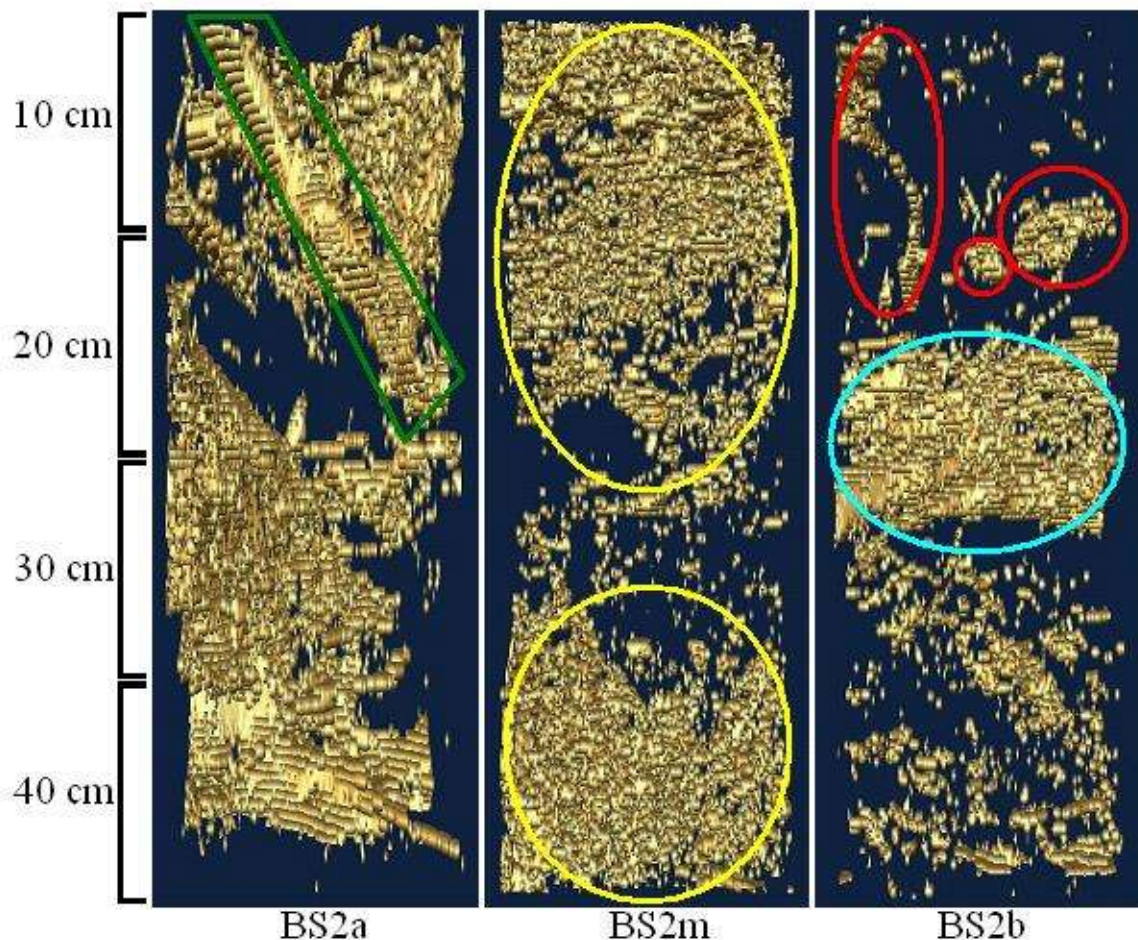


Figura 18.- Reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios del BS2. Rectángulo verde = poro muy grande. Círculos amarillos = zonas de alta porosidad. Círculos rojos = poros dispersos. Círculo azul = franja de porosidad más compleja.

Para los sitios del BS2a y BS2m se observa una red compleja, en el BS2a en la superficie de la muestra se nota un gran poro muy distintivo (rectángulo verde) que pertenece a una raíz. Entre los 20 y 30 cm se observa una clara disminución de los poros a manera de franja. Después de los 30 cm la red se vuelve mas compleja en el lado izquierdo de la imagen. En el sitio BS2m se observan dos zonas muy claras donde la porosidad es mas compleja (círculos amarillos) y en la parte central del núcleo se observa una zona de poros menos densa. En el BS2b la red es mucho menos compleja. En los primeros 15 cm de la muestra se distinguen tres conjuntos de poros señalados con círculos rojos en la imagen. Entre los 25 o 30 cm se aprecia un área con una red mas compleja que en el resto de la muestra (circulo azul) se observa un poro muy distintivo de tamaño grande que también pertenece a raíz y que atraviesa la muestra diagonalmente. Los últimos 10 cm de la muestra la red de macroporos se vuelve menos compleja y los poros se encuentran dispersos o desconectados.

La Figura 19 muestra las reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios del PL.

En estos sitios la red de macroporos es claramente menos compleja y densa que los sitios de bosque maduro y bosque secundario. En el PLm se observa la red más compleja, se observan tres zonas distintas. En los primeros 10 cm se observa una zona muy compleja y densa de macroporos (círculo rojo), en el resto de la muestra se observa un conjunto de poros de mayor grosor y unos pequeños óvalos que son creados por la fauna edáfica (círculos verdes), en la parte central del núcleo se aprecia un conjunto de poros verticales a muy distintivos (círculos azules) que no se observan en ninguna de las otras reconstrucciones y transcurren casi hasta al final de la muestra. En los últimos 10 cm se observan tres poros de mayor diámetro que atraviesan transversalmente la muestra (círculos cafés). En el PLa se presenta la red de macroporos menos compleja. En los primeros 10 cm se observan tres zonas de poros más densas rodeadas de poros más cortos, a los 5 cm se observa un poro de mayor tamaño (círculo amarillo). En el PLb se observan un conjunto de poros muy distintivos en los primeros 10 cm de la muestra (círculos violeta), a partir de los

20 cm se observa aumento en la densidad y complejidad de los poros se distingue un gran poro transversal (círculo rosa). Al final de la muestra la complejidad y densidad de la red disminuyen y se observan dos conjuntos de poros pegados a la pared del corte tanto del lado izquierdo como del derecho (círculos grises).

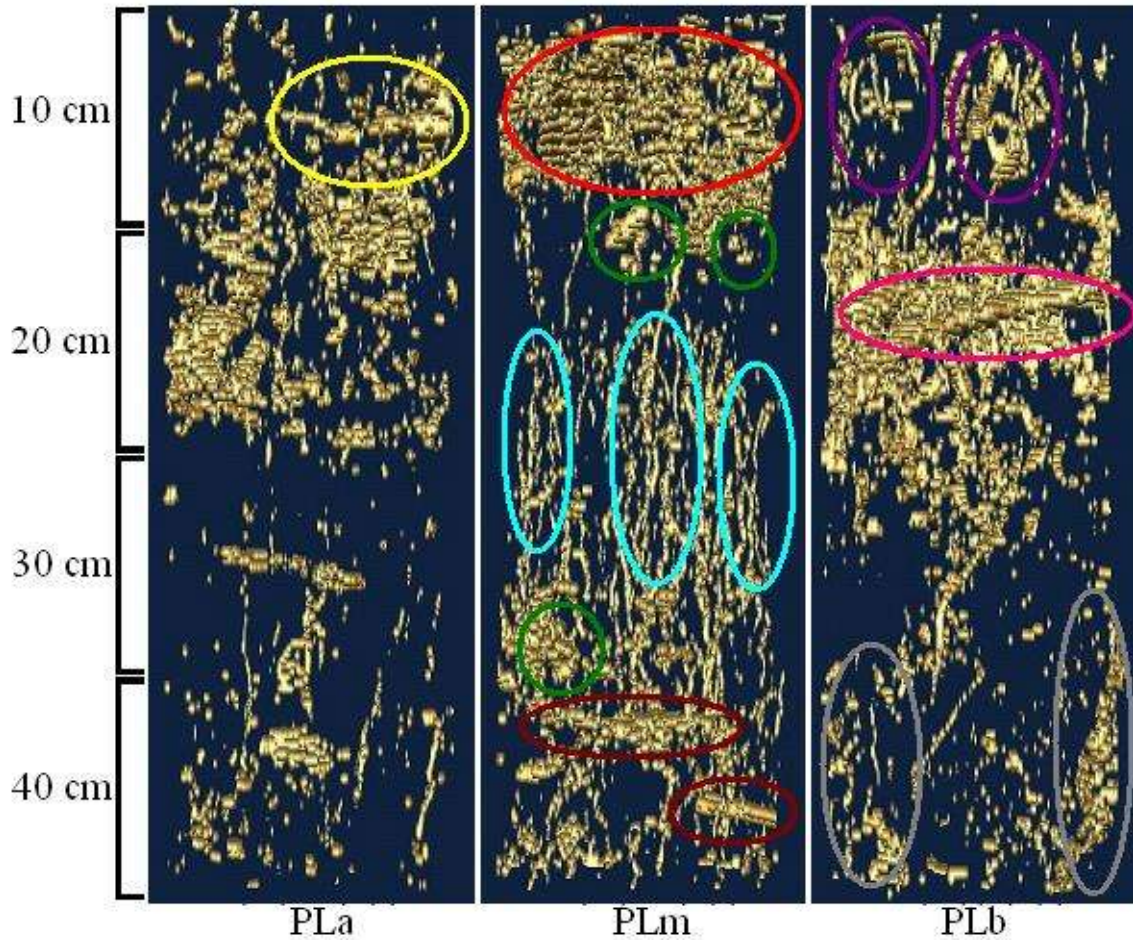


Figura 19.- Reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios PL. Círculo amarillo = poro mayor grosor. Círculo rojo = franja de alta porosidad. Círculos verdes = madrigueras de fauna edáfica. Círculos azules = poros paralelos. Círculos cafés = poros gruesos que transversales. Círculos violetas = agrupaciones de poros en la superficie. Círculo rosa = gran poro transversal. Círculos grises = conjuntos de poros en los costados.

Finalmente, la Figura 20 muestra las reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios PTG.

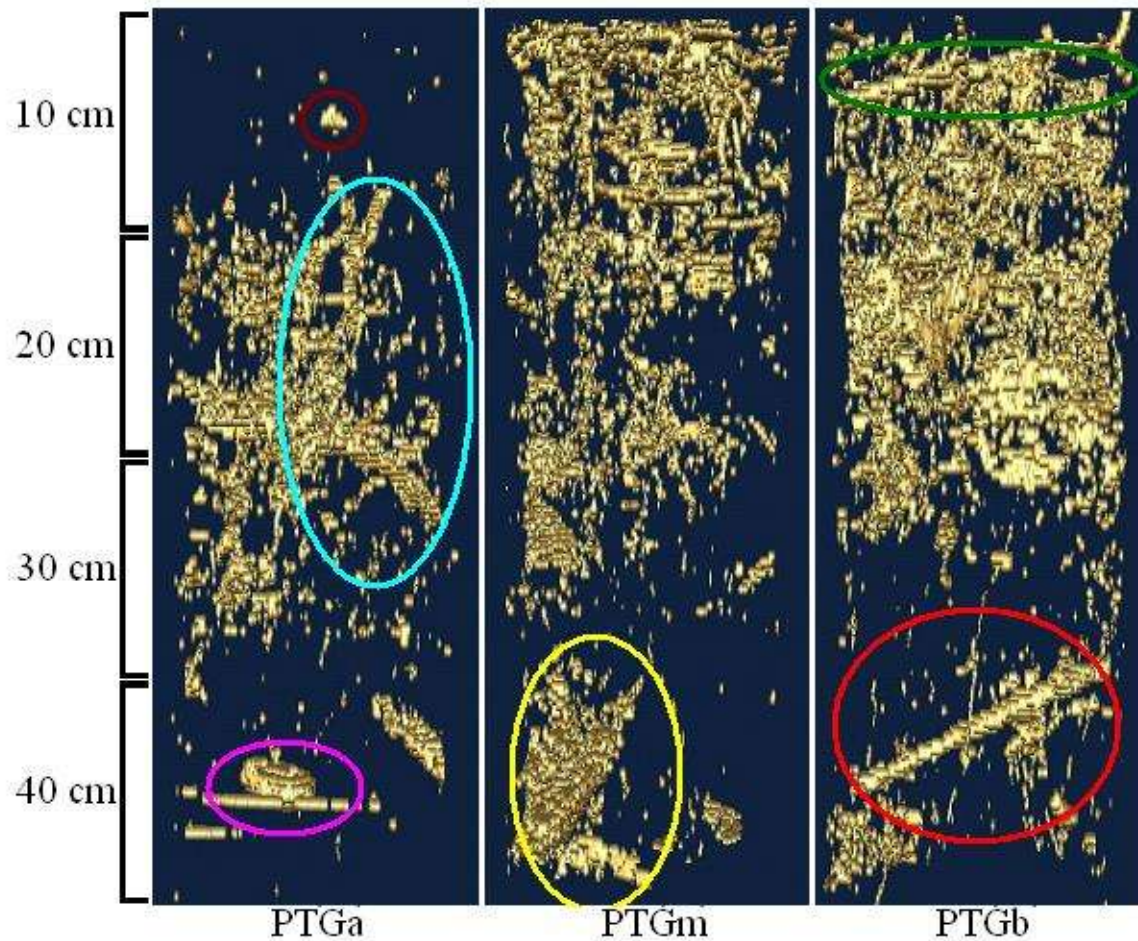


Figura 20.- Reconstrucciones 3D de la superficie isométrica de la red de macroporos para los sitios PTG. Círculo café = poro claramente distinguible en la superficie. Círculo azul = poro mas grande. Círculo rosa = ovalo de la fauna edáfica. Círculo amarillo = cumulo de porosidad. Círculo verde poros de raíz transversal. Círculo rojo = poro de raíz transversal.

En el PTGb se presenta la red de macroporos más densa y compleja la cual se extiende hasta la mitad de la muestra donde se observa un poro transversal grande y ramificado (círculo verde) el cual pudo haber pertenecido a una raíz. En la parte media de la muestra la densidad de la red disminuye observándose otro poro transversal de grosor bastante grande (círculo rojo). En el PTGm se observa una red compleja y densa hasta los 20 cm de profundidad. En los últimos 15 cm se observa un cumulo de poros en la parte izquierda de la muestra (círculo amarillo). En el PTGa se presenta la red menos compleja de todos los sitios. En los primeros 15 cm no se observa más que un poro de tamaño grande rodeado de algunos muy cortos y pequeños (círculo café). A los 30 cm la red se vuelve un poco más compleja donde sobresale un poro grueso y ramificado (círculo azul). En los últimos 10 cm

se observa un poro transversal y una gran esfera que se debe a la acción de la fauna edáfica (círculo rosa).

5.1.1 Variables descriptoras del espacio macroporoso

Como se explicó en la sección de Materiales y Métodos, a partir de las reconstrucciones 3D se realizó la reconstrucción esquelética del espacio macroporoso, para los poros con diámetro mayor a los 0.5mm. Se decidió trabajar con estos poros porque corresponden a actividades de bioturbación más que a las características estructurales propias del suelo. A partir de la reconstrucción esquelética se obtuvieron los valores de las variables descriptoras del espacio macroporoso (Tabla 4).

Tabla 4.-Variables descriptoras del espacio macroporoso para los poros con diámetro mayor a 0.5mm.

Sitios	N	Vol.mm ³	Length.mm	N.cm ³	V.cm ³ .cm ³	L.cm.cm ³
BMDPa	265	8006.6	2297.3	0.093	0.002802	0.000804
BMDPm	139	3434.7	1007.2	0.049	0.001202	0.000352
BMDPb	14	56.9	52	0.005	0.000020	0.000018
BMLCa	179	2070.7	1178.1	0.087	0.001005	0.000572
BMLCm	434	7200.2	3663.3	0.152	0.002520	0.001282
BMLCb	13	662.0	129.8	0.005	0.000232	0.000045
BS1a	204	3514.9	1587.1	0.071	0.001230	0.000555
BS1m	165	7915.1	1300.9	0.058	0.002770	0.000455
BS1b	531	16590.8	5478	0.186	0.005806	0.001917
BS2a	404	11136.3	3777.2	0.196	0.005405	0.001833
BS2m	95	736.2	492.6	0.033	0.000258	0.000172
BS2b	487	4450.5	2751.4	0.170	0.001557	0.000963
Pla	37	180.6	157	0.013	0.000063	0.000055
PLm	33	156.2	128	0.012	0.000055	0.000045
PLb	39	419.4	245.6	0.014	0.000147	0.000086
PTGa	83	572.6	432.8	0.029	0.000200	0.000151
PTGm	160	1374.5	846.7	0.056	0.000481	0.000296
PTGb	165	1098.7	918.1	0.058	0.000384	0.000321

N=número de macroporos totales, Vol.mm³=total de volumen de macroporos en milímetros cúbicos, Length.mm=longitud total de los macroporos en milímetros, N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud de los macroporos en cm por cm³.

Se puede notar que los valores más altos para todas las variables se obtuvieron en los sitios

BS y no en los BM como se esperaba. En general, el sitio que obtuvo los valores más altos fue el BS1b, seguido por BS2a, mientras que los sitios que obtuvieron los valores más bajos fueron los dos sitios bajos del BM, en promedio los sitios de P fueron los que obtuvieron los valores más bajos.

En la Figura 21 se puede observar que los sitios de bosque secundario (barras rojas) son los sitios que en promedio tienen los valores más altos para todas las variables, seguido por los sitios de bosque maduro (barras verdes) y por los sitios de pastizal (barras amarillas), con los valores más bajos. Además se evidencia que si bien los sitios de BS y BM son similares entre sí, los sitios de pastizal son muy distintos. En forma clara, PL presenta menos densidad de poros, menor longitud de estos y menor volumen que PTG.

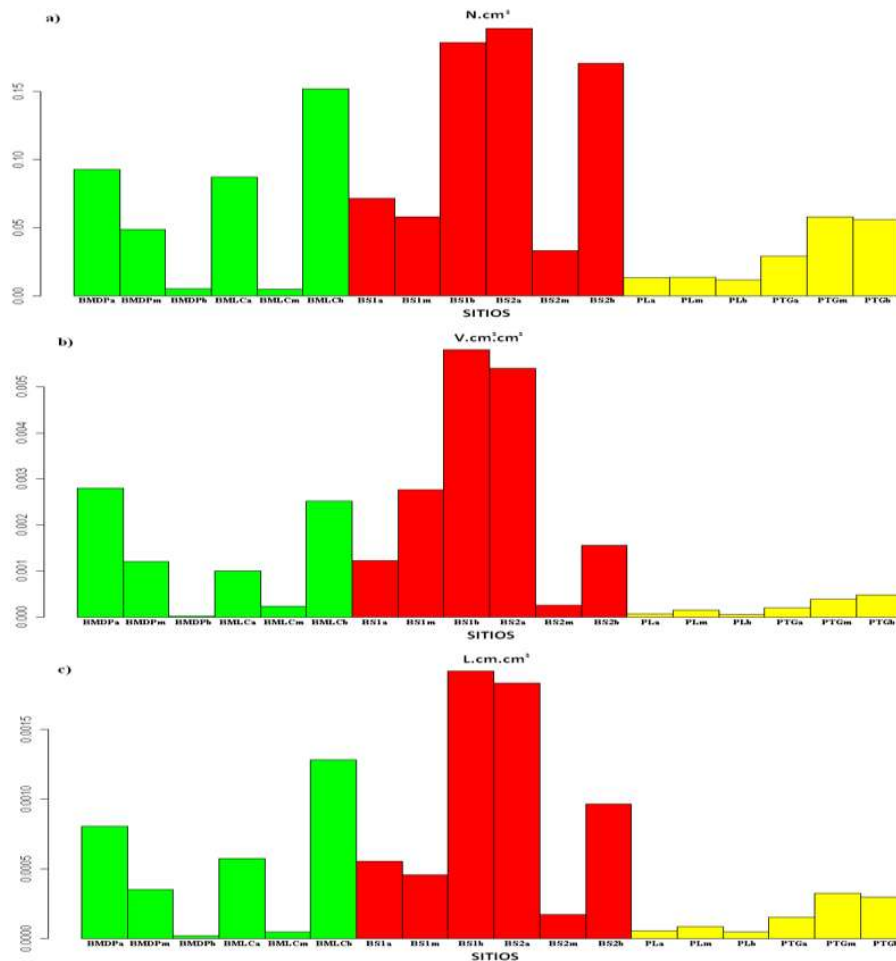


Figura 21.- Graficas de barras para las variables $N.cm^3$ (a), $V.cm^3.cm^3$ (b) y $L.cm.cm^3$ (c) para los macroporos.

