



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERÍSTICAS HIDRÓFISICAS DE
ANDOSILES Y ACRIsoles Y SU
FUNCIONAMIENTO EN DOS
CUENCAS DEL ESTADO
DE MICHOACÁN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

DARÍO VICENTE SÁNCHEZ MORALES

TUTORA: DRA. LOURDES FLORES DELGADILLO

MÉXICO, D. F.

NOVIEMBRE, 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la máxima casa de estudios del país, la Universidad Nacional Autónoma de México, así como al Instituto de Geología, por brindarme la oportunidad y el apoyo para la realización de este trabajo de tesis.

De igual manera mi más sincero agradecimiento por todo el apoyo otorgado a la **Dra. Lourdes Flores Delgadillo** por la dirección y asesoría del presente trabajo, así como por su buena disposición. A mis sinodales, **Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Dr. Christian Prat, Dr. Oscar Escolero Fuentes, Dr. Yuri Nikolsky**, por sus valiosos comentarios, aportaciones y sugerencias en la mejora del presente documento. Así como mi agradecimiento por incorporarme al proyecto PAPIIT INII0107 “Paleosuelos rojos en la base de las secuencias pedo-sedimentarias del Cuaternario en México”, por financiar el presente estudio.

Este trabajo no podría haberse logrado sin la ayuda del **Dr. Sergey Sedov**, quien colaboró en el proyecto, en sus diferentes fases, desde el trabajo de campo hasta la discusión de resultados. Al **Biol. Jorge René Alcalá Martínez** responsable del Laboratorio de Física Ambiental, a **la Dra. Ernestina Gómez Vallejo (EPD)**, al **Dr. Jorge Enrique Gama Castro** y al **Sr. Eligio Jiménez** por sus consejos y sugerencias. Y a quienes de alguna u otra manera dieron su apoyo para concluir parte del trabajo.

A mis padres, que durante toda mi vida he recibido su gran amor y enorme apoyo, gracias a ustedes he sido capaz de llegar a este momento que tanto han esperado. En todo momento los llevo conmigo.

A toda mi familia, por estar a mi lado en todo momento.

A mis amigos del Posgrado por su compañerismo y ánimos en todo momento para culminar el presente trabajo.

ÍNDICE

	PÁGINA
RESUMEN	1
Capítulo I	
INTRODUCCIÓN	3
Capítulo II	
JUSTIFICACIÓN	5
Capítulo III	
OBJETIVOS	8
Capítulo IV	
HIPOTESIS	8
Capítulo V	
ANTECEDENTES	9
Capítulo VI	
MARCO TEÓRICO	16
6.1 Propiedades físicas del suelo	16
Capítulo VII	
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	29
7.1 Localización geográfica	29
7.2 Geología	30
7.3 Edafología	31
7.4 Clima	33

7.5 Hidrología	35
7.6 Vegetación y uso de suelo	36

Capítulo VIII

METODOLOGIA	38
8.1 Muestreo	38
8.2 Descripción de los análisis físicos	40
8.2.1 Textura y distribución del tamaño de partículas	41
8.2.2 Densidad aparente, densidad real y porosidad	41
8.2.3 Curvas de retención de humedad	42
8.2.4 Conductividad hidráulica	42
8.2.5 Resistencia mecánica	42
8.2.6 Estabilidad de agregados	43
8.3 Contenido de material orgánico	43
8.4 Micro-morfología	43
8.5 Mineralogía de la fracción arcilla	43
8.6 Análisis estadístico	44

Capítulo IX

RESULTADOS	45
9.1 Descripción de los perfiles	45
9.2 Micro-morfología	46
9.3 Mineralogía de la fracción arcilla	48
9.4 Textura y distribución del tamaño de partículas	50
9.5 Densidad aparente, densidad real y porosidad	52
9.6 Curvas de retención de humedad	54
9.7 Conductividad hidráulica	56
9.8 Resistencia mecánica	59
9.9 Estabilidad de agregados	60
9.10 Contenido de material orgánico	62
9.11 Análisis estadístico de los resultados	65

Capítulo X

DESCRIPCION DE UNIDADES EDAFOLOGICAS	69
10.1 Perfiles de suelo	69
10.2 Comparación y funcionamiento de las unidades edafológicas dentro de las cuencas	70
10.3 Relación del uso de suelo con sus propiedades físicas	74

Capítulo XI

CONCLUSIONES	77
BIBLIOGRAFIA	81
ANEXOS	88

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1	Usos del suelo de la cuenca Huertitas.	40
Tabla 2	Usos del suelo de la cuenca de Río Grande.	40
Tabla 3	Perfil La Cortina. Cuenca de Río Grande.	45
Tabla 4	Perfil La Ciénega. Cuenca Huertitas.	46
Tabla 5	Características funcionales del sistema poroso en relación al tamaño y estado de energía del agua.	48
Tabla 6	Horizontes del Perfil La Cortina, cuenca de Río Grande.	48
Tabla 7	Horizontes del Perfil La Ciénega, cuenca Huertitas.	49
Tabla 8	Propiedades de arcillas minerales (valores aproximados).	50
Tabla 9	Propiedades de carga y área superficial específica de arcillas minerales.	50
Tabla 10	Textura. Cuenca Huertitas.	50
Tabla 11	Textura. Cuenca Río Grande.	50
Tabla 12	Densidad aparente, real y porosidad. Cuenca Huertitas.	52
Tabla 13	Densidad aparente, real y porosidad. Cuenca Río Grande.	53
Tabla 14	Tensión del agua. Cuenca Huertitas.	54
Tabla 15	Tensión del agua. Cuenca Río Grande.	55
Tabla 16	Porosidad de aireación.	55
Tabla 17	Diferencias en la capacidad de agua disponible entre los dos suelos.	57
Tabla 18	Conductividad hidráulica. Cuenca Huertitas.	57
Tabla 19	Conductividad hidráulica. Cuenca Río Grande.	58
Tabla 20	Material orgánico. Cuenca Huertitas.	62
Tabla 21	Material orgánico. Cuenca Río Grande.	63
Tabla 22	Matriz de correlación de las propiedades físicas. Cuenca Huertitas.	66
Tabla 23	Matriz de correlación de las propiedades físicas. Cuenca Río grande.	68
Tabla 24	Relación entre densidad aparente con resistencia mecánica en el Perfil La Cortina.	69
Tabla 25	Lámina de agua. Perfil La Cortina, cuenca Río Grande.	69
Tabla 26	Lámina de agua. Perfil La Ciénega, cuenca Huertitas.	69