Para conocer el impacto de la cobertura/uso de suelo sobre las variables descriptoras del espacio macroporoso se hizo una agrupación por tipo de uso/cobertura vegetal. Los sitios de bosque maduro se agruparon en la categoría maduro, todos los sitios de bosque secundario en la categoría secundario y todos los sitios de pastizal en la categoría pastizal, y a partir de esta agrupación se hicieron gráficas de boxplot (Figura 22) para las variables N ., $V.cm^3.cm^3$ y $L.cm.cm^3$ con su respectivo análisis de varianza para cada variable, a fin de observar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las variables debido a la cobertura/uso de suelo.

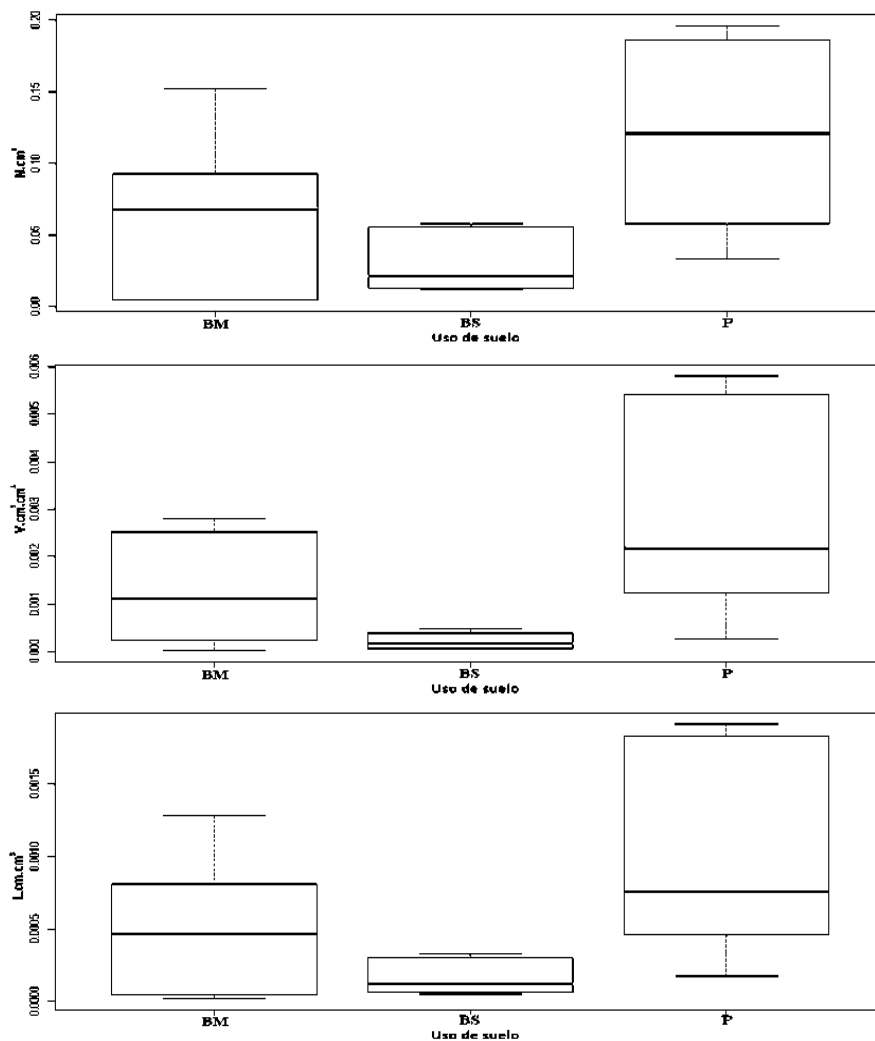


Figura 22.- Gráficas de boxplot para las variables $N.cm^3$ (a), $V.cm^3.cm^3$ (b) y $L.cm.cm^3$ (c) para distintas coberturas/ usos de suelo.

La alta variación en los BM se debe a la ocurrencia de valores muy altos y muy bajos. Para las tres variables $N.cm^3$ ($p=0.04023$), $V.cm^3.cm^3$ ($p=0.02591$) y $L.cm.cm^3$ ($p=0.04377$)

se encontró una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) entre los usos de suelo. La prueba de Tukey solo se encontró diferencia estadística significativa entre BM y P para la variable $V.cm^3.cm^3$ ($p=0.02$, $diff=2.44$). Para todas las variables, el BS y el P fueron los más distintos. Después para las variables $N.cm^3$ y $L.cm.cm^3$, la segunda comparación más distinta fue el BS y el BM, mientras que para la variable $V.cm^3.cm^3$, fue el BM y el P. Por lo tanto, para las variables $N.cm^3$ y $L.cm.cm^3$ la combinación menos distinta fue el P y el BM y para la variable $V.cm^3.cm^3$ fue el BS y BS.

5.1.2 Variables descriptoras del espacio de mesoporos

También se hizo la reconstrucción esquelética de los mesoporos (poros entre los 0.2mm y justo por debajo de los 0.5mm) y se obtuvieron los valores para las variables descriptoras (Tabla 5).

Tabla 5.-Variables descriptoras para los poros con diámetro entre los 0.2mm y justo por debajo de los 0.5mm para los 18 sitios.

Sitio	N	Vol.mm ³	Lon.mm	N.cm ³	V.cm ³ .cm ³	L.cm.cm ³
BMDPa	3362	6741	25011	1.18	0.0024	0.0088
BMDPm	1867	3558	14249	0.65	0.0012	0.0050
BMDPb	4941	5009	28969	1.73	0.0018	0.0101
BMLCa	3138	5077	21385	1.52	0.0025	0.0104
BMLCm	5564	10789	44027	1.95	0.0038	0.0154
BMLCb	777	1041	6347	0.27	0.0004	0.0022
BS1a	1092	2210	10161	0.38	0.0008	0.0036
BS1m	1401	2408	11509	0.49	0.0008	0.0040
BS1b	3107	8249	25168	1.09	0.0029	0.0088
BS2a	3204	7956	27059	1.56	0.0039	0.0131
BS2m	727	1682	5468	0.25	0.0006	0.0019
BS2b	1859	5469	15681	0.65	0.0019	0.0055
PLa	1701	2056	11806	0.60	0.0007	0.0041
PLm	1399	1915	10607	0.49	0.0007	0.0037
PLb	925	1417	7457	0.32	0.0005	0.0026
PTGa	892	2183	7212	0.31	0.0008	0.0025
PTGm	1346	2096	9317	0.47	0.0007	0.0033
PTGb	4029	6078	28730	1.41	0.0021	0.0101

N=número de mesoporos totales, Vol.mm³=total de volumen de mesoporos en milímetros, Lon.mm=longitud total de los mesoporos en milímetros, N.cm³=número de mesoporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ ocupado por los mesoporos por cm³, L.cm.cm³ es la longitud en cm ocupada por los mesoporos por cm³.

En lo que respecta a los mesoporos, contrario a lo obtenido con los macroporos, aquí el BM en promedio obtuvo los valores mas altos para todas las variables seguidos por el BS y de nuevo en último el P. Los valores más altos se presentaron en BMLCm, sin embargo también un sitio de bosque maduro, el BMLCb obtuvo valores bajos para el volumen y longitud de los mesoporos en la muestra, el menor número de mesoporos se encontró en el BS2m.

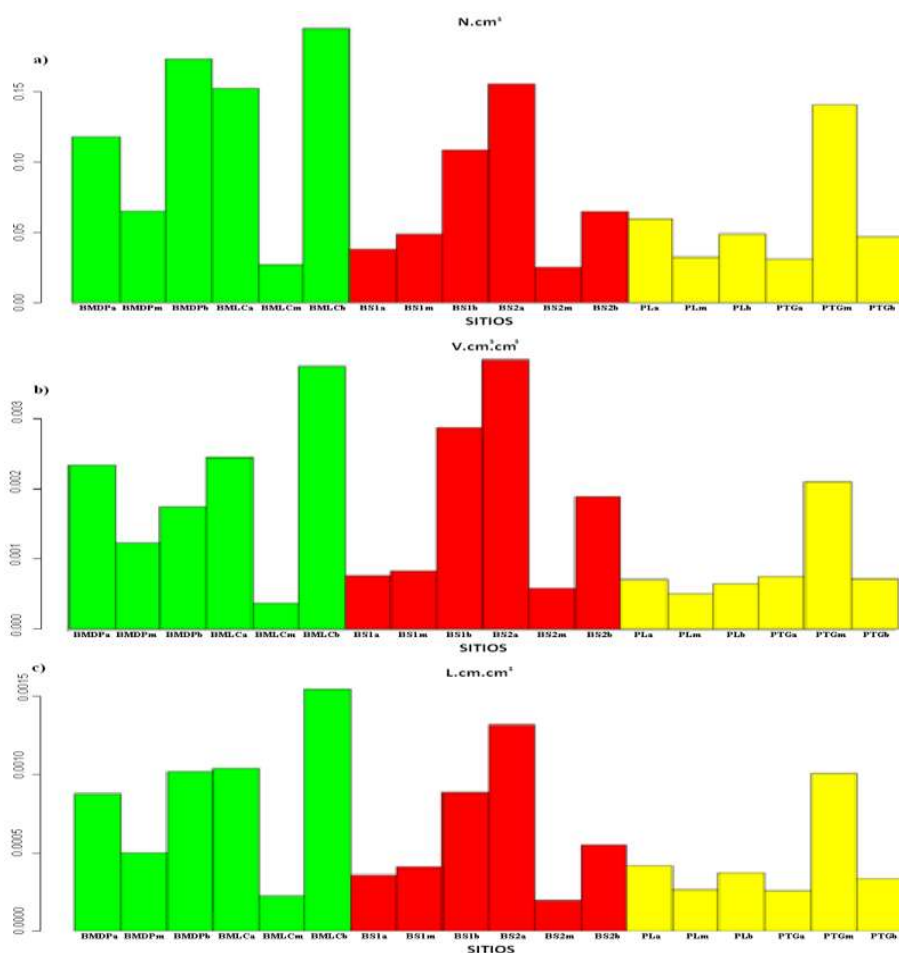


Figura 23.- Graficas de barras para las variables N.cm³(a), V.cm³.cm³(b) y L.cm.cm³ (c) de los mesoporos para los 18 sitios de muestreo.

En la Figura 23 se muestran las gráficas de barras para los valores de las variables N.cm³, V.cm³.cm³ y L.cm.cm³ de los mesoporos en los 18 sitios de muestreo. Los sitios de bosque maduro (barras verdes) obtuvieron los valores más altos para las variables número de poros por cm³, volumen en cm³ por cm³ y longitud en cm por cm³, seguidos de los sitios de bosque secundario (barras rojas) y por último los pastizales (barras amarillas) con los

valores más bajos.

Para conocer el impacto del uso de suelo sobre los mesoporos, los sitios se agruparon por tipo de uso. A partir de esta agrupación se hicieron graficas de boxplot y analisis de varianza (Figura 24) para las variables $N.cm^3$, $V.cm^3.cm^3$ y $L.cm.cm^3$.

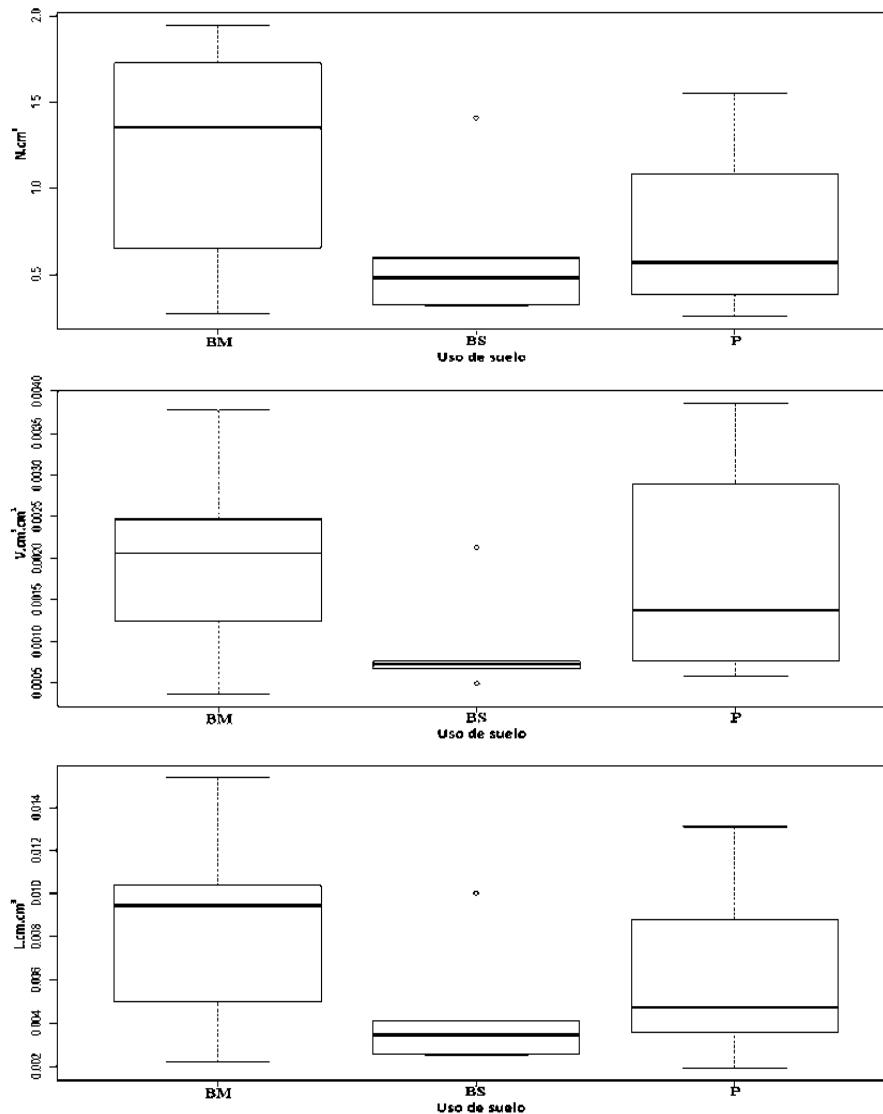


Figura 24.- Graficas de boxplot para las variables $N.cm^3$ (a), $V.cm^3.cm^3$ (b) y $L.cm.cm^3$ (c) para los mesoporos para las distintas coberturas/ usos de suelo.

Para los mesoporos no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los distintos usos de suelo, para ningunas de las variables descriptoras.

5.2 Análisis fisicoquímico

Debido a que los análisis fisicoquímicos de los suelos se realizaron en muestras alteradas de suelo y que el muestreo se realizó en intervalos de 9 cm de profundidad y los sitios de extracción de muestras se encontraron adyacentes a los puntos de extracción de los núcleos, para describir el total del núcleo de cada sitio se promediaron los valores de las diferentes propiedades para cada punto.

5.2.1 Variables físicas

En los 18 sitios muestreado se determinaron la textura, la humedad de campo, la densidad real y densidad aparente, además se calculó la porosidad total a partir de las densidades obtenidas. En la tabla 6 se muestran los porcentajes de limo, arcilla y arena obtenidos en el análisis textural.

Tabla 6.- Análisis de textura promedio para las 18 sitios de muestro.

Sitio	%Limo	%Arcilla	%Arena
BMDPa	59.8	27.2	13.0
BMDPm	53.1	36.9	10.0
BMDPb	47.2	36.8	16.0
BMLCa	55.2	21.3	23.5
BMLCm	56.5	27.5	16.0
BMLCb	62.8	21.0	16.2
BS1a	45.5	43.5	11.0
BS1m	50.2	44.4	5.4
BS1b	63.9	32.0	4.1
BS2a	67.8	14.9	17.3
BS2m	64.3	20.9	14.8
BS2b	62.6	13.4	24.0
PLa	51.8	26.3	21.9
PLm	59.4	20.3	20.3
PLb	64.8	24.1	11.1
PTGa	63.4	18.2	18.4
PTGm	60.8	17.1	22.1
PTGb	54.5	27.7	17.8

En todos los sitios se observa que el porcentaje de limo es el mayor, seguido por el de las arcillas y al último el de las arenas, con la excepción del bosque secundario 2 abajo,

pastizal Tierra Grande medio y el bosque maduro La Cortadura arriba donde el porcentaje de arena fue mayor al porcentaje de arcillas, y para el sitio pastizal Leónides medio el porcentaje de arcillas y arenas fue el mismo.

No se encontraron diferencias estadísticas entre las proporciones granulométricas para los diferentes usos del suelo. Se hizo el triángulo de texturas según la clasificación de la FAO (Figura 25), con lo que se obtuvieron tres clases texturales, fina(F), media (M) y media-fina (MF).

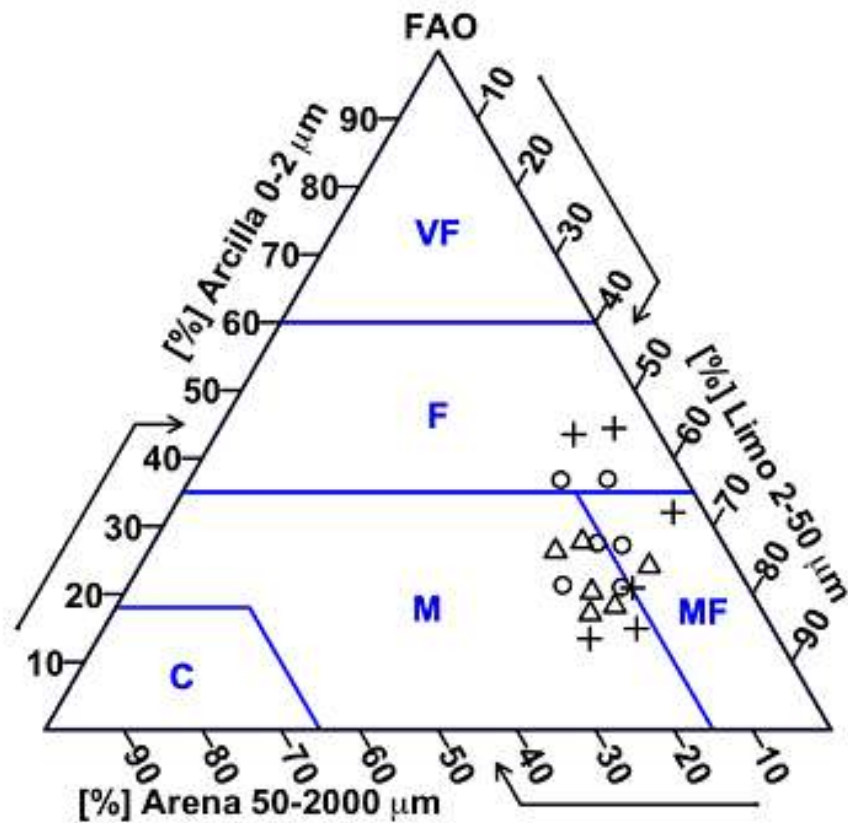


Figura 25.- Clasificación de textura promedio de acuerdo al sistema FAO para los 18 sitios de muestreo, círculo=bosque maduro, cruz=bosque secundario, triángulo=pastizal.

Los datos obtenidos para las variables humedad de campo, densidad real, densidad aparente y porosidad total para los sitios muestreados se presentan en la Tabla 7.

La densidad real osciló obtuvo un valor promedio de 2.1 g/cm³, mientras que la densidad aparente obtuvo un promedio de 0.4 g/cm³ las cuales resultan considerablemente bajas en

comparación con otros valores reportados para ambientes de bosque en suelos volcánicos. Las porosidades totales calculadas a partir de estas dos variables oscilaron entre 69.7 y 87.1 % y por lo tanto se consideran elevadas aún para suelos volcánicos de ambientes boscosos.

Tabla 7.-Datos para las variables físicas para los 18 sitios de muestreo.

sitio	%Hum	D.R.(g/cm ³)	D.A.(g/cm ³)	P.T.(%)
BMDPa	166.3	1.9	0.2	87.1
BMDPm	74.5	2.1	0.4	78.3
BMDPb	74.9	2.4	0.5	78.2
BMLCa	126.2	1.9	0.3	85.2
BMLCm	149.8	2	0.3	85.7
BMLCb	125.9	2.4	0.4	84.6
BS1a	97.6	2	0.3	86.2
BS1m	55.2	2.4	0.6	72.7
BS1b	55.1	2.3	0.7	69.7
BS2a	114.4	2	0.3	84.9
BS2m	114.4	2	0.3	84
BS2b	72	2.1	0.5	78.8
PLa	161.1	2.1	0.3	84.5
PLm	100.7	2	0.4	79.2
PLb	145.7	2	0.3	85
PTGa	124.2	1.9	0.4	81.6
PTGm	95.9	2	0.4	81.9
PTGb	88	2.1	0.5	78.1

%Hum=humedad de campo, D.R.=densidad real, D.A.=densidad aparente, P.T.=porosidad total

Se agruparon las variables en los usos de suelo correspondientes y se hicieron las graficas de boxplot para las variables físicas y porcentajes de textura (Figura 26).

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para ninguna de las variables físicas y porcentajes de textura entre los distintos usos de suelo. Los resultados para las variables físicas y porcentajes de textura muestran que si bien existe variación para las variables analizadas, los suelos de los diferentes sitios son muy similares entre si.

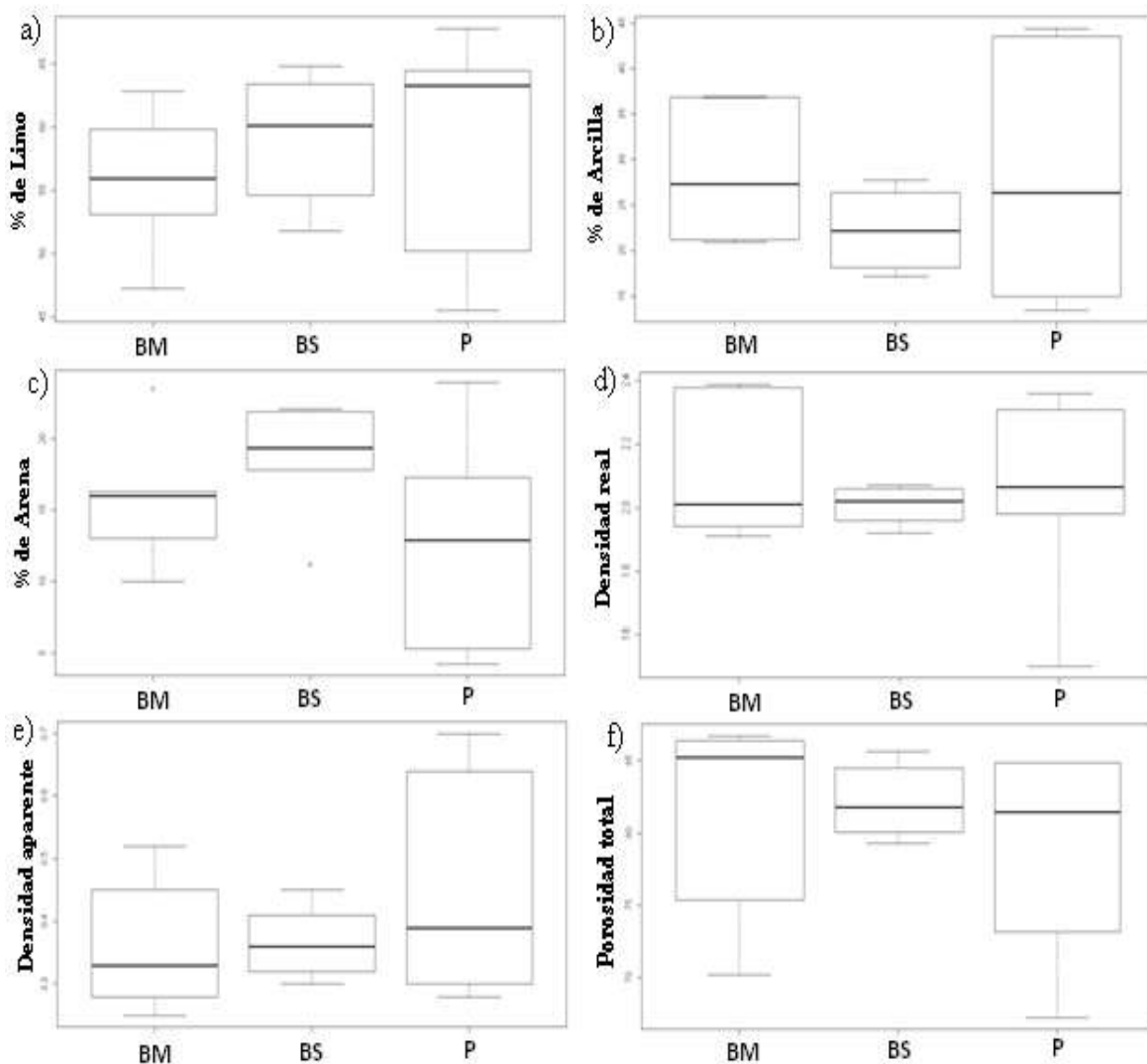


Figura 26.- Gráficas de boxplot para las variables %Limo (a), %Arcilla (b), %Arena(c), Densidad real (d), Densidad aparente (e) y Porosidad total (f) contra el uso de suelo para los 18 sitios de muestreo.

5.2.2 Propiedades químicas

Se obtuvieron los valores para el pH, carbono, nitrógeno y la relación carbono-nitrógeno (Tabla 8).

Para el pH el PLb obtuvo el valor de pH mas alto. Para el carbono y el nitrógeno se encontró que los sitios bajos de BM tuvieron una mucho menor cantidad respecto a los demás sitios. En lo que respecta a la relación carbono-nitrógeno el sitio BS1b obtuvo el valor el valor mas bajo. No se encontro diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) para ninguna de las variables químicas y los distintos usos de suelo.

Tabla 8.-Datos para las variables químicas para los 18 sitios muestreados.

Sitio	pH	C	N	C/N
BMDPa	3.7	21.7	1.2	19.1
BMDPm	3.8	17.1	1.0	17.4
BMDPb	3.6	10.3	0.6	16.3
BMLCa	3.7	21.5	1.0	21.0
BMLCm	3.5	22.6	1.1	20.1
BMLCb	3.8	8.7	0.5	16.9
BS1a	3.3	26.1	1.3	21.2
BS1m	3.5	12.3	0.7	17.2
BS1b	4.1	12.4	0.8	13.6
BS2a	3.9	17.3	1.0	18.3
BS2m	3.6	22.5	1.3	18.4
BS2b	4.3	12.2	0.8	14.5
PLa	3.9	15.2	0.9	18.5
PLm	4.6	15.6	0.8	19.6
PLb	4.7	15.7	0.9	17.2
PTGa	4.4	19.2	0.9	20.7
PTGm	4.6	17.9	1.0	17.4
PTGb	4.4	15.0	0.9	17.1

pH=potencial de hidrogeno, C=carbono, N=nitrógeno, C/N=relacion carbono-nitrógeno.

5.3 Reconstrucción 3D cada 9 centímetros

Debido a que los análisis fisicoquímicos se realizaron en muestras alteradas extraídas cada 10 cm, se empleó una aproximación de reconstrucción tridimensional con intervalos que permitieran la comparación directa. Para esto se realizaron cortes cada 9 cm, dejando un espacio entre cortes de 1 cm. También se hizo la reconstrucción esquelética del espacio macroporoso para cada profundidad y por sitio, y se obtuvieron los descriptores de estadística espacial, para todos los poros con grosor arriba de los 0.5mm en cada profundidad (tabla 9).

No se encontraron poros con diámetro mayor de 0.5mm en los sitios BMLCb, BMDPm y PTGm, en la profundidad de 18 a 27 cm. En los sitios BMLCm, BMDPb no se encontraron poros con diámetro mayor de 0.5mm en la profundidad de 27 a 36 cm. En el PLM no se encontraron poros con diámetro mayor de 0.5mm en la segunda y ultima profundidad. En general la primera profundidad de todos los sitios fue la que obtuvo los valores más altos a excepción de los sitios BMLCb, BMLCm, los tres pastizales de Leónides, PTGa y BS1a.

Tabla 9.-Datos de las variables descriptoras del espacio poroso obtenidos a partir de las reconstrucciones 3D para cada profundidad de los 18 sitios de la época de secas.

Sitios	Profundidad	N.cm ³	V.cm ³ .cm ³	L.cm.cm ³
Bosque maduro	0-9 cm	1.99	0.003	0.0128
	9-18 cm	1.03	0.0014	0.0066
	18-27 cm	0.72	0.0009	0.0046
	27-36 cm	0.33	0.0004	0.0022
Bosque secundario	0-9 cm	1.89	0.0028	0.0122
	9-18 cm	1.02	0.0014	0.0064
	18-27 cm	0.86	0.0011	0.0056
	27-36 cm	1.06	0.0014	0.0074
Pastizal	0-9 cm	0.70	0.0012	0.0046
	9-18 cm	0.83	0.0011	0.0053
	18-27 cm	0.47	0.0006	0.0030
	27-36 cm	0.40	0.0005	0.0025

N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud en cm de los macroporos por cm³.

5.3.1 Análisis fisicoquímico por profundidad

5.3.1.1 Variables físicas

También se hizo el análisis de la textura, la humedad de campo, la densidad real y densidad aparente, además se calculo la porosidad total a partir de las densidades obtenidas para cada profundidad, asi como el triangulo de textura segun la FAO (Figura 27), se obtuvieron 3 clases texturales, fina(F), media (M) y media-fina (MF).

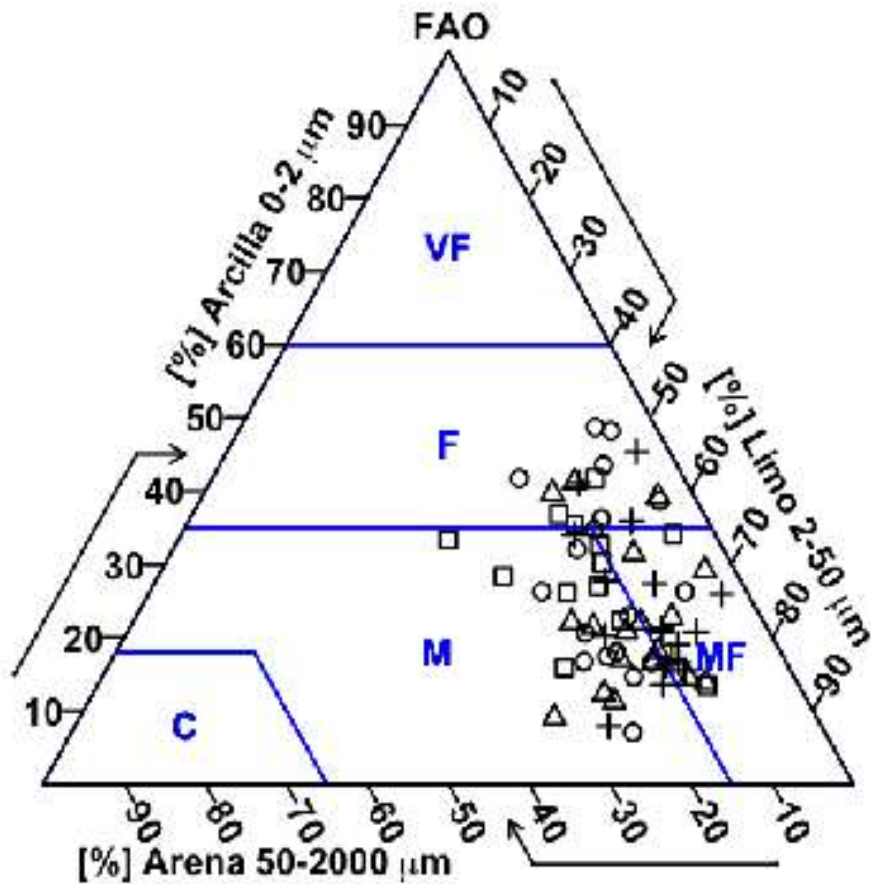


Figura 27.- Textura del suelo para las diferentes profundidades en cada sitio, cuadrado=primera profundidad, círculo=segunda profundidad, triángulo=tercera profundidad, cruz=cuarta profundidad.

Los datos obtenidos para las variables humedad de campo, densidad real, densidad aparente y porosidad total por profundidad se muestran en la tabla 10. Para el % de humedad de campo, en promedio los sitios de P obtuvieron los valores más altos en la 3era profundidad el valor más pequeño se obtuvo en la 1era profundidad. Para la densidad real y aparente la 4ta profundidad fue la que obtuvo el promedio más alto mientras que la 2da profundidad obtuvo los valores más bajos. Por último para la porosidad total el promedio más alto se dio en el BM, seguido del P y por último el BS, obteniendo en promedio los valores más altos en la 1era profundidad.

Tabla 10.-Datos para las variables físicas para cada profundidad.

Sitios	Profundidad	%Hum	D.R.(g/cm ³)	D.A.(g/cm ³)	P.T.(%)
Bosque maduro	0-9 cm	124.05	2.60	0.29	88.8
	9-18 cm	116.77	2.07	0.35	82.9
	18-27 cm	123.23	2.07	0.36	82.7
	27-36 cm	114.38	2.14	0.43	80.0
Bosque secundario	0-9 cm	75.93	1.96	0.35	82.1
	9-18 cm	81.80	2.18	0.45	79.3
	18-27 cm	90.08	2.13	0.49	77.2
	27-36 cm	91.36	2.16	0.51	76.5
Pastizal	0-9 cm	64.53	2.05	0.44	78.5
	9-18 cm	117.47	2.01	0.39	80.7
	18-27 cm	158.09	1.99	0.31	84.6
	27-36 cm	136.95	1.99	0.33	83.2

%Hum=humedad de campo, D.R.=densidad real, D.A.=densidad aparente, P.T.=porosidad total

5.3.1.2 Propiedades químicas

A partir de los análisis de laboratorio se obtuvieron los valores para las variables químicas pH, carbono, nitrógeno, relación carbono-nitrógeno para cada profundidad (tabla 11).

Tabla 11.-Datos para las variables químicas por profundidad..

Sitios	Profundidad	pH	C	N	C/N
Bosque maduro	0-9 cm	3.34	27.2	1.5	18
	9-18 cm	3.52	15.2	0.8	18
	18-27 cm	3.86	13.8	0.7	19
	27-36 cm	3.87	11.1	0.6	19
Bosque secundario	0-9 cm	3.62	31.8	1.8	17
	9-18 cm	3.66	15.8	1.0	17
	18-27 cm	3.74	10.7	0.6	17
	27-36 cm	3.83	10.2	0.5	18
Pastizal	0-9 cm	4.40	20.3	1.2	16
	9-18 cm	4.35	16.7	0.9	18
	18-27 cm	4.40	14.7	0.7	20
	27-36 cm	4.54	14.8	0.8	20

pH=potencial de hidrogeno, C=carbono, N=nitrógeno, C/N=relación carbono-nitrógeno.

Para el pH, el carbono, el nitrógeno el promedio más alto se obtuvo en la 1era profundidad. Para el carbono cabe mencionar que es muy notorio como los valores más bajos se obtuvieron en la 3era y 4ta profundidad y los valores más altos están en la 1era

profundidad. Por último para la relación de carbono/nitrógeno la tercera profundidad fue la que obtuvo el promedio más alto.

5.3.2 Análisis de varianza y correlaciones no paramétricas

Se hicieron pruebas de Kruskal-Wallis (estadístico S) y correlaciones de Spearman (coeficiente rho) para probar la existencia de relaciones entre las variables fisicoquímicas y los descriptores cuantitativos del espacio poroso por profundidad para los diferentes usos del suelo, debido a que los datos para las profundidades no presentan una distribución normal. A continuación se presentan las correlaciones de Spearman que resultaron estadísticamente significativas ($p < 0.05$) por uso de suelo comenzando por el bosque maduro (tabla 12).

Tabla 12.- Correlaciones de Spearman estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para Bosque maduro.

Variable descriptora del espacio poroso	Variable fisicoquímica	S	p	ρ
Lon.mm	%arena	3261.30	0.042	-0.42
Lon.mm	C	961.30	0.002	0.58
Lporcm ³	pH	3544.27	0.006	-0.54
Lporcm ³	C	415.59	< 0.001	0.82
Num	C	734.91	< 0.001	0.68
Nporcm ³	pH	3570.28	0.005	-0.55
Nporcm ³	C	452.60	< 0.001	0.80
Vol.mm ³	C	1245.98	0.024	0.46
Vporcm ³	pH	3544.27	0.006	-0.54
Vporcm ³	C	430.59	< 0.001	0.81

S=estadístico, p=valor de p, rho=rho de Spearman, Lon.mm=longitud total en mm, Num=número de poros, Nporcm³=número de poros por cm³, Lporcm³=longitud por cm³, Vporcm³=volumen por cm³, Vol.mm³=volumen total en mm³, C=carbono, N=nitrógeno.

El contenido de carbono y nitrógeno se relacionaron mejor con las variables descriptoras del espacio poroso y además son las que obtienen los valores de rho más altos, también el pH se relaciona pero de manera negativa. La correlación con mayor significancia para el BM fue la Lon.mm con el nitrógeno con un valor de rho de 0.84, mientras que la correlación significativa más débil fue la que se dio entre el %arena y la Lon.mm.

En la Tabla 13 se enumeran las correlaciones de Spearman estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para el bosque secundario.

Tabla 13.- Correlaciones de Spearman estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para Bosque secundario.

Variable descriptora del espacio poroso	Variable fisicoquímica	S	p	ρ
Lon.mm	C/N	3375.87	0.021	-0.47
Lon.mm	%limo	1307.78	0.035	0.43
Lon.mm	pH	847.10	< 0.001	0.63
Num	C/N	3348.62	0.025	-0.46
Num	pH	1075.40	0.007	0.53
Vol.mm ³	C/N	3370.82	0.022	-0.47
Vol.mm ³	%limo	1340.79	0.043	0.42
Vol.mm ³	pH	904.18	< 0.001	0.61

S=estadístico, p=valor de p, rho=rho de Spearman, Lon.mm=longitud total en mm, Num=número de poros, Vol.mm³=volumen total en mm³, C/N=relación carbono-nitrogeno, %Limo=porcentaje de limo en la muestra.

Las correlaciones mas fuertes para esta cobertura fueron entre el pH y la Lon.mm $\rho =$ (0.63), mientras que las correlaciones menos fuertes fueron las del %limo. Es importante observar que las correlaciones de C/N resultaron negativas.

Por último se presentan las correlaciones de Spearman estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para el pastizal (tabla 14).

Tabla 14.- Correlaciones de Spearman estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para Pastizal.

Variable descriptora del espacio poroso	Variable fisicoquímica	S	p	ρ
Lporcm	C/N	3441.99	0.014	-0.50
Lporcm	%arcilla	740.64	< 0.001	0.68
Nporcm ³	C/N	3415.65	0.016	-0.49
Nporcm ³	%arcilla	789.69	< 0.001	0.66
Vporcm ³	C/N	3400.45	0.018	-0.48
Vporcm ³	%limo	3244.21	0.046	-0.41
Vporcm ³	%arcilla	698.61	< 0.001	0.70

S=estadístico, p=valor de p, rho=rho de Spearman, Nporcm³=número de poros por cm³, Lporcm³=longitud por cm³, Vporcm³=volumen por cm³, C/N=relación carbono-nitrógeno, %limo=porcentaje de limo en la muestra, %arcilla=porcentaje de arcilla en la muestra.

Para esta cobertura, las correlaciones mas significativas son las que incluyen al %arcilla, mientras que las mas bajas fueron las de C/N. Es importante observar que las correlaciones que incluyen a la relación C/N al igual que en el bosque secundario resultaron negativas.

5.3.3 Relación entre profundidad, variables descriptoras y propiedades fisicoquímicas

En lo que respecta a las correlaciones de Spearman donde se comparó el comportamiento de las variables para las diferentes profundidades, agrupando los usos del suelo se encontró que solo una relación correlación resultó estadísticamente significativa ($p < 0.05$) y fue la de longitud en mm con la relación carbono nitrógeno la cual tiene valor de rho -0.48 la cual se presento en la ultima profundidad, lo que quiere decir que los macroporos son mas largos cuando la cantidad de carbono y nitrógeno es mayor.