ÍNDICE DE GRÁFICAS

		PÁGINA
Gráfica 1	Curvas de distribución por tamaños de partículas.	52
Gráfica 2	Disminución de la porosidad con aumento de la densidad aparente. Cuenca Huertitas.	54
Gráfica 3	Disminución de la porosidad con aumento de la densidad aparente. Cuenca Río Grande.	54
Gráfica 4	Curva de retención de humedad. Cuenca Huertitas.	56
Gráfica 5	Curva de retención de humedad. Cuenca Río Grande.	56
Gráfica 6	Variación de la conductividad hidráulica con el aumento de la densidad aparente. Cuenca Huertitas.	58
Gráfica 7	Variación de la conductividad hidráulica con el aumento de la densidad aparente. Cuenca Río Grande.	58
Gráfica 8	Resistencia mecánica. Cuenca Río Grande. Sitios 9, 14, 15, 16 y 17.	60
Gráfica 9	Resistencia mecánica. Cuenca Río Grande. Sitios 10, 11, 12, 13 y 18.	60
Gráfica 10	Estabilidad de microagregados. Cuenca Huertitas.	60
Gráfica 11	Estabilidad de microagregados. Cuenca Río Grande.	60
Gráfica 12	Comparación del porcentaje de agregados entre cuencas.	61
Gráfica 13	Comparación entre el porcentaje de arcilla y materia orgánica. Cuenca Huertitas.	64
Gráfica 14	Comparación entre el porcentaje de arcilla y materia orgánica. Cuenca Río Grande.	64
Gráfica 15	Aumento de la capacidad de campo a mayor contenido de materia orgánica. Cuenca Huertitas.	64
Gráfica 16	Aumento de la capacidad de campo a mayor contenido de materia orgánica. Cuenca Río Grande-	64
Gráfica 17	Relación del punto de marchitez permanente a mayor contenido de materia orgánica. Cuenca Huertitas.	65
Gráfica 18	Relación del punto de marchitez permanente a mayor contenido de materia orgánica. Cuenca Río Grande.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1	Capacidad de agua disponible típica de suelos de diferentes texturas.	14
Figura 2	Formas de agregación del suelo.	17
Figura 3	Fuerzas cohesivas que actúan en una molécula dentro de un líquido y su superficie.	20
Figura 4	Efecto de la textura en la retención de agua.	23
Figura 5	Efecto de la estructura del suelo en la retención de agua del suelo.	24
Figura 6	Zonas saturada y no saturada.	24
Figura 7	Dependencia de la conductividad en succión en diferentes suelos (escala log – log).	25
Figura 8	Localización del área de estudio.	29
Figura 9	Distribución de los suelos en la zona de estudio, Cuenca Huertitas.	33
Figura 10	Distribución de los suelos en la zona de estudio, Cuenca de río Grande.	33
Figura 11	Uso del suelo. Cuenca Huertitas.	37
Figura 12	Uso del suelo. Cuenca Río Grande.	37
Figura 13	Localización de los sitios de muestreo. Cuenca Huertitas.	39
Figura 14	Localización de los sitios de muestreo. Cuenca Río Grande.	39
Figura 15	Relación del uso de suelo con propiedades físicas. Cuenca Huertitas.	75
Figura 16	Relación del uso de suelo con propiedades físicas. Cuenca Río Grande.	76

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

		PÁGINA
Fotografía 1	Perspectiva general de las cuencas estudiadas.	30
Fotografía 2	Fracturas en los horizontes superiores del Acrisol. Horizonte Ap.	47
Fotografía 3	Matriz arcillosa en el Acrisol. Horizonte A.	47
Fotografía 4	Cutanes de arcilla en el Acrisol. Horizonte Bt1.	47
Fotografía 5	Cutanes de arcilla en el Acrisol. Horizonte Bt1.	47
Fotografía 6	Estructura granular en el Andosol. Horizonte Ap.	48
Fotografía 7	Estructura granular en el Andosol. Horizonte A.	48

RESUMEN

Para comprender los procesos que ocurren en una cuenca se requiere del estudio de las interrelaciones que se dan en todos los elementos de un paisaje, así la cuenca se vuelve un sistema que está formada por un conjunto de elementos que se interrelacionan. Los más importantes son: el agua, el clima, la vegetación, la topografía, el suelo y los estratos geológicos. Por esta razón, la cuenca como sistema natural reúne todas las condiciones para utilizarla como unidad planificadora en el establecimiento de programas integrados que permitan la solución de problemas de mucha complejidad.

La presente investigación aborda dos elementos cruciales en el funcionamiento de una cuenca, el grado de desarrollo de dos unidades de suelos diferentes y su capacidad de retención de agua de acuerdo a sus propiedades físicas. Es importante tener un conocimiento de cómo las propiedades físicas de distintos suelos responden de manera diferente a procesos de infiltración, retención y escorrentía de agua