Las pruebas de Kruskal-Wallis que resultaron significativas para todo el conjunto de datos se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15.- Pruebas de Kruskal-Wallis estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Variable	Factor	J_i	Valor p	G.L.
%limo	prof	13.32	0.004	3
Nporcm ³	prof	10.13	0.017	3
Vporcm ³	prof	13.99	0.003	3
Lporcm	prof	9.73	0.0210	3
C	prof	18.24	< 0.001	3
%arena	uso	7.17	0.028	2
N	uso	21.87	< 0.001	2
Vol.mm ³	uso	19.55	< 0.001	2
Length.mm	uso	22.82	< 0.001	2
Nporcm ³	uso	8.56	0.013	2
Vporcm ³	uso	7.27	0.0264	2
Lporcm	uso	8.69	0.0130	2
pH	uso	21.49	< 0.001	2

J_i =estadístico, p =valor de p , G.L.=grados de libertad, Length.mm=longitud total en mm, N=número de poros, Nporcm³=número de poros por cm³, Lporcm=longitud por cm, Vporcm³=volumen por cm³, Vol.mm³=volumen total en mm³, C=carbono, Nit=nitrógeno, prof=profundidad, uso=uso de suelo.

En el análisis posterior para ver que muestras presentan diferencias en lo que respecta a las relaciones del factor profundidad con las variables Nporcm³, Lporcm y %limo, la

diferencia se encuentra entre la primera y última profundidad, mientras que con las variables C y V_{porcm}^3 las diferencias se muestran entre la primera y tercera profundidad además entre la primera y última profundidad, mientras que para la variable Nit se muestran diferencias entre la primera y tercera profundidad además entre la primera y tercera profundidad y entre la segunda y tercera profundidad.

Al realizar el análisis empleando el uso de suelo como factor se muestran diferencias entre los usos pastizal y secundario para las variables %arena, N, $Vol.mm^3$, Length.mm, N_{porcm}^3 , V_{porcm}^3 , L_{porcm} y mientras que las variables N, Length.mm y $Vol.mm^3$ muestran diferencias entre los usos maduro y secundario, la única variable que mostró diferencias entre los usos maduro y pastizal fue el pH.

Las pruebas de Kruskal-Wallis para las variables por uso de suelo revelaron que para el bosque maduro las variables N_{porcm}^3 , V_{porcm}^3 y L_{porcm} existe diferencia entre la primera y última profundidad, para el uso de pastizal encontramos que existe diferencia entre la primera y tercera profundidad para las variables %limo, relación carbono-nitrógeno y densidad aparente, así como también entre la primera y última profundidad para el %limo, por último para el bosque secundario encontramos que existen diferencias entre la primera y la tercera profundidad y la primera y última profundidad para las variables carbono y nitrógeno, mientras que para la variable densidad aparente y el pH existió diferencia entre las clases texturales SiClLo y SiLo y entre SiCl y SiLo respectivamente.

5.4 Análisis de complejidad

5.4.1 Análisis estructural

En la Tabla 16 se presentan los resultados correspondientes al análisis de complejidad llevado a cabo en los núcleos inalterados para todos los poros encontrados en la muestra. Los resultados muestran que en la mayoría de los sitios el núcleo extraído en la parte media del transecto obtuvo el mayor número de árboles (revisar sección 4.4). El número de árboles es similar entre los distintos usos del suelo. Los niveles de Ramificación máximos (NR+) se encontraron en el BM. Sin embargo, hay sitios de pastizal con NR+ elevados.

En conjunto los sitios de BS fueron los que obtuvieron la mayor cantidad de árboles en total de los cuales el 91% esta ocupado por árboles con nivel de ramificación 1, también en el BS se encontró el sitio con el menor número de árboles en total. En el BM el 86% del total de los árboles corresponden a árboles con nivel de ramificación 1, además se encontró el árbol mas ramificado y el sitio con el mayor número de árboles con nivel de ramificación 1. El P obtuvo el menor número total de árboles de los cuales el 88% corresponden a árboles con nivel de ramificación 1, el conjunto de sitios del PTG fueron los que obtuvieron la menor cantidad de árboles.

Tabla 16.- Análisis de complejidad para los 18 núcleos estudiados.

Sitio	TA	VTamm ³	LTamm	NR+	NR+Vmm ³ (%)	NR+Lmm(%)	NR1	NR1Vmm ³ (%)	NR1Lmm(%)
BMDPa	294	14748	27308	67	14133 (95)	24129 (88)	266	344 (2)	1892 (7)
BMDPm	279	6993	15256	38	1732 (24)	5718 (37)	239	346 (5)	1941 (13)
BMDPb	431	5065	29020	84	905 (18)	4954 (17)	334	334 (7)	2002 (7)
BMLCa	417	7148	22562	56	5570 (78)	14508 (64)	354	402 (6)	2396 (11)
BMLCm	569	17989	47689	47	17029 (95)	42035 (88)	532	661 (4)	3971 (8)
BMLCb	274	1703	6477	31	310 (18)	1723 (27)	233	543 (32)	2020 (31)
BS1a	503	5725	11747	28	4359 (76)	4669 (40)	462	670 (12)	4093 (35)
BS1m	541	10323	12809	20	6520 (63)	2358 (18)	492	654 (6)	3989 (31)
BS1b	497	24840	30645	62	15437 (62)	21794 (71)	460	515 (2)	3068 (10)
BS2a	168	19092	30836	48	11528 (60)	19030 (62)	155	641 (3)	1010 (3)
BS2m	536	4353	21780	56	2486 (57)	9492 (44)	477	345 (8)	2730 (13)
BS2b	434	13064	44661	60	11525 (88)	37384 (84)	398	300 (2)	2384 (5)
PLa	478	2237	11962	28	461 (21)	1916 (16)	403	343 (19)	2995 (25)
PLm	517	2071	10735	21	453 (22)	1759 (16)	475	683 (33)	4572 (42)
PLb	265	1837	7702	33	847 (46)	3120 (41)	234	309 (17)	2053 (27)
PTGa	285	4533	22468	45	3906 (86)	18798 (84)	248	224 (5)	1717 (8)
PTGm	249	3470	10163	31	1822 (53)	4420 (43)	222	260 (7)	1640 (16)
PTGb	361	7177	29647	56	5376 (75)	20521 (69)	316	377 (5)	2415 (8)

TA=total de árboles, VTamm³=volumen total de los poros, LTamm=longitud total de los poros, NR+=nivel de ramificación mas alto, NR+Vmm³(%)=volumen del árbol con el nivel de ramificación mas alto, NR+Lmm(%)=longitud del árbol con el nivel de ramificación mas alto, NR1=total de árboles con nivel de ramificación 1, NR1Vmm³(%)=volumen de los árboles con el nivel de ramificación 1, NR1Lmm(%)=longitud de los árboles con el nivel de ramificación 1.

En el BS los árboles mas ramificados representaron el mayor porcentaje de volumen total de la muestra. En lo que respecta al porcentaje de longitud ocupado por los árboles mas ramificado el BM fue el que obtuvo los mayores porcentajes. Para el porcentaje de volumen y de longitud ocupado por los árboles con nivel de ramificación 1 el P obtuvo el valor mas

alto.

En la Figura 28 se muestra la grafica de boxplot para la única variable que mostro diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) el volumen total de árboles entre los distintos usos de suelo. La prueba de Tukey solo encontró diferencia estadísticamente significativa entre el BS y el P para esta variable.

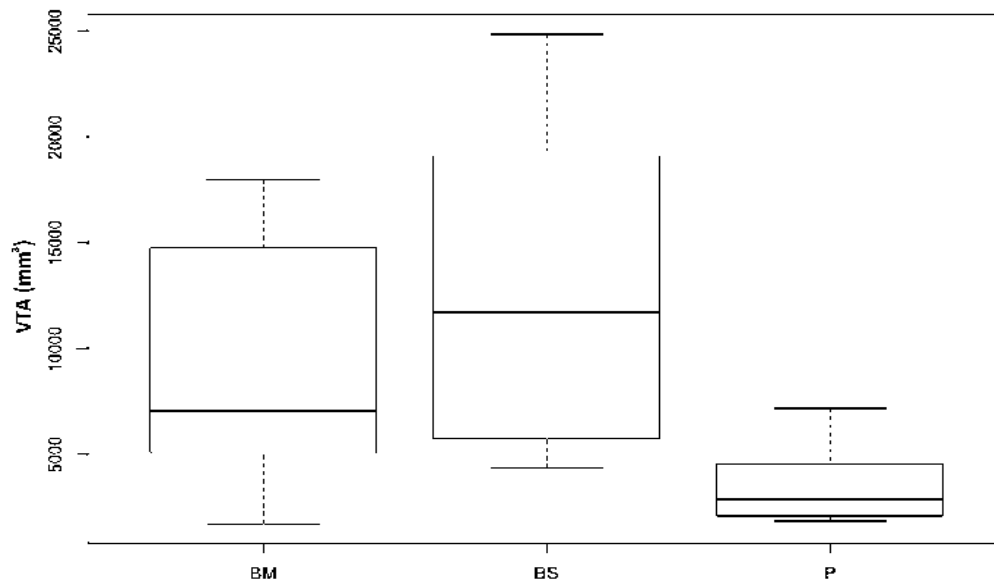


Figura 28.- Gráfica de caja y bigotes del volumen total de árboles en los tres diferentes usos de suelo BM=bosque maduro, BS=bosque secundario, P=pastizal.

5.4.2 Análisis estructural para los poros con diámetro mayor de 0.5mm

El análisis de complejidad llevado a cabo en los núcleos inalterados para todos los poros con diámetros mayores de 0.5mm encontrados, se presenta en la Tabla 17.

Para los árboles con poros de diámetro mayor de 0.5mm el uso de suelo con el mayor número fue el P, seguido por el BS en donde se encontró el árbol mas ramificado y por último el BM. En promedio el BM fue el que obtuvo el mayor nivel de ramificación en sus árboles, seguido del BS y por último el P. Para el porcentaje del volumen total y de la longitud total de los árboles con poros de diámetro mayor de 0.5mm el BS fue el que obtuvo los mayores porcentajes, seguido del P y por último el BM.

Tabla 17.- Análisis de complejidad para los árboles con poros de diámetro mayor de 0.5mm para los 18 núcleos estudiados.

Sitios	TA	VTAm ³	LTAm	NR+	NR+Vmm ³ (%)	NR+Lmm(%)
BMDPa	3	8006	2297	52	7999 (99)	7 (1)
BMDPm	5	3434	1007	32	335 (10)	283 (28)
BMDPb	3	56	52	55	15 (30)	15 (29)
BMLCa	6	2070	1178	50	1997 (96)	1111 (94)
BMLCm	1	7200	3663	47	7200 (100)	3663 (100)
BMLCb	5	661	129	29	14 (2)	16 (13)
BS1a	3	3514	1587	28	3411 (97)	1504 (95)
BS1m	6	7915	1300	17	1685 (21)	754 (58)
BS1b	3	16590	3326	56	9063 (55)	3326 (61)
BS2a	4	11136	3777	30	4925 (44)	1488 (39)
BS2m	7	736	492	45	664 (90)	416 (84)
BS2b	3	4450	2751	55	4116 (93)	2528 (92)
PLa	11	180	156	17	74 (41)	81 (52)
PLm	4	156	127	19	47 (30)	37 (29)
PLb	4	419	245	31	193 (46)	140 (57)
PTGa	3	572	432	41	479 (84)	370 (86)
PTGm	3	1374	846	29	866 (63)	529 (62)
PTGb	6	1098	918	55	958 (87)	781 (85)

TA=total de árboles, VTAm³=volumen total de los poros, LTAm=longitud total de los poros, NR+=nivel de ramificación mas alto, NR+Vmm³(%)=milímetros cúbicos del volumen del árbol con el nivel de ramificación mas alto, NR+Lmm(%)=milímetros de la longitud del árbol con el nivel de ramificación mas alto.

En general el BM obtuvo los valores mas bajos en todas las variables también se encontró un sitio donde el 100% del volumen y la longitud estuvieron ocupados por un solo árbol, además en el BM se encontró el árbol mas ramificado con el menor porcentaje representado del volumen total y de la longitud total. En el BS se encontraron los valores mas altos para el porcentaje de volumen y de longitud total representados por el árbol mas ramificado, también se encontró el mayor volumen y longitud total ocupado por estos árboles. En el P se obtuvo el mayor número de árboles con poros de diámetro mayor de 0.5 mm. Sesión de R para ver formato de graficas

En la Figura 29 se muestran las graficas de boxplot para las dos variables del análisis estructural de los árboles con poros de diámetro mayor de 0.5 mm, que mostraron diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$). El volumen total y la longitud total. La

prueba de Tukey solo se encontró diferencia estadística significativa entre el BS y el P para las dos variables.

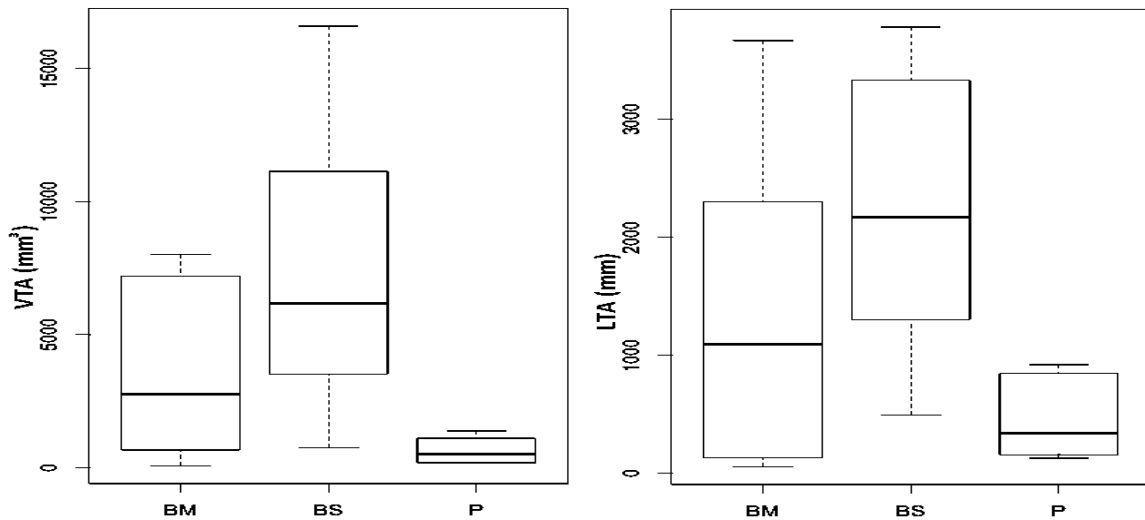


Figura 29.- grafica de boxplot para la variable volumen total (VTA) y longitud total (LTA) ocupado por los árboles con poros de diámetro mayor de 0.5mm.

5.5 Índices de complejidad

Los índices de complejidad analizados, son una propuesta conceptual y metodológica inédita, que permite reconocer patrones e identificar diferencias del sistema de poros reconstruido a partir imágenes tomográficas de rayos X. No existe precedentes en la literatura de este tipo de análisis, excepto el presentado por Luo (2009, 2010). Sin embargo, la principal diferencia entre la aproximación de Luo y ésta radica en que esta propuesta emplea índices que incorporan variables descriptoras con el nivel jerárquico de las estructuras de ramificación. En la tabla 18 se presentan los valores obtenidos para los índices de complejidad para todos los poros en la muestra para los 18 núcleos estudiados.

Los valores más altos para el índice de ramificación bajo para la variable longitud para la variable longitud se presentan en el BMLCb, en este sitio más del 50% de la longitud total de los árboles en la muestra esta representada por árboles poco ramificados, en promedio los sitios del PL fueron los que obtuvieron los valores más altos para el índice de ramificación bajo para la variable longitud. Para el índice de ramificación bajo para la variable volumen (es la proporción del volumen total de los árboles con poca ramificación > 5 en relación al volumen total de los árboles) el sitio BMLCm fue el que obtuvo el valor

más alto con un 70% del volumen total representado por árboles poco ramificados, de nuevo los sitios del PL fueron los que obtuvieron el promedio más alto.

Tabla 18. Valores de los índices de complejidad para todos los poros.

Sitio	R _b L	R _a L	I _{ac} L	R _b V	R _a V	I _{ac} V
BMDPa	0.1011	0.8988	0.1124	0.0354	0.9645	0.0367
BMDPm	0.2276	0.7723	0.2948	0.0980	0.9019	0.1087
BMDPb	0.1654	0.8345	0.1981	0.1595	0.8404	0.1898
BMLCa	0.1820	0.8179	0.2226	0.0996	0.9003	0.1106
BMLCm	0.1123	0.8876	0.1265	0.7094	0.2905	2.4415
BMLCb	0.5710	0.4289	1.3313	0.0503	0.9496	0.0530
BS1a	0.5155	0.4844	1.0644	0.1822	0.8177	0.2228
BS1m	0.4410	0.5589	0.7889	0.0291	0.9708	0.0300
BS1b	0.1377	0.8622	0.1597	0.0894	0.9105	0.0982
BS2a	0.0419	0.9580	0.0437	0.0357	0.9642	0.0370
BS2m	0.1996	0.8003	0.2494	0.0353	0.9646	0.0366
BS2b	0.0803	0.9196	0.0873	0.1369	0.8630	0.1586
PLa	0.4535	0.5464	0.8299	0.3938	0.6061	0.6497
PLm	0.5509	0.4490	1.2268	0.2887	0.7112	0.4060
PLb	0.4251	0.5748	0.7395	0.4448	0.5551	0.8013
PTGa	0.1256	0.8743	0.1437	0.0793	0.9206	0.0861
PTGm	0.2503	0.7496	0.3338	0.0788	0.9211	0.0856
PTGb	0.1198	0.8801	0.1362	0.1195	0.8804	0.1357

R_bL=índice de ramificación bajo para la longitud, R_aL=índice de ramificación alto para la longitud, I_{ac}L=índice de acoplamiento para la longitud, R_bV=índice de ramificación bajo para el volumen, R_aV=índice de ramificación alto para el volumen, I_{ac}V=índice de acoplamiento para el volumen.

Para el índice de ramificación alto para la variable longitud (es la proporción de la longitud total de los árboles con alta ramificación < 5 en relación longitud total de los árboles) el sitio con el valor más alto fue el BS2a en este sitio más del 90% de la longitud total de la muestra se encuentra representada por árboles ramificados. En promedio los sitios del BS2 fueron los que obtuvieron los valores mas altos para este índice. Para el índice de ramificación alto para la variable volumen (es la proporción del volumen total de los árboles con alta ramificación < 5 en relación al volumen total de los árboles) encontramos 4 sitios donde mas del 95% del volumen total de la muestra esta representado por árboles ramificados. En promedio los sitio del PTG fueron los que obtuvieron los valores más altos en este índice.

A partir de estos índices de ramificación se calculo el índice de acoplamiento. Para el índice de acoplamiento de la variable longitud los sitio que muestran el menor acoplamiento son los sitios del PL y los que muestran el mayor acoplamiento de sus árboles son los sitios del BS2. Para el índice de acoplamiento de la variable volumen los sitios que muestran el acoplamiento mas bajo de sus árboles son los sitios del BMLC, mientras que los sitios que muestran el acoplamiento mas alto de sus árboles son los sitios del BS2.

Índices de complejidad poros >0.5 mm

En forma análoga, se calcularon los índices de complejidad, para los poros de diámetro mayor de 0.5 mm. En la Tabla 19 se presentan los valores obtenidos para los índices de complejidad para estos poros.

Tabla 19. Valores de los índices de complejidad para los poros con diámetro mayor a 0.5mm.

Sitios	R _b L	R _a L	I _{ac} L	R _b V	R _a V	I _{ac} V
BMDPa	0.0028	0.9971	0.0028	0.0009	0.9990	0.0009
BMDPm	0.0174	0.9825	0.0177	0.0056	0.9943	0.0057
BMDPb	0	1	0	0	1	0
BMLCa	0.0202	0.9797	0.0206	0.0150	0.9849	0.0152
BMLCm	0	1	0	0	1	0
BMLCb	0.8740	0.1259	6.9418	0.9779	0.0220	44.361
BS1a	0	1	0	0	1	0
BS1m	0.0039	0.9960	0.0039	0.0006	0.9993	0.0006
BS1b	0.0013	0.9986	0.0013	0.0003	0.9996	0.0003
BS2a	0.0140	0.9859	0.0143	0.0450	0.9549	0.0471
BS2m	0.0746	0.9253	0.0807	0.0468	0.9531	0.0491
BS2b	0	1	0	0	1	0
PLa	0.3405	0.6594	0.5163	0.4817	0.5182	0.9296
PLm	0.1003	0.8996	0.1115	0.1307	0.8692	0.1504
PLb	0.0442	0.9557	0.0463	0.0295	0.9704	0.0304
PTGa	0	1	0	0	1	0
PTGm	0.0083	0.9916	0.0084	0.0042	0.9957	0.0042
PTGb	0.0027	0.9972	0.0027	0.0026	0.9973	0.0026

R_bL=índice de ramificación bajo para la longitud, R_aL=índice de ramificación alto para la longitud, I_{ac}L=índice de acoplamiento para la longitud, R_bV=índice de ramificación bajo para el volumen, R_aV=índice de ramificación alto para el volumen, I_{ac}V=índice de acoplamiento para el volumen.

Para el índice de ramificación bajo para los árboles con poros de diámetro mayor a los 0.5mm para la variable longitud encontramos que en 5 sitios el 100% del total de la

longitud esta representada por árboles con un nivel de ramificación > 5 . Para el índice de ramificación bajo de la variable volumen para los árboles con poros de diámetro mayor a los 0.5 mm, en 5 sitios el 100% del total del volumen esta representado por árboles con un nivel de ramificación > 5 . En conjunto los sitios de BMLC tuvieron el promedio más alto para este índice en las dos variables y los sitios de BS1 obtuvieron el promedio más bajo para este índice en las dos variables. El sitio que presento el valor mas alto en el índice de ramificación bajo tanto para la longitud como para el volumen fue el BMLCb.

Para el índice de ramificación alto para la variable longitud se encontraron 5 sitios donde el 100% de la longitud de la muestra esta representada en árboles con nivel de ramificación >5 , Para el índice de ramificación alto para la variable volumen, se encontraron 5 sitios en los cuales el 100% del volumen esta representado por árboles con nivel de ramificación >5 . Los sitios de BMLC obtuvieron el promedio más bajo para este índice, mientras que los sitios de BS1 fueron los que tuvieron el promedio mas alto. el sitio BMLCb fue el sitio con el valor más bajo para este índice en las dos variables.

Se calculo el índice de acoplamiento para las variables longitud y volumen para los poros con diámetro mayor de 0.5 mm. Para estos dos índices encontramos un total de 5 sitios donde el 100% de sus árboles se encuentran acoplados ya que obtuvieron un valor de 0 para este índice. También para las dos variables de nuevo los sitios menos acoplados fueron el BMLCb y el PLa. Al igual en el promedio de los sitios los de BMLC fueron los mas desacoplados para las dos variables y también el promedio mas cercano a 0 fue el de los sitios de BS1.

Posteriormente se realizó un análisis comparativo entre el volumen y la longitud total representada por todos los árboles y el volumen y la longitud solo de los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm para obtener el porcentaje de volumen y longitud que representan los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm con respecto al total obtenido con todos los árboles los valores se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores de volumen y longitud de todos los árboles y los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm.

Sitios	VTmm ³	LTmm	VTmm ³ 0.5	LTmm0.5	%V0.5	%L0.5
BMDPa	14748	27308	8006	2297	54.29	8.41
BMDPm	6993	15256	3434	1007	49.11	6.6
BMDPb	5065	29020	56	52	1.12	0.18
BMLCa	7148	22562	2070	1178	28.97	5.22
BMLCm	17989	47689	7200	3663	40.02	7.68
BMLCb	1703	6477	661	129	38.85	2
BS1a	5725	11747	3514	1587	61.39	13.51
BS1m	10323	12809	7915	1300	76.67	10.16
BS1b	24840	30645	16590	3326	66.79	10.85
BS2a	19092	30836	11136	3777	58.33	12.25
BS2m	4353	21780	736	492	16.91	2.26
BS2b	13064	44661	4450	2751	34.06	6.16
PLa	2237	11962	180	156	8.07	1.31
PLm	2071	10735	156	127	7.54	1.19
PLb	1837	7702	419	245	22.83	3.19
PTGa	4533	22468	572	432	12.63	1.93
PTGm	3470	10163	1374	846	39.6	8.33
PTGb	7177	29647	1098	918	15.31	3.1

VTmm³=volumen total de todos los árboles, LTmm=longitud total de todos los árboles, VTmm³0.5=volumen total de los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm, LTmm0.5=longitud total de los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm, %V0.5=porcentaje del volumen total ocupado por los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm, %L0.5=porcentaje de la longitud total ocupada por los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm.

Para volumen total de los árboles en la muestra, el volumen representado por los árboles con poros de diámetro mayor de 0.5mm, la longitud total de los árboles en la muestra y la longitud representada por los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm se encontró que en promedio los sitios con los valores mas altos fueron los de BS seguidos por los sitios de BM y al último los sitios de P. En conjunto los sitios de BS obtuvieron el mayor porcentaje del volumen representado por los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm y el mayor porcentaje de la longitud total representada por los árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm seguido por los sitios de BM y al final los de P, cabe hacer mención que el promedio de los sitios del PL tuvieron menos del 2% de la longitud de árboles con poros de diámetro mayor a 0.5mm.

También se puede observar que los porcentajes de volumen total ocupados por los árboles con poros de diámetro mayor a los 0.5mm son mucho mayores en promedio con un 35.1%, a los porcentajes de la longitud representada por los árboles con poros de diámetro mayor a los 0.5mm los cuales solo fueron en promedio de 5.7%, lo que nos indica que los árboles con poros de diámetro mayores a 0.5mm son árboles cortos en longitud pero con un volumen bastante representativo.

5.6 Pruebas de Conductividad Hidráulica Saturada

Se realizaron pruebas de laboratorio con los núcleos de suelo con el fin de obtener la conductividad hidráulica para cada muestra con mediciones de 12 a 24 hrs tomando datos cada 60 segundos. Con los datos obtenidos en forma automática, se realizaron gráficas de lámina acumulada vs. tiempo (Figura 30) para establecer la parte estable de las mediciones y derivar de ésta los valores de conductividad hidráulica saturada para cada núcleo de suelo.

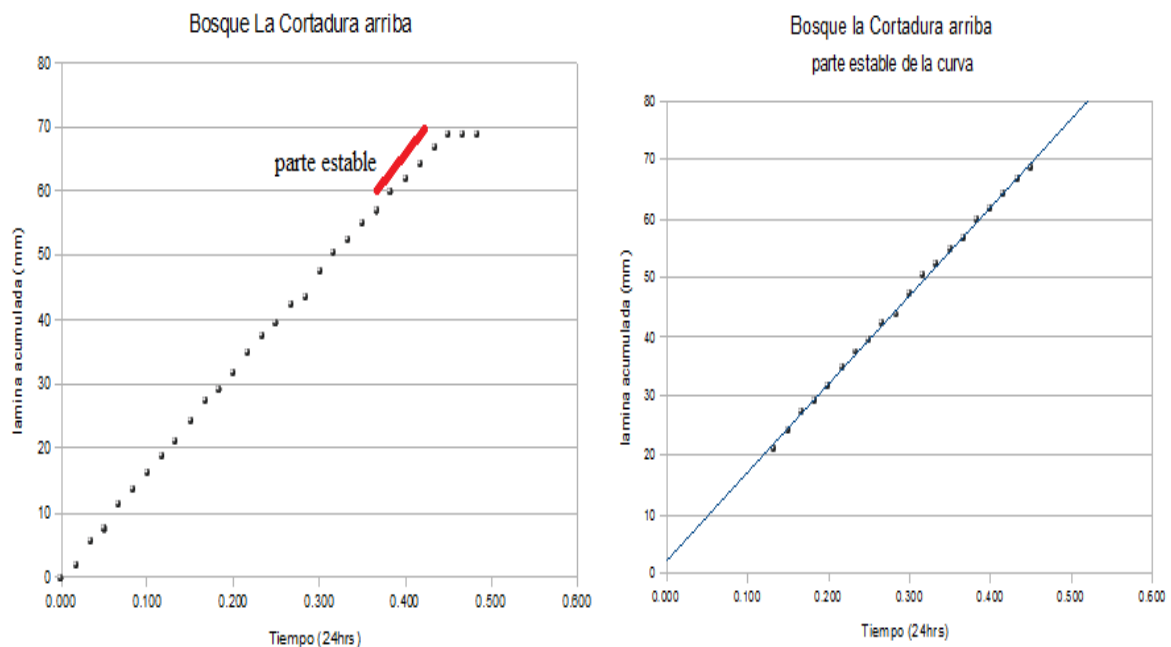


Figura 30.-Lámina acumulada en función del tiempo para una de las muestras.

Mediante el despeje de K de la ecuación de Darcy pudimos obtener los valores de la conductividad hidráulica saturada para los 18 sitios (Tabla 21 y Figura 31).

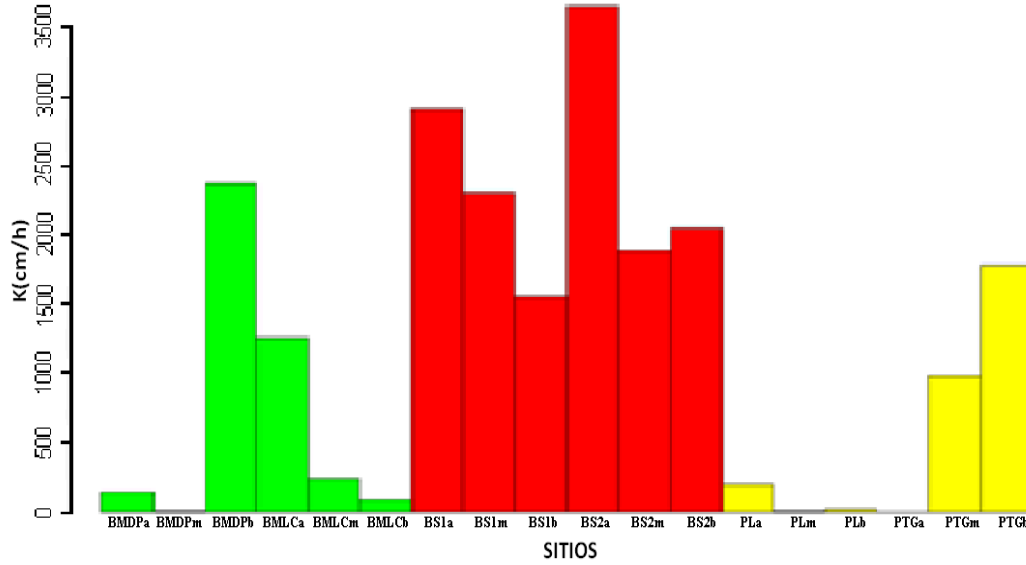


Figura 31. Valores de la conductividad hidráulica saturada en cm(hr) para los 18 sitios.

Tabla 21.-Datos de conductividad hidráulica saturada K (cm/h) y flujo de agua Q (cm/h) para los 18 sitios muestreados.

Sitios	K(cm/h)	Q(cm/h)
BMDPa	147.8	29096.5
BMDPm	4.5	862.6
BMDPb	2377.7	447332.6
BMLCa	1255.9	233990.6
BMLCm	86.7	16996.1
BMLCb	244.3	46918.4
BS1a	2911.1	566096.6
BS1m	2310.2	441491.4
BS1b	1551.4	302218.1
BS2a	3654.2	704397.3
BS2m	1893.4	376372.4
BS2b	2052.1	388532.3
PLa	195.8	36690.3
PLm	22.0	4144.4
PLb	1.3	260.3
PTGa	0.0	0.0
PTGm	1781.8	350465.8
PTGb	977.4	191410.1

K(cm/h): conductividad hidráulica saturada en cm por hora, Q(cm/h): flujo en centímetros por hora.

El sitio que presenta la mayor conductividad hidráulica saturada es el BS2a, mientras que

el valor más bajo se presenta en el PLb, cabe señalar que la diferencia es hasta 3000 veces mayor en el sitio de BS. El núcleo extraído del PTGa se dejó hidratando por más de un mes y no infiltró nada. Haciendo un promedio de los valores de la conductividad hidráulica saturada para cada tipo de uso de suelo, el BS es el que obtiene el promedio más alto con 2395.4 cm por hora, seguido por el BM con 686.1 cm por hora y por último el P con 496.4 cm por hora (Figura 32).

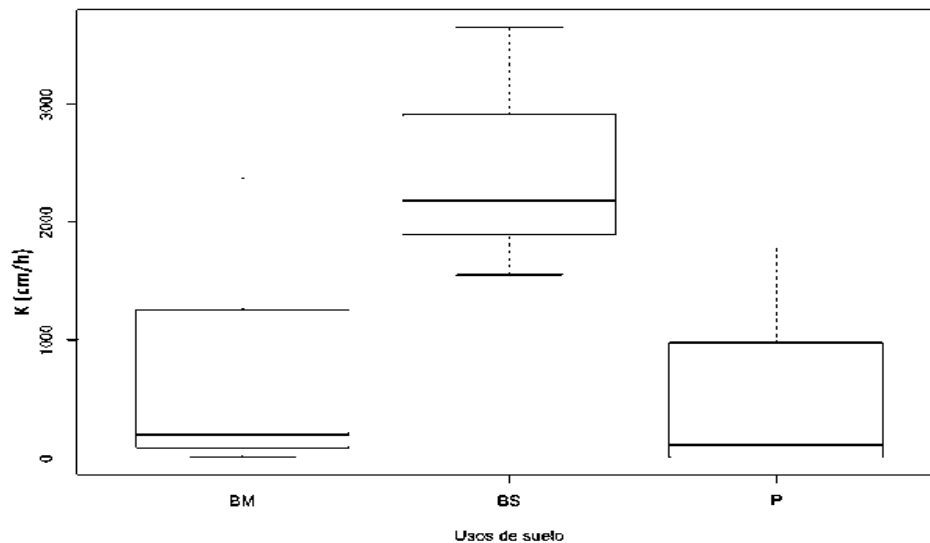


Figura 32.- Grafica de boxplot para la conductividad hidráulica saturada K (cm/h) y los distintos usos de suelo.

Con el análisis de varianza se encontró que existe una diferencia estadística significativa ($p < 0.5$) para la conductividad hidráulica saturada y los distintos usos de suelo ($P = 0.00196$), además se realizó una prueba de Tukey para hacer la comparación de las medias y encontrándose que BS es diferente de BM y P, pero que no existe diferencia entre BM y P.

5.7 Correlaciones entre variables descriptoras y conductividad hidráulica saturada

5.7.1 Macroporos

Se hicieron correlaciones de Pearson entre los valores obtenidos para las variables descriptoras para los poros con diámetro mayor de 0.5 mm y los valores obtenidos de la conductividad hidráulica saturada para los 18 núcleos trabajados. No se encontraron correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica saturada para los macroporos, los valores de las correlaciones se

muestran en la siguiente tabla 22.

Tabla 22. Correlaciones de Pearson entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica saturada para todos los sitios.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
N	0.34226	0.1645	16
V.mm ³	0.33557	0.1734	16
Lon.mm	0.31655	0.2006	16
N.cm ³	0.41893	0.08356	16
V.cm ³ .cm ³	0.40993	0.09112	16
L.cm.cm ³	0.39464	0.1051	16

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, N=número de macroporos, Vol.mm³=volumen total de macroporos, Lon.mm=longitud total de macroporos, N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud en cm de macroporos por cm³.

También se hicieron las correlaciones de Pearson para estas mismas variables y la conductividad hidráulica saturada para los poros con diámetro mayor de 0.5 mm para cada uso de suelo, para observar alguna tendencia en relación al cambio de uso de suelo. continuación se presentan los resultados de las correlaciones para el BM (tabla 23). No se encontró ninguna correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

Tabla 23.-Correlaciones de Pearson entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica saturada de los macroporos para el BM.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
N	-0.4966	0.3163	4
V.mm ³	-0.6297	0.1803	4
Lon.mm	-0.5213	0.2889	4
N.cm ³	-0.4389	0.384	4
V.cm ³ .cm ³	-0.6113	0.1973	4
L.cm.cm ³	-0.4819	0.3332	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, N=número de macroporos, Vol.mm³=volumen total de macroporos, Lon.mm=longitud total de macroporos, N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud en cm de macroporos por cm³.

Al igual que con el bosque maduro en el bosque secundario no se encontró ninguna correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$), los resultados de las correlaciones de Pearson para los sitios de BS se presentan a continuación (tabla 24).

Tabla 24.-Correlaciones de Pearson entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica saturada de los macroporos para el BS.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
N	-0.0903	0.8649	4
V.mm ³	-0.0336	0.9497	4
Lon.mm	-0.0502	0.9248	4
N.cm ³	0.1667	0.7522	4
V.cm ³ .cm ³	0.1863	0.7238	4
L.cm.cm ³	0.1840	0.7271	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, N=número de macroporos, Vol.mm³=volumen total de macroporos, Lon.mm=longitud total de macroporos, N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud en cm de macroporos por cm³.

Para el P todas las correlaciones de Pearson resultaron estadísticamente significativas, a continuación se presentan los resultados obtenidos para las correlaciones del P (Tabla 25).

Tabla 25.- Valores obtenidos para las correlaciones de Pearson entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica saturada de los macroporos para el P.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
N	0.8713	0.0238	4
V.mm ³	0.9141	0.0108	4
Lon.mm	0.8488	0.0326	4
N.cm ³	0.8710	0.0239	4
V.cm ³ .cm ³	0.9144	0.0107	4
L.cm.cm ³	0.8492	0.0324	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, N=número de macroporos, Vol.mm³=volumen total de macroporos, Lon.mm=longitud total de macroporos, N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud en cm de macroporos por cm³.

5.7.2 Mesoporos

Ahora en lo que respecta a los poros entre los 0.2mm y justo por debajo de los 0.5mm o mesoporos, también se hicieron correlaciones de Pearson para ver si existía alguna correlación estadísticamente significativa, los resultados de las correlaciones se presentan en la siguiente tabla (Tabla 26).

Tabla 26.-Correlaciones de Pearson entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica saturada para todos los sitios.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
N	0.0818	0.7469	16
V.mm ³	0.1475	0.5592	16
Lon.mm	0.0893	0.7245	16
N.cm ³	0.1727	0.4932	16
V.cm ³ .cm ³	0.2501	0.3168	16
L.cm.cm ³	0.1930	0.4429	16

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, N=número de macroporos, Vol.mm³=volumen total de macroporos, Lon.mm=longitud total de macroporos, N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud en cm de macroporos por cm³.

Como se puede ver en la tabla no hubo correlaciones estadísticamente significativas (p<0.05) para las variables descriptoras y la conductividad hidráulica saturada para los mesoporos.

También se hicieron las respectivas correlaciones de Pearson para estas mismas variables y la conductividad hidráulica saturada para los mesoporos para cada uso de suelo distinto, para probar si son estadísticamente significativas. A continuación se presentan los resultados de las correlaciones de Pearson para los sitios de BM (Tabla 27).

Tabla 27.-Correlaciones de Pearson entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica de los mesoporos para el bosque maduro.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
N	0.3958	0.4372	4
V.mm ³	-0.1042	0.8442	4
Lon.mm	0.1436	0.7861	4
N.cm ³	0.4628	0.3554	4
V.cm ³ .cm ³	-0.0172	0.9743	4
L.cm.cm ³	0.2138	0.6841	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, N=número de macroporos, Vol.mm³=volumen total de macroporos, Lon.mm=longitud total de macroporos, N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud en cm de macroporos por cm³.

Ahora las correlaciones de Pearson para los sitios de BS se presentan a continuación (tabla 28). Al igual que con el BM en el BS no se no se encontró ninguna correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

Tabla 28.- Valores de las correlaciones de Pearson entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica de los mesoporos para el BS.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
N	0.2129916	0.6853	4
V.mm ³	0.1108486	0.8344	4
Lon.mm	0.2708622	0.6036	4
N.cm ³	0.4457176	0.3757	4
V.cm ³ .cm ³	0.3588153	0.4849	4
L.cm.cm ³	0.489615	0.3243	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, N=número de macroporos, Vol.mm³=volumen total de macroporos, Lon.mm=longitud total de macroporos, N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud en cm de macroporos por cm³.

Por último se muestran las correlaciones de Pearson entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica saturada para el P (tabla 29).

Tabla 29.- Valores de las correlaciones de Pearson entre las variables descriptoras y la conductividad hidráulica de los mesoporos para el P.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
N	0.3698	0.4706	4
V.mm ³	0.3669	0.4744	4
Lon.mm	0.3332	0.5187	4
N.cm ³	0.3690	0.4716	4
V.cm ³ .cm ³	0.3352	0.5161	4
L.cm.cm ³	0.3407	0.5087	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, N=número de macroporos, Vol.mm³=volumen total de macroporos, Lon.mm=longitud total de macroporos, N.cm³=número de macroporos por cm³, V.cm³.cm³=volumen en cm³ de los macroporos por cm³, L.cm.cm³=longitud en cm de macroporos por cm³.

No se encontró ninguna correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$), los resultados de las correlaciones de Pearson para los sitios de P.

5.8 Correlaciones entre variables fisicoquímicas y conductividad hidráulica saturada

Se hicieron correlaciones de Pearson entre los valores obtenidos para las variables fisicoquímicas y los valores obtenidos de la conductividad hidráulica saturada para los 18 núcleos. A continuación se presentan los resultados de las correlaciones (tabla 30)

Tabla 30.- Correlaciones de Pearson entre las variables fisicoquímicas y la conductividad hidráulica para todos los sitios.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
pH	-0.3292	0.1822	16
C	0.0160	0.9496	16
N	0.0979	0.6992	16
C/N	-0.1764	0.4839	16
%Hum	-0.4968	0.0360	16
D.R.	0.2095	0.4042	16
D.A.	0.2229	0.3739	16
P.T.	-0.1577	0.5321	16
%Limo	-0.1167	0.6448	16
%Arcilla	0.1348	0.5939	16
%Arena	-0.0839	0.7406	16

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, pH=potencial de hidrogeno, C=carbono, N=nitrógeno, C/N=relacion carbono-nitrógeno, %Hum=porcentaje de humedad, D.R.=densidad real, D.A.=densidad aparente, P.T.=porosidad total, %Limo=porcentaje de limo, %Arcilla=porcentaje de arcilla, %Arena=porcentaje de arena.

Se encontró una correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$) de manera negativa entre el porcentaje de humedad y la conductividad hidráulica saturada ($p = 0.0360$).

También se hicieron las correlaciones de Pearson entre las variables fisicoquímicas y la conductividad hidráulica saturada para cada cobertura/uso de suelo, para observar alguna tendencia en relación al cambio de uso de suelo. A continuación se presentan valores obtenidos para las correlaciones de Pearson para el BM (tabla 31). No se encontró ninguna correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

Tabla 31.-Correlaciones de Pearson entre las variables fisicoquímicas y la conductividad hidráulica para el BM.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
pH	-0.2916	0.575	4
C	-0.3809	0.4563	4
N	-0.4648	0.353	4
C/N	-0.2374	0.6505	4
%Hum	-0.4841	0.3306	4
D.R.	0.3902	0.4444	4
D.A.	0.5627	0.245	4
P.T.	-0.4421	0.38	4
%Limo	-0.7278	0.1011	4
%Arcilla	0.2631	0.6144	4
%Arena	0.4641	0.3538	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, pH=potencial de hidrogeno, C=carbono, N=nitrógeno, C/N=relacion carbono-nitrógeno, Peso gr.=peso fresco de la muestra en gramos, %Hum=porcentaje de humedad, D.R.=densidad real, D.A.=densidad aparente, P.T.=porosidad total, %Limo=porcentaje de limo, %Arcilla=porcentaje de arcilla, %Arena=porcentaje de arena.

Ahora en la tabla 32 se presentan los valores obtenidos para las correlaciones de Pearson para el BS. No se encontró ninguna correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

Tabla 32.- Correlaciones de Pearson entre las variables fisicoquímicas y la conductividad hidráulica para el BS.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
pH	-0.2944	0.5711	4
C	0.3589	0.4848	4
N	0.2640	0.6132	4
C/N	0.6368	0.1739	4
%Hum	0.5741	0.2334	4
D.R.	-0.4790	0.3364	4
D.A.	-0.6397	0.1713	4
P.T.	0.6473	0.1647	4
%Limo	-0.0921	0.8623	4
%Arcilla	-0.0884	0.8678	4
%Arena	0.2724	0.6016	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, pH=potencial de hidrogeno, C=carbono, N=nitrógeno, C/N=relacion carbono-nitrógeno, Peso gr.=peso fresco de la muestra en gramos, %Hum=porcentaje de humedad, D.R.=densidad real, D.A.=densidad aparente, P.T.=porosidad total, %Limo=porcentaje de limo, %Arcilla=porcentaje de arcilla, %Arena=porcentaje de arena.

Por último para el P se muestran los resultados de las correlaciones de Pearson en la Tabla 33 . No se encontró ninguna correlación de Pearson estadísticamente significativa ($p < 0.05$) para las variables fisicoquímicas y la conductividad hidráulica saturada.

Tabla 33.- Correlaciones de Pearson entre las variables fisicoquímicas y la conductividad hidráulica para el P.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
pH	0.1555	0.7687	4
C	0.1518	0.7741	4
N	0.7586	0.08035	4
C/N	-0.5654	0.2422	4
%Hum	-0.5956	0.2122	4
D.R.	0.2451	0.6397	4
D.A.	0.4624	0.3559	4
P.T.	-0.2685	0.607	4
%Limo	-0.1577	0.7654	4
%Arcilla	-0.1986	0.706	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, pH=potencial de hidrogeno, C=carbono, N=nitrógeno, C/N=relacion carbono-nitrógeno, Peso gr.=peso fresco de la muestra en gramos, %Hum=porcentaje de humedad, D.R.=densidad real, D.A.=densidad aparente, P.T.=porosidad total, %Limo=porcentaje de limo en la muestra, %Arcilla=porcentaje de arcilla, %Arena=porcentaje de arena.

5.9 Correlaciones índices de complejidad y conductividad hidráulica saturada

No se encontró ninguna correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$) entre los índices de complejidad y la conductividad hidráulica saturada (tabla 34).

Tabla 34.- Correlaciones de Pearson entre los índices de complejidad y la conductividad hidráulica saturada para todos los sitios.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
RbL	-0.2041429	0.4165	16
RaL	0.2041428	0.4165	16
RbV	-0.4217592	0.08128	16
RaV	0.4217592	0.08128	16
IacL	-0.1941214	0.4402	16
IacV	-0.363544	0.1381	16

r=coeficiente de Pearson, p=valor de p, RbL: índice de ramificación bajo longitud, RaL: índice de ramificación alto longitud, RbV: índice de ramificación bajo volumen, RaV: índice de ramificación alto volumen, IacL: índice de acoplamiento longitud, IacV: índice de acoplamiento volumen.

También se hicieron las correspondientes correlaciones de Pearson entre los índices de complejidad y la conductividad hidráulica saturada para cada uso de suelo. Los resultados de las correlaciones de Pearson para los sitios de BM se muestran en la tabla 35. No se encontró ninguna correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

Tabla 35.- Correlaciones de Pearson entre los índices de complejidad y la conductividad hidráulica saturada para los sitios de BM.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
RbL	-0.175	0.7392	4
RaL	0.175	0.7392	4
RbV	-0.169	0.748	4
RaV	0.169	0.748	4
IacL	-0.207	0.6926	4
IacV	-0.263	0.6137	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, RbL: índice de ramificación bajo longitud, RaL: índice de ramificación alto longitud, RbV: índice de ramificación bajo volumen, RaV: índice de ramificación alto volumen, IacL: índice de acoplamiento longitud, IacV: índice de acoplamiento volumen.

A continuación se presentan los resultados de las correlaciones de Pearson para los sitios de BS (tabla 36). No se encontró ninguna correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$) para el BS.

Tabla 36.- Correlaciones de Pearson entre los índices de complejidad y la conductividad hidráulica saturada para los sitios de bosque secundario.

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
RbL	0.049	0.9263	4
RaL	-0.049	0.9263	4
RbV	-0.015	0.9768	4
RaV	0.015	0.9768	4
IacL	0.151	0.774	4
IacV	0.010	0.984	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, RbL: índice de ramificación bajo longitud, RaL: índice de ramificación alto longitud, RbV: índice de ramificación bajo volumen, RaV: índice de ramificación alto volumen, IacL: índice de acoplamiento longitud, IacV: índice de acoplamiento volumen.

Por último se muestran los resultados de las correlaciones de Pearson entre los índices de complejidad y la conductividad para los sitios de P (tabla 37). No se encontró ninguna

correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

Tabla 37.- Correlaciones de Pearson entre los índices de complejidad y la conductividad hidráulica saturada para los sitios de pastizal

Variable independiente	r	p	Grados de libertad
RbL	-0.437	0.3861	4
RaL	0.437	0.3861	4
RbV	-0.592	0.215	4
RaV	0.0154	0.215	4
IacL	-0.483	0.3314	4
IacV	-0.572	0.2347	4

r=coeficiente de correlación de Pearson, p=valor de p, RbL: índice de ramificación bajo longitud, RaL: índice de ramificación alto longitud, RbV: índice de ramificación bajo volumen, RaV: índice de ramificación alto volumen, IacL: índice de acoplamiento longitud, IacV: índice de acoplamiento volumen.

6 DISCUSION

6.1 Respondiendo a las preguntas de investigación

Retomando la pregunta de investigación planteadas en este trabajo, a saber si existen diferencias cuantitativas y de forma en la macroporosidad edáfica entre las diferentes coberturas vegetales y usos de suelo, los datos obtenidos para las variables descriptoras del espacio poroso calculadas mediante el análisis de la imágenes 2D y la posterior reconstrucción de la superficie isométrica de la red de macroporos, mostraron diferencias cualitativas y cuantitativas estadísticamente significativas entre los distintos usos de suelo para el número de poros por unidad de volumen, el volumen de espacio poroso (volumen de poros/volumen de suelo), la longitud del espacio poroso (longitud de poros/volumen de suelo) (ver Sección 5.1.1), el número de árboles existentes en la muestra, que tan complejos son estos árboles, el volumen y longitud total que ocupan estos árboles en el núcleo de suelo muestreado.

Para los índices de complejidad no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los distintos usos de suelo, aunque no se encontró diferencia estadística significativa los árboles en los sitios de BM estuvieron mas acoplados y fueron mas ramificados y por lo tanto mas complejos, seguidos por los sitios de BS y por último los sitios de P.

Los sitios de bosque secundario obtuvieron la mayor cantidad de macroporos , así como la mayor cantidad de volumen y longitud de la muestra ocupada por macroporos, el mayor número de árboles en la muestra, asi como el mayor volumen y longitud ocupado por los árboles y la mayor cantidad de árboles sin ramificacion. Los sitios de bosque maduro obtuvieron el nivel de ramificacion mas alto para sus árboles, también encontramos un número menor de árboles sin ramificacion y un menor porcentaje de volumen y longitud ocupado por estos árboles, además en promedio obtuvieron los valores mas altos para los índices de acoplamiento y para los índices de ramificación alto. Por último los sitios de pastizal obtuvieron el mayor número de árboles con poros de diametro mayor de 0.5mm, también obtuvieron los valores mas altos para los índices de ramificación bajos para las variables longitud y volumen.

Todo lo anterior nos muestra que si existe un efecto del cambio del uso de suelo sobre estructura y complejidad del espacio macroporoso del suelo. Collof et al. (2010), encontró también una diferencia estadísticamente significativa entre las características cuantitativas y cualitativas de los macroporos debida al cambio de uso de suelo. En el estudio que se llevo a cabo en Australia, en un pastizal y tres sitios de revegetación con distintas edades, encontraron al igual que en el presente trabajo los valores mas bajos para número, volumen y densidad de macroporos en el pastizal. Alaoui y Goetz (2008) encontraron diferencia estadística significativa en el número y volumen de macroporos en la superficie del suelo y en el subsuelo entre dos sitios; uno de pradera y un otro de plantación de cebada en Suiza. Encontraron un mayor número de macroporos y de mayor volumen en la superficie del suelo (0.0–0.50 m) en la plantación de cebada mientras que en subsuelo (0.60–0.70 m) la pradera obtuvo un mayor número y volumen de macroporos. Luo (2009) encontró una diferencia estadística en el número de macroporos, superficie total de los macroporos, densidad de la red de macroporos, longitud de macroporos entre un sitio de pastura y un sitio agrícola en uso en Pensilvania. Contrario a lo que se obtuvo en el presente estudio, Luo encontró los valores mas altos para las variables que midió en el sitio de pastizal. Esto pudo deberse a que en suelos agrícolas el laboreo incrementa la homogeneidad del suelo mientras que en en pastizal las raíces y fauna asociada genera macroporos estables que no son destruidos por el laboreo. Shougrakpam et al. (2010) también encontraron una diferencia estadística en las características estructurales de los macroporos debida al cambio de uso de suelo entre diferentes sitios de cultivo, sitios de regeneración y laderas de bosque sin perturbar en la India. Encontraron el mayor número de macroporos y mayor longitud de macroporos en los sitios con mayor cobertura vegetal y una tendencia decreciente conforme disminuyó la cobertura.

Las diferencias antes mencionadas en las características cuantitativas y cualitativas de la red de macroporos entre los distintos usos de suelo en este trabajo están asociados de manera positiva con la vegetación y su red de raíces (Collof et al. 2010; Shougrakpam et al. 2010). Mientras mas vegetación exista en un sitio mayor va a ser la cantidad de raíces presentes en un sitio y mayor va a ser la cantidad de macroporos producidos por estas raíces, además al haber una mayor biomasa vegetal existirá una mayor cantidad de

alimentos y nichos disponibles para la fauna edáfica, la cual también aumentara con el incremento de la biomasa vegetal aumentando también el número de macroporos causados por la fauna edáfica. Otra causa de los cambios en la red de macroporos asociados al cambio de uso de suelo se debe a las técnicas de labranza que se pudieron usar en algún periodo en algunos de los sitios muestreados, autores previos (Alaoui y Goetz, 2008) reportan que éstas tienen una correlación negativa con el número, longitud, conectividad y tortuosidad de los macroporos. La compactación del suelo (Sharrow, 2007; Alaoui y Goetz, 2008; Bonell et al., 2010) es otro factor que también suele tener un impacto negativo sobre el número y la conectividad de los macroporos, esta compactación. En este trabajo esta relación se fue mas notoria en los sitios de pastizal. Otro aspecto que influyó en las diferencias de la macroporosidad entre los usos de suelo de los sitios estudiados es el efecto de la perturbación causada por un incendio ocurrido en la zona hace aproximadamente 20 años (Gómez-Cárdenas 2009). Varios autores (Debano, 1992; Sidle et al. 2006; Heinse et al. 2012) mencionan el impacto que tienen ciertos incendios en las características estructurales del suelo y la macroporosidad. Cuando los incendios son severos ocurre la combustión de las raíces, lo que genera la formación de canales preferenciales de gran tamaño (Heinse *com pers.*). Si los suelos son bien estructurados y cohesivos, los canales de raíz se mantienen por largos periodos de tiempo generando un efecto de memoria del suelo (Chautara et al. 2012; Heinse 2012; Bonell et al. 2010). En otros casos, cuando el suelo es poco cohesivo o con mucha erosión, puede ocurrir el relleno de muchos de estos macroporos a la erosión y el transporte vertical de material (Sidle et al. 2006). En nuestro caso consideramos que el efecto de memoria edáfica asociada a la compbustión de raíces por incendio es el factor que determina el que los sitios de BS presenten los valores mas altos de volumen, longitud y número de macroporos así como el mayor número de árboles, mayor volumen y longitud ocupado por los árboles y la mayor cantidad de árboles sin ramificacion.

Respecto a la segunda pregunta de investigación que trataba de responder si las diferencias en la macroporosidad del suelo entre distintos usos del suelo se ven reflejadas en la conductividad hidráulica de los sitios, se encontró que si existe una diferencia estadísticamente significativa para la conductividad hidráulica saturada entre los distintos

usos de suelo. Gran número de autores han encontrado diferencias en la conductividad hidráulica entre distintos usos de suelo. Sharrow (2007) encontró que una disminución del 40% en la porosidad total de un sitio de pastoreo en comparación con un sitio de bosque provocó una disminución del 38% en la capacidad de infiltración del suelo, mencionando que la principal causa de la disminución de la infiltración se debe al menor volumen de poros grandes en el sitio de pastoreo debido a la acción de compactación del ganado. Alaoui y Goetz (2008) también encontraron una diferencia en la K_{sat} entre un sitio de pradera y un sembradío de cebada en la parte superficial (0 -50cm) y en la parte subsuperficial (60-70cm) del suelo debida al aflojamiento del suelo y a la pérdida de conectividad y número de macroporos por acción de las técnicas de labranza en el sembradío de cebada. Zimmermann y Elsenbeer (2008) también encontraron diferencias en la K_{sat} , entre distintas secuencias de perturbación natural y humana, asociadas a el desplazamiento de los horizontes orgánicos por los deslizamientos de tierra, al efecto de compactación por el pastoreo de ganado y al estado de abandono en el que se encuentran los sitios. Gomez-Tagle et al. (2012) encontraron también diferencias en la conductividad hidráulica asociadas al uso de suelo en sitios de la misma área de estudio de el presente estudio. Collof et al. (2010) también encontraron diferencias en la infiltración entre sitios revegetados y sitios de pastizal encontrando una correlación positiva entre el número de macroporos, la edad de lo sitios revegetados y la infiltración. Tomando en cuenta todo lo anterior la diferencia encontrada en la K_{sat} en los sitios muestreados en el presente estudio se debe a las diferencias en el número, volumen y longitud de los macroporos, así como a un efecto de la compactación ocasionada por el ganado en los sitios de pastizal, la historia de uso y manejo de los sitios.

Los valores mas altos de conductividad hidráulica saturada se encontraron en los sitios de BS, seguido muy de lejos por los sitios de BM y por último los sitios de P, los promedios de los valores de BM y de P para la conductividad hidráulica saturada resultaron muy similares. Es importante mencionar que uno de los núcleos de pastizal no tuvo infiltración..

Sin embargo, a pesar de haber encontrado cambios estructurales y de complejidad en la red de macroporos entre los distintos uso de suelo, estos cambios no se relacionaron

directamente con la conductividad hidráulica saturada para el conjunto de datos global. Analizando por separado los usos de suelo, solamente para los sitios de P y analizando los poros con diámetro mayor de 0.5 mm si se encontraron correlaciones positivas significativas para las variables descriptoras del espacio poroso y la conductividad hidráulica saturada.

6.2 Tomografía de rayos X y reconstrucción del espacio poroso del suelo

Es necesario reconocer, que si bien la tomografía computacional de rayos X tiene muchas ventajas respecto a los métodos tradicionales para medir la porosidad en el suelo, este método aun presenta limitaciones. Estas se discuten a continuación.

Como se mencionó previamente, la adquisición y procesamiento de imágenes de tomografía digital de rayos X son una técnica novedosa y potente para el análisis de la porosidad del suelo. Sin embargo, esta técnica tiene sus limitantes. Primeramente, está la limitante de resolución. Si bien existen escáneres que pueden generar imágenes con resoluciones nominales micrométricas y estos han sido aplicados fuera de las ciencias médicas, principalmente exploración geológica y petrográfica (Tabla 1), el acceso a este tipo de tecnología es todavía restringido y difícil. La resolución de los escáneres médicos, como el utilizado en la realización de este trabajo se encuentra entre 0.3 mm y 0.5 mm, por lo que pueden ser incapaces de detectar ciertas formaciones muy pequeñas o dejar fuera todo el espacio poroso mesoscópico propio de la matriz del suelo (poros con diámetro por debajo de los 0.2 mm), el cual como menciona Eguchi y Hasegawa (2008) es muy importante para el flujo de agua matricial preferencial en el suelo. Otra limitación importante que presenta este método es que no permite una representación continua de la porosidad, para este trabajo la distancia usada entre cortes fue de 2.5 mm. Aun usando la distancia mínima de corte con este tipo de tomógrafo digital medico, existirá una distancia de 0.625 mm entre los cortes. Las reconstrucciones 3D se basan en la interpolación de información entre estos cortes, pero puede que, debido a la distancia entre cortes, estructuras importantes no sean registradas en las imágenes en su totalidad.

Otra limitación importante que tiene este método es el tamaño máximo de muestra con la que se puede trabajar. De acuerdo con Ryan y Mckenzie (1999) y Bouma (1981) las diferentes propiedades edáficas requieren distintos volúmenes de suelo representativos. Variables como el pH o el contenido de carbono requieren volúmenes relativamente pequeños (unos pocos cm^3), mientras que el espacio poroso del suelo, especialmente aquel asociado a la bioturbación de raíces en ambientes de bosques puede ser de varios metros cúbicos. Este aspecto es muy importante para evaluar la variabilidad espacial. Por lo tanto es importante conocer al menos en forma aproximada cual es el tamaño de muestra necesario para abarcar un volumen elemental representativo conforme a la propiedad que se desea analizar y que este volumen sea una muestra representativa de la zona que se está muestreando. Si bien existe un límite de tamaño físico de la muestra que pueda ser procesada por el escáner, los escáneres médicos pueden trabajar con muestras de hasta 1.70 metros de largo y con un diámetro de más de 50 cm. Sin embargo, extraer muestras de tales dimensiones en condiciones de campo y su posterior transporte, puede ser logísticamente imposible. El tamaño de las muestras empleadas en este trabajo no tiene precedente en la literatura especializada mundial y aún cuando no se acerca ni siquiera a la décima parte del volumen máximo posible de escanear con un equipo médico, su obtención, traslado y manejo implicó un enorme esfuerzo logístico, tanto por las dimensiones de las muestras, como por su peso.

Otra cuestión muy importante que presenta el análisis de tomografía digital de rayos X y la reconstrucción 3D es que las metodologías han sido adaptadas de las ciencias médicas y aún cuando existen importantes adelantos en diferentes disciplinas (geología del petróleo, paleontología, sedimentología), las técnicas se encuentran actualmente en desarrollo. Capowiez et al. (2011) menciona que debido a esto aún resulta imposible actualmente diferenciar entre poros de raíz y poros de fauna edáfica, debido a que ambos tipos de poro son espacios vacíos con valores de atenuación similares o idénticos, lo que hace imposible ver con qué tipo de poro se está tratando. Para realizar esta diferenciación, es indispensable emplear algoritmos de continuidad e índices morfológicos que permitan diferenciar empleando no solo los valores de atenuación de las imágenes, sino las estructuras tridimensionales que “describen” espacialmente dichos valores de atenuación. Actualmente

existe una línea de investigación muy avanzada especializada en la detección y reconstrucción de estructuras radiculares (Tracy *et al.* 2010, Pierret *et al.* 2007), sin embargo esta técnica solo se ha aplicado a sistemas radiculares de plantas cultivadas y bajo condiciones de experimentación.

6.3 Sistema de extracción de muestras

Otro aspecto interesante de este trabajo en comparación con otros estudios de la porosidad de suelo empleando tomografía computarizada de rayos X, es haber utilizado núcleos extraídos directamente y lo más inalteradamente posible de campo, en un ambiente tan complicado de trabajar como es el bosque mesófilo de montaña. Para ello se tuvo que desarrollar un método y sistema de extracción que fuera portátil y permitiera trabajar con cierta facilidad en las difíciles condiciones de campo. Sin embargo, el método de extracción de los núcleos también presentó limitantes.

Primero; el sistema de extracciones pesado y por lo tanto difícil de transportar a sin equipo de apoyo (animales de carga) dado las dimensiones y componentes del sistema de extracción. Segundo; requiere de mucho tiempo de su adecuada instalación. Tercero; requiere de por lo menos dos personas para su operación y adecuado funcionamiento.

Por otro lado, respecto al funcionamiento del sistema; el tubo de PVC necesario para la contención de la muestra es insertado a presión, lo que comprime el suelo. La presión de la orilla del tubo PVC desplaza y rompe las raíces y puede modificar sustancialmente la condición interna del suelo en el núcleo, favoreciendo la formación de canales preferenciales "espuriosos" artefactos del método. Asimismo, el esfuerzo cortante asociado a la presión, genera compactación de las diferentes capas del suelo y la diferencia de resistencia del suelo entre el exterior y el interior del tubo de PVC ocasiona la formación de artefactos de corte con una apariencia similar al que genera un cuchillo en una barra de mantequilla. Aunque durante el análisis y la reconstrucción 3D del espacio poroso se intentó minimizar estos artefactos restringiendo la zona de análisis a un corte alejado de las paredes del núcleo, estos artefactos pudieron estar presentes en los núcleos y generar conductividades hidráulicas elevadas.

6.4 Variables Físicoquímicas

Respecto a las variables físicoquímicas no se encontró ninguna diferencia estadística significativa entre los distintos usos de suelo, así como no se encontró ninguna relación significativa con las variables descriptoras del espacio macroporos, ni con las variables resultantes del análisis estructural o con los índices de complejidad, a excepción de una correlación negativa significativa entre el porcentaje de humedad de campo y la conductividad hidráulica saturada, la cual resulto sumamente extraña y pudo ser explicada en forma adecuada. Tampoco se encontró relación alguna entre las variables físicoquímicas y la conductividad hidráulica saturada, esta inexistencia de relación entre propiedades físicoquímicas "convencionales" del suelo con las características estructurales, de complejidad y flujo de agua en el suelo ha sido previamente reportada (Gómez-Tagle, 2008), sin embargo ninguno de los trabajos previos consideraron o incluyeron reconstrucciones 3D del espacio poroso del suelo.

6.5 Modelo conceptual

Partiendo de las variables descriptoras del espacio macroporoso, el análisis estructural, los índices de complejidad y las mediciones de la conductividad hidráulica saturada, más las reconstrucciones 3D de la red de macroporos creadas a partir de las imágenes 2D obtenidas del escaneo con el tomógrafo digital de rayos X, es posible establecer un modelo conceptual que relaciona la complejidad, estructura, conductividad hidráulica y cobertura vegetal (Figura 50).

La red de macroporos más extensa, es decir, con el mayor número de poros, mayor número de árboles, así como con la mayor cantidad de volumen y longitud ocupado tanto por los árboles como por los poros, se encontró en el bosque secundario BS. Sin embargo la red más compleja, es decir la que tuvo los árboles con el mayor nivel de ramificación y con el mejor acoplamiento, se encontró en el bosque maduro BM. La red de macroporos más corta y más simple, es decir la que tuvo los valores más bajos, tanto para las variables descriptoras, como para el análisis de estructura y los índices de acoplamiento, se encontró siempre en el pastizal P. Sin embargo, los parámetros de la red de porosidad de P, solo fueron diferentes estadísticamente con el BM para el volumen de poros/volumen de suelo y

con el BS para el volumen total ocupado por todos los árboles, así como para el volumen y longitud total de los árboles con poros con diámetro mayor de 0.5mm.

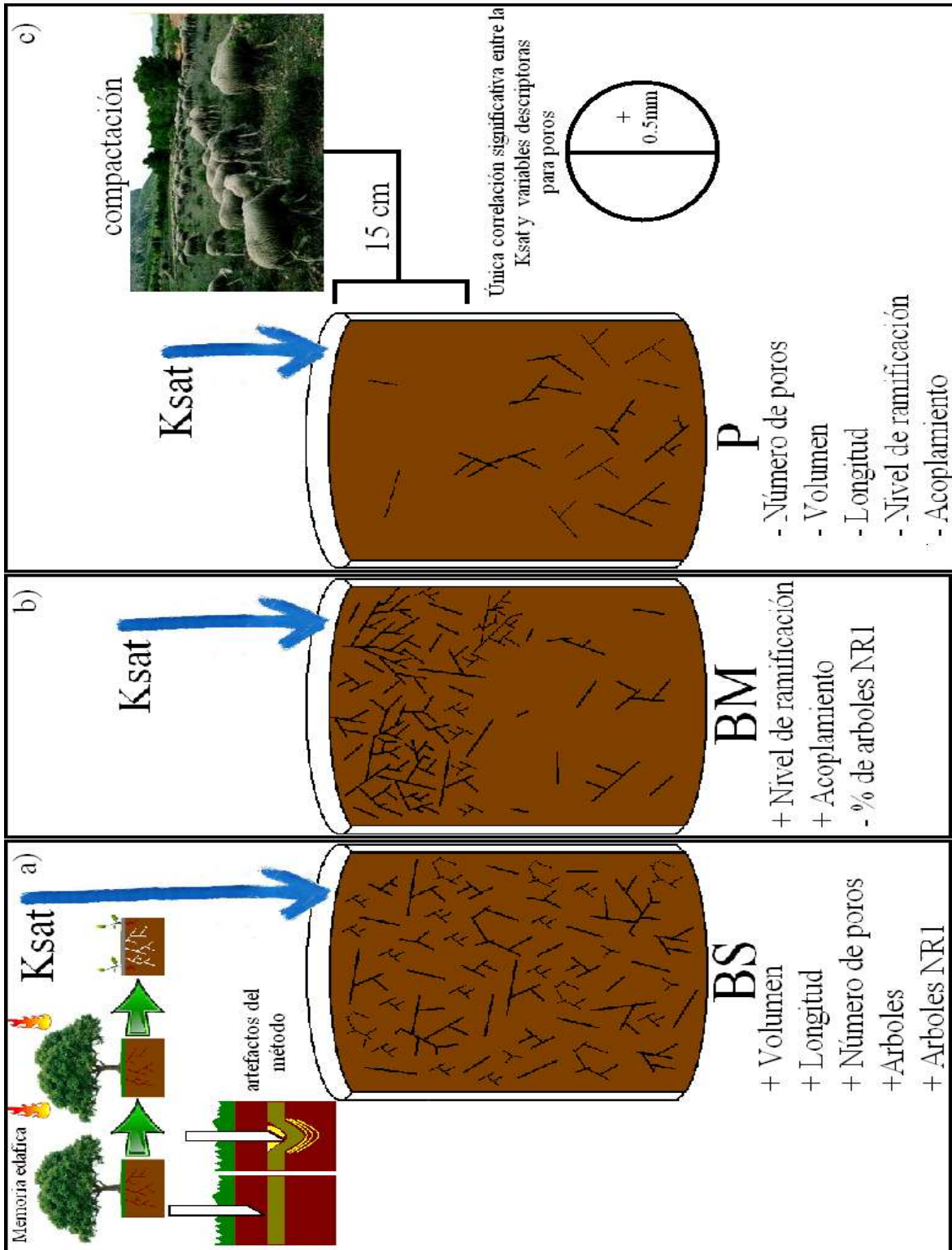


Figura 50.- Modelo conceptual generado a partir de los datos obtenidos en este trabajo, a) bosque secundario, b) bosque maduro, c) pastizal.

El que los sitios de BS obtuvieran los valores más altos para las variables descriptoras, se debe al efecto de la “memoria edáfica” del suelo, o sea su capacidad de mantener un registro o “recordar” a través de su historia de uso los procesos que van creando un impacto en él. Por ejemplo, en estos sitios de BS hubo un incendio que creó espacios vacíos producto de la combustión de las raíces, estos poros dejados por las raíces quemadas sumados a los nuevos poros producto del crecimiento de nuevas raíces del bosque secundario aumentan el número de poros presentes en estos sitios y por lo tanto el volumen y longitud que ocupan estos poros en el suelo (Figura 51).

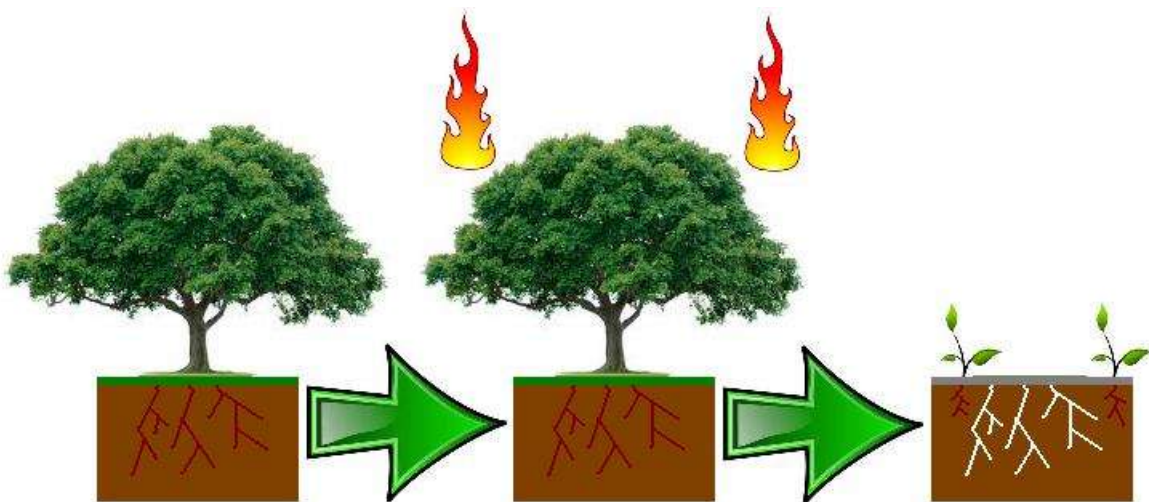


Figura 51.- Concepto de memoria edáfica del suelo.

La exploración visual de las reconstrucciones 3D de la red de macroporos evidenció diferencias entre los distintos usos de suelo. Las redes de macroporos de los sitios de BM fueron más complejas y entrelazadas pero solo hasta unos 20 cm de profundidad en el núcleo, a partir de estos 20 cm la complejidad disminuyó claramente. En los sitios de BM se aprecian grandes poros paralelos al eje longitudinal de la muestra en los primeros 10 cm del núcleo. Estas estructuras no se aprecian en los otros usos de suelo. La morfología de estas estructuras permitió identificarlas como raíces.

Por otro lado, los sitios de BS en mostraron redes de macroporos distribuidas de manera uniforme a lo largo de la muestra. En los núcleos de BS no se los cambios de complejidad conforme la profundidad no son tan claros como en otros usos. A diferencia de los otros

usos de suelo, en el BS se parecían grandes zonas donde los poros se encuentran en diferentes plano y que con la inspección visual no se alcanza a distinguir con claridad el arreglo de éstos. En el BS también se aprecia un mayor número de poros grande de raíz dispuestos de manera transversal a la muestra. Es importante resaltar que durante la inserción de los núcleos en campo. En los sitios de BS se pudo apreciar el sonido de raíces rompiéndose conforme se iba insertando el tubo de PVC en el suelo. Esta ruptura de raíces se relaciona directamente con los artefactos creados por el método de extracción, que como se mencionó anteriormente pueden modificar sustancialmente la condición interna del suelo en el núcleo. Por último en los sitios de pastizal lo mas notorio al inspeccionar las reconstrucciones 3D es que son menos complejas que los otros dos usos de suelo, además la complejidad y entrelazamiento de la red en los primeros 10 cm del núcleo es mucho menor de hecho en la mitad de estos sitios solo se observan unos cuantos poros, esto se debe a que en los sitios de P donde se muestreó existe una alta compactación en la parte superficial del suelo debida a la acción del ganado. Los sitios donde se muestreó son usados como potreros y áreas de pastoreo. Por otro lado, durante la inserción de los tubos de PVC se pudo apreciar que el suelo se encontraba mas compactado. Por ello la extracción de los núcleos requirió casi el doble de tiempo que en los otros usos del suelo. Todo lo descrito anteriormente concuerda con los datos obtenidos de la variables descriptoras por profundidad.

Para la conductividad hidráulica saturada se encontró, contrario a lo que esperado que los valores mas altos ocurrieron en BS. Es de resaltar el hecho de que estos valores fueron XX-YY órdenes de magnitud mayores que los registrados en BM y P.

Se encontró que el BS fue estadísticamente distinto del BM y del P, sin embargo el BM no resultó diferente al P. Además, se encontró diferencia estadística significativa entre estos usos de suelo para las variables descriptoras.

Los valores tan elevados de conductividad hidráulica saturada se explican por la formación de canales de flujo preferencial tras la combustión de las raíces. Heinse *et al.* (2012) mencionan que después de un incendio la combustión de las raíces genera vías de flujo

preferencial, también que estas vías pueden mejorarse y en algunos casos pueden crearse nuevas vías para el flujo de agua. Esto se traduce en valores de conductividad hidráulica saturada mas altos (Heinse *et al.*, 2012).

Con respecto al otro resultado contradictorio encontrado; Si el BM es (estadísticamente) distinto al P en cuanto las variables descriptoras del espacio macroporoso, Porqué esta diferencia no ocurre con los valores de la conductividad hidráulica saturada? Esta condición puede deberse a que el flujo de agua en andosoles no solo ocurre por las vías de flujo preferencial, sino que el flujo matricial también resulta muy importante y en algunos casos puede ser la principal vía de flujo de agua en este tipo de suelos como señalan Eguchi y Hasegawa (2008). En este sentido el flujo matricial por mesoporos que se da en los sitios de P puede compensar la falta de flujo por macroporos, aunque estos presenten redes de macroporos menos complejas y acopladas que las del BM. Otro aspecto importante que debe ser mencionado es que la funcionalidad de los macroporos como vías de flujo preferencial depende de que estos están en contacto con el flujo de agua en si (Jarvis 2007). Es decir si lo macroporos no se encuentran conectados a la superficie del suelo, donde llega el agua por precipitación, estos macroporos no funcionan como vías de flujo preferencial. En caso de que se encuentren aislados dentro de la matriz del suelo por sellamiento o taponamiento de la superficie, los macroporos pueden convertirse en barreras que impiden el flujo de agua.

7 CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados, se concluye que:

1.- Se encontraron diferencias cuantitativas y cualitativas estadísticamente significativas entre los distintos usos de suelo para el número de poros por unidad de volumen, volumen de espacio poroso (volumen de poros/volumen de suelo), longitud del espacio poroso (longitud de poros/volumen de suelo). Contrario a lo esperado, los sitios de BS tuvieron mas poros, con mayor volumen y longitud que el BM y P, los sitios de BM no mostraron diferencia significativa con los PA para longitud y número de poros, pero si para el volumen. Estructuralmente el BS y el P mostraron diferencias significativas para el volumen total de árboles y para el volumen y longitud total ocupados por árboles con poros de diámetro mayor de 0.5mm. Además el BS presentó el mayor número de árboles por núcleo, pero también presentó el mayor número de árboles sin ramificación. Sin embargo el BM presentó un espacio macroporoso mas complejo, es decir, que los árboles que componen la red de macroporos en este uso de suelo son mas ramificados y el acoplamiento que existe entre ellos es mayor que en el BS y P. Esto es respaldado por los resultados de porcentaje de volumen total de la muestra ocupado por árboles sin ramificación. El pastizal presentó los valores mas bajos para las variables descriptoras del espacio poroso y los índices de complejidad y estructura.

2.- Se encontraron diferencias significativas para la conductividad hidráulica saturada entre los diferentes usos de suelo, sin embargo no se encontraron correlaciones significativas entre las variables descriptoras del espacio macroporoso, las variables fisicoquímicas, índices de complejidad y la conductividad hidráulica saturada, a excepción de el número de poros por unidad de volumen, volumen de espacio poroso (volumen de poros/volumen de suelo), longitud del espacio poroso (longitud de poros/volumen de suelo) para los poros con diámetro mayor de 0.5mm. En el pastizal si existe un efecto de la macroporosidad en la conductividad hidráulica saturada. También existió una correlación negativa significativa para el % de humedad de campo la conductividad hidráulica para todos los sitios.

3.- Se generó un modelo conceptual a partir de los valores obtenidos para las variables descriptoras, los índices de complejidad, el análisis estructural y las mediciones de la

conductividad hidráulica con el fin de facilitar el entendimiento del efecto que tiene el cambio de uso de suelo en la estructura y complejidad del espacio macroporoso y su relación con el flujo de agua en el suelo.

8 REFERENCIAS

- Alaoui, A. y Helbling, A., 2006. Evaluation of soil compaction using hydro- dynamic water content variation: comparison between compacted and non compacted soil. *Geoderma*, 134: 97–108.
- Álvarez, A. E., Arámbula, E. y Spinel, S. C., 2008. Tomografía computarizada con rayos x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados. *Revista Ingeniería e Investigación*, 28 (2): 142-151.
- Anderson, S. H., Gantzer, C. I., Boone, J. M. y Tully, R. J., 1988. Rapid nondestructive bulk density and soil-water content determination by computed tomography. *Soil Science Society American Journal Soil*, 52: 35-40.
- Anderson, S. H., Peyton, R. L. y Gantzer, C. J., 1990. Evaluation of constructed and natural soil macropores using x-ray computed tomography. *Geoderma*, 46: 13-29.
- Anderson, S. H., Peyton, R. L., Wigger, J. W. y Gantzer, C. J., 1992. Influence of aggregate size on solute transport as measured using computed-tomography. *Geoderma*, 53(3-4): 387-398.
- Arnold, J. R., Testa, J. P. J., Friedman, P. J. y Kambic, G. X., 1982. Computed tomographic analysis of meteorite inclusions. *Science*, 219: 383-384.
- Aylmore, L. A. G., 1993. Use of computer assisted tomography in studying water movement around plant roots. *Advances in Agronomy*, 49: 1-54.
- Barbash, J. E. y Resek, E. A., 1996. Pesticides in groundwater: distribution, trends, and governing factors, Ann Arbor Press, Inc, Chelsea, Michigan. 588 pp.
- Bastardie, F., Capowicz, Y. y Cluzeau, D., 2005. 3D characterisation of earthworm burrow systems in natural. *Applied Soil Ecology*, 30: 34-46.
- Beven, K., y Germann, P., 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18: 1311–1325.
- Bosch, E., 2004. Sir Godfrey Newbold Hounsfield y la tomografía computada, su contribución a la medicina moderna. *Revista Chilena de Radiología*, 10: 183-185.
- Bouma, J. 1981. Comments on ‘micro-, meso- and macroporosity of soil’. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1244–1245.
- Bruijnzeel, L. A., 1990. Hydrology of Moist Tropical Forest and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review. UNESCO, Paris and Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands. 226 pp.
- Bruijnzeel, L. A., y Hamilton L. S. (2000). Decision Time for Cloud Forests, IHP Humid Tropics Programme Series No. 13. Paris: UNESCO Division of Water Sciences; Gland, Switzerland: WWF and IUCN. 41 pp.
- Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104: 185–228.
- Bruijnzeel, L. A. (2006). Hydrological Impacts of Converting Tropical Montane Cloud Forest to Pasture, with Initial Reference to Northern Costa Rica, Final Technical Report for Project R7991, DFID Forestry Research Programme. Amsterdam, the Netherlands: VU University Amsterdam. 52 pp.
- Buttle, J. M. y House, D. A., 1997. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin. *Journal of Hydrology*, 203: 127-142.

- Callaham Jr., M. A., Richter Jr., D. D., Coleman, D.C. y Hofmockel, M. 2006. Long-term land-use effects on soil invertebrate communities in Southern Piedmont soils, USA. *European Journal of Soil Biology*, 42: 150-156.
- Capowiez, Y., Pierret, A., Daniel, O. y Monestiez, P. A. (1998). 3D skeleton of natural earthworm burrow systems using CAT scan images of soil cores. *Biology and Fertility of Soil*, 27: 51-59.
- Capowiez, Y., Sammartino, S., Michel, E. 2011. Using X-ray tomography to quantify earthworm bioturbation non-destructively in repacked soil cores. *Geoderma*, 162: 124–131.
- Cherkauer, K. A., Lettenmaier, D. P. y Olsen, J. R. (2000), A Century of Change: The Hydrologic Impacts of Vegetation Change on the Upper Mississippi River, UW- UBC Conference, Seattle, WA, September 29.
- Clothier, B. E., Green, S. R. y Deurer, M. 2008. Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. *European Journal of Soil Science*, 59: 2-13.
- Collof, M. J., Pullen, K. R., y Cunningham S. A. 2010. Restoration of an Ecosystem Function to Revegetation Communities: The Role of Invertebrate Macropores in Enhancing Soil Water Infiltration. *Restoration ecology*, 18: 65–72.
- Crestana, S., Mascarenhas S., Pozzi-Mucelli R. S. 1985. Static and dynamic three dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal*, 140: 326-332.
- Croke, J., Hairsine, P. y Fogarty, P., 2001. Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion and delivery rates with time. *Forest Ecology and Management*. 143, 3–12.
- D’Almeida, C., Vörösmarty, C.J., Marengo, J.A., Hurtt, G.C., Dingman, L. y Keim, B. 2006. A water balance model to study the hydrological response to different scenarios of deforestation in Amazonia. *Journal of Hydrology* 331: 125-136.
- Denison, C. y Carlson, W. D., 1997. Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography application to natural samples. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 45-57.
- Elkins, N. Z., Sabol, G. V., Ward, T. J. y Whitford, W. G. 1986. The influence of subterranean termites on the hydrological characteristics of a Chihuahuan desert ecosystem. *Oecologia* 68: 521–528.
- Eguchi, S. y Hasegawa, S., 2008. Determination and Characterization of Preferential Water Flow in Unsaturated Subsoil of Andisol. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 320-330.
- Faeh, A. O., Scherrer, S. y Naef, F., 1997. A combined field and numerical approach to investigate flow processes in natural macroporous soils under extreme precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, 787–800.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma. 117 pp.
- Feyen, J., Jacques, D., Timmerman, A. y Vanderborght, J. 1998. Modelling Water Flow and Solute Transport in Heterogeneous Soils: A Review of Recent Approaches. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70: 231-256.
- Flühler, H., Durner, W. y Flury, M. 1996. Lateral solute mixing processes: A key for understanding field-scale transport of water and solutes. *Geoderma*, 70: 165–183.
- Fohrer, N., Berkenhagen, J., Hecker, J.M. y Rudolph, A. 1999. Changing soil and surface conditions during rainfall. Single rainstorm/sub-sequent rainstorms. *Catena*, 37: 355-375.

Gantzer, C. J. y Anderson, S. H. 2002. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel- disk and no-tillage seedbeds. *Soil Tillage Research*, 64: 101-111.

García Coll, I., Martínez Otero, A., Ramírez Soto, A., Niño Cruz, A., Juan Rivas, A y Domínguez Barrada, L. 2004. La Relación Agua-Bosque: Delimitación de zonas prioritarias para el pago de servicios hidrológicos en la Cuenca del río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. En *El Manejo Integral de Cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Cotler, H. (compiladora). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. 264 pp.

García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación de Köppen (para adaptarlo a la República Mexicana). cuarta edición. Enriqueta García de Miranda. Offset Larios. México, D.F. 252 pp.

Geissert, D., Dubrecq, D., Campos, A., y Meza, E. 1994. Carta de paisajes geomorfoedafológicos de la región volcánica Cofre de Perote, Estado de Veracruz, México, Escala 1:75,000 (México: Instituto de Ecología, A.C. ORSTOM-CONACYT).

Geris, J. R. M. C. (2007), Changes in soil physical characteristics, infiltration and hillslope hydrological response associated with forest conversion to pasture in Central Veracruz, Mexico. M.S. thesis, VU Univ., Amsterdam, Netherlands.

Giambelluca, T. W. 2002. Hydrology of altered tropical forest. *Hydrological Processes*, 16: 1665–1669.

Gómez-Tagle, Ch. A., Gómez-Tagle, R. A. F., Battle-Sales, J., Zepeda Castro, H., Guevara Santamaría, M. A., Maldonado, L. S. y Pintor, A. J. E. 2008. Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. *Terra Latinoamericana*, 26: 287-297.

Gómez-Tagle, Ch. A. 2008 Variabilidad de las Propiedades Edáficas Relacionadas con la Infiltración y Conductividad Hidráulica Superficial en la Cuenca de Cuitzeo. INIRENA, Tesis Doctoral de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 164 pp.

Gómez-Tagle, A., Geissert, D., Pérez-Maqueo, O. M., Marín-Castro, B. E. y Rendón-López, B. M. 2011. Saturated hydraulic conductivity and land use change, new insights to the payments for ecosystem services programs: watershed in Eastern central México. In: *Developments in hydraulic conductivity research*. Edited by Oagile Dikinya, Ed. Intech, 270 pp.

Goteti, G. y Lettenmaier, D. P. 2001. Effects of streamflow regulation and land cover change on the hydrology of the Mekong river basin, Master thesis. Department of civil and environmental Engineering. University of Washington.

Grevers, M. C. J., De Jong, E. y St. Arnaud, R. J. 1989. The characterization of soil macroporosity with CT scanning. *Canadian Journal of Soil Science*, 69: 629–637.

Hainsworth, J. M. y Aylmore, L. A. G., 1983. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Australian Journal of Soil Research*, 21: 435-443.

Haubitz, B., Prokop, M., Dohring, W., Ostrom, J. H. y Wellnhofer, P., 1988. Computed tomography of Archeopterix. *Paleobiology*, 14: 206-213.

Haws, N. W. y Rao, P. S. C. 2004. The effect of vertically decreasing mac-ropore fractions on simulations of non-equilibrium solute transport. *Vadose Zone Journal*, 3: 1300–1308.

Heeraman, D. A., Hopmans, J. W. y Clausnitzer, V. 1997. Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-ray computed tomography. *Plant and Soil*, 189: 167-179.

Holwerda, F., Bruijnzeel L. A., Muñoz-Villers L. E., Equihua M. y Asbjornsen H. 2010. Rainfall and cloud

water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 384: 84–96.

Hounsfield, G. N. 1972. A method of and apparatus for examination of a body by radiation such as X- or gamma-radiation. British Patent No 1.283.915, London.

Hounsfield, G. N. 1973. Computerized transverse axial scanning (tomography). Part 1: Description of system. *British Journal of Radiology*, 46: 1016-1022.

Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14: 446–460.

Jarvis, N. J. 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58: 523–546.

Jégou, D., Cluzeau, D., Wolf, H.J., Gandon, Y. y Trehen, P. 1998. Assessment of the burrow system of *Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea giardi* and *Aporrectodea caliginosa* using X-ray computed tomography. *Biology and Fertility of Soils*, 26: 116–121.

Joschko, M., Graff, O., Muller, P. C., Kotzke, K., Lindner, P., Pretschner, D. P. y Larink, O. 1991 A non-destructive method for the morphological assessment of earthworm burrow system in three dimensions by X-ray computed tomography. *Biology and Fertility of Soils*, 11: 88–92.

Joschko, M. Muller, P. C., Kotzke, K., Dohring, W. y Larink O. 1993. Earthworm burrow system development assessed by means of Xray computed tomography. *Geoderma*, 56: 209–221.

Juo, S. R., Anthony, y Franzluebbbers K. 2003. Tropical Soils Properties and Management for Sustainable Agriculture. 1ra. ed. Oxford University Press, Inc., New York. 275 pp.

Karacan, C. O. y Okandan, E. 2001. Adsorption and gas transport in coal microstructure: investigation and evaluation by quantitative X-ray CT imaging. *Fuel*, 80: 509-520.

Karlsen, R. 2010. Stormflow processes in a mature tropical montane cloud forest catchment, Coatepec, Veracruz, Mexico. M.S. thesis, VU Univ., Amsterdam, Netherlands.

Kasteel, R., Vogel, H. J. y Roth, K. 2000. From local hydraulic properties to effective transport in soil. *European Journal of Soil Science*, 51: 81-91.

Kenter, J. A. M. 1989. Applications of computerized tomography in sedimentology. *Marine Geotechnology*, 8: 201-211.

Lawes, J. B., Gilbert, J. H. y Warington, R. 1882. On the Amount and Composition of the Rain and Drainage Waters Collected at Rothamsted. William Clowes & Sons, London. 167 pp.

Lee, K. E., and Foster, R. C. 1991. Soil fauna and soil structure. *Australian Journal of Soil Research* 29: 745–775.

Li, K. Y., Coe, M. T., Ramankutty, N., y De Jong, R., 2007. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology* 337: 258-268.

Ligthart, T. N., Peek G. J. W. C. y Taber E. J. 1993. A method for the three-dimensional mapping of earthworm burrow systems. *Geoderma* 57: 129–141.

- Lin, H. S., McInnes, K. J., Wilding, L. P., Hallmark, C. T. 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions in a well-structured subsoil. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 39: 131–133.
- Lin, H. S., Bouma J., Wilding L., Richardson J., Kutilek M. y Nielsen D. 2005. Advances in hydrogeology. *Advances in Agronomy*, 85: 1-89.
- Lobry de Bruyn, L. A., y Conacher A. J. 1994. The effect of ant biopores on water infiltration in soils in undisturbed bushland and in farmland in a semi-arid environment. *Pedobiologia*, 38: 193–207.
- Luo, L. F., Lin H. S. y Halleck P. 2008. Quantifying Soil Structure and Preferential Flow in Intact Soil Using X-ray Computed Tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 1058-1069.
- McDonald, I., Kaufmann, P. y Dullien F. 1986. Quantitative image analysis of finite porous media. I. Development of genus and pore map software. *Journal of Microscopy*, 144: 277–296.
- Metcalfe, S. E. 1987. Historical data and climatic change in Mexico a review. *Geogr. J.* 153: 211–222.
- Meza, E. y Geissert, D., 2007. El comportamiento hidrodinámico de Andosoles con uso diferencial en el municipio de Coatepec, Estado de Veracruz, México. En Reporte técnico Final del proyecto No. INE/A1-064/2007. Instituto de Ecología, A.C. – Vrije Universiteit Amsterdam – Instituto Nacional de Ecología. Xalapa, Veracruz, México.
- Mooney, S. J. 2002. Three-dimensional visualization and quantification of soil macroporosity and water flow patterns using computed tomography. *Soil Use and Management*, 18: 142—151.
- Mooney, S. J. y Morris, C. 2008. Morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray computed tomography. *CATENA* 73: 204-211.
- Mori, Y., Iwama, K., Maruyama, T. y Mitsuno, T. 1999. Discriminating the influence of soil texture and management-induced changes in macropore flow using soft X rays. *Soil Science*, 16: 467-482.
- Muñoz-Villers, L. E. (2008), Efecto del cambio en el uso de suelo sobre la dinámica hidrológica y calidad de agua en el trópico húmedo del centro de Veracruz, México. Ph.D. tesis, Univ. Autónoma Metropolitana, México D. F.
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Gómez-Cárdenas, M., Equihua, M., Asbjornsen, H., Bruijnzeel, L. A., Marín-Castro, B. E., y Tobón, C. (2012), Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 462-463: 53–66.
- Negrete-Yankelevich, S., Fragoso, C., Newton, A. C., Russell, G. y Heal, A. W. 2008. Species-specific characteristics of trees can determine the litter macroinvertebrate community and decomposition process below their canopies. *Plant and Soil*, 307: 83-97.
- Perkins, D. B., Haws, N. W., Jawitz, J. W., Das, B. S., y Rao, P. S. C. 2007. Soil hydraulic properties as ecological indicators in forested watersheds impacted by mechanized military training. *Ecological Indicators*, 7: 589-597.
- Perret, J., Prasher, S. O., Kantzas, A. y Langford, C. 1999. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 1530-1543.
- Perret, J., Prasher, S. O., Kantzas, A. y Langford, C. 2000. A two-domain approach using CAT scanning to model solute transport in soil. *Journal of Environmental Quality*, 29(3): 995-1010.
- Peters, E. J., Gharbi, R. y Afzal, N. 1996. A look at dispersion in porous media through computed tomography imaging. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 15: 23-31.

- Peth, S., Horn, R., Beckmann, F., Donath, T., Fischer J. y Smucker A. J. M. 2008. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 897-907.
- Petrovic, A. M., Siebert, I. E. y Rieke, P. E., 1982. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal*, 46: 445-450.
- Peyton, R. L., Haeffner, B. A., Anderson, S. H. y Gantzer, C. J. 1992. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores. *Geoderma*, 53: 329-340.
- Pierret, A., Capowiez, Y., Belzunces, L. y Moran, C. J. 2002. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. *Geoderma*, 106: 247-271.
- Pierret, A., Doussan, C., Capowiez, Y., Bastardie, F. y Pagès, L. 2007. Root functional architecture: a framework for modeling the interplay between roots and soil. *Vadose Zone Journal*, 6: 269-281.
- Pitkanen, J. y Nuutinen, V. 1998. Earthworm contribution to infiltration and surface runoff after 15 years of different soil management. *Applied Soil Ecology*, 9: 411-415.
- Porta, J., M. López-Acevedo, y C. Roquero. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente, 2nda edición. Mundi-Prensa, Bilbao, España. 807 pp.
- Ramírez, J. C., árbolea C. y McCollough C. H.. 2008. Tomografía computarizada por rayos X: fundamentos y actualidad. *Revista Ingeniería Biomédica*, 2(4): 13-31.
- Raty, M. y Huhta V. 2004. Earthworm communities in birch stands with different origin in central Finland. *Pedobiología*, 48: 283-291.
- Raynaud, S., Fabre, D., Mazerolle, F., Geraud, Y. y Latiere, H. J., 1989. Analysis of the internal structure of rocks and characterisation of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodensitometry. *Tectonophysics*, 159: 149-159.
- Rogers, S. W. 1999. Allosaurus, crocodiles, and birds: evolutionary clues from spiral computed tomography of an endocast. *Anatomical Record*, 257: 162-173.
- Rowe, T., Ketcham, R. A., Denison, C., Colbert, M., Xu, X. y Currie, P.J., 2001. Forensic palaeontology: The Archaeoraptor forgery. *Nature*, 410: 539-540.
- McKenzie, J. N. y Ryan P. J. 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89: 67-94.
- Savenije, H. 1996. The runoff coefficient as the key to moisture recycling. *Journal of Hydrology*, 176: 219-225.
- Sidle, R. S., Ziegler, A. D., Negishi, J. N., Abdul Rahim, N. y Siew, R. 2006. Erosion processes in steep terrain – truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, 224, 199-225.
- Simunek, J., Jarvis, N. J., van Genuchten, M. T. y Gardenas, A. 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 272 (1-4): 14-35.
- Sobieraj, J. A. 2003. Spatial patterns of saturated hydraulic conductivity and its controlling factors for forested soils. Doctor of Philosophy, Environmental Science. University of Cincinnati.

- Spiess, R., Peruzzo, L., Prior, D. J. y Wheeler, J. 2001. Development of garnet porphyroblasts by multiple nucleation, coalescence and boundary misorientation-driven rotations. *Journal of Metamorphic Geology*, 19: 269-290.
- Taylor, L. A., Keller, R. A., Snyder, G. A., Wang, W. Y., Carlson, W. D., Hauri, E. H., Mccandless, T., Kim, K. R., Sobolev, N. V. y Bez-Borodov, S. M. 2000. Diamonds and their mineral inclusions, and what they tell us: A detailed 'pullapart' of a diamondiferous eclogite. *International Geology Review*, 42: 959-983.
- Tivey, M. K. 1998. Documenting textures and mineral abundances in minicores from the TAG active hydrothermal mound using X-ray computed tomography. En: Herzig, P. M., Humphris, S. E., Miller, D. J. y Zierenberg, R. A. (eds) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 158: 201-210.
- Tracy, S. R., Roberts, J. A., Black, C. R., McNeill, A., Davidson, R. y Mooney, S. J. 2010. The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. *Journal of Experimental Botany*, 61: 311-313.
- Tobón, C. L., Bruijnzal, A., Frumau, A., y Calvo, J. C. 2004. Changes in soil physical properties after conversion of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. En Second International Symposium Mountains in the Mist. Waimea, Hawaii, July 27-August 2, 2004.
- Udawatta, R. R., Anderson S. H. y Gantzer C. J.. 2008. Influence of prairie restoration on CT-measured soil pore characteristics. *Journal of Environmental Quality*, 37: 219-228.
- Van der Molen, M. K. 2002. Meteorological impacts of land use change in the maritime tropics. Ph.D. thesis, VU University Amsterdam, Amsterdam, the Netherlands.
- Van Geet, M., Swennen, R. y Wevers, M. 2000. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocuss X-ray computerised tomography. *Sedimentary Geology*, 132: 25-36.
- Vinegar, H. J. y Wellington, S. L. 1986. Tomographic imaging of three-phase flow experiments. *Review of Scientific Instruments*, 58: 96-107.
- Vinegar, H. J. 1986. X-ray CT and NMR imaging of rocks. *Journal of Petroleum Technology*, 38: 257-259.
- Warner G. S., Nieber J. L., Moore I. D. y Geise R. A. 1989. Characterizing macropores in soil by computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 53: 653-660.
- Wilkinson, M. T., Richards, P. J. y Humphreys, G. S. 2009. Breacking ground: pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation. *Earth-Science Reviews*, 97: 257-272.
- Wit, A. M. W. 2001. Runoff controlling factors in various sized catchments in a semi-arid Mediterranean environment in Spain, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht, The Netherlands.
- World Reference Base for Soil Resources 2006. IUSS Working Group WRB. 2007. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Yang, S. L., Zhao Q. Y. y Belkin, I. M. 2002. Temporal avriation in the sediment load of the Yangtze River and the influence of human activities. *Journal of Hydrology* 263: 56-71.
- Yin, H. F. y Li, C. 2001. Human impac on flood and flood disasters on the Yangtze River. *Geomorphology* 41: 105-109.
- Zhou, X., Lin H. S. y White E. A. 2008. Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. *Catena* 73: 180-188.

Ziegler, A. D. y Giambelluca, T. W. 1997. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. *Journal of Hydrology*, 196: 204–229.

Zimmermann, B., Elsenbeer, H. y De Moraes, J. M. 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management* 222: 29–38.

Zimmermann B. y Elsenbeer H. 2008. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance. *Journal of Hydrology*, 361: 78–95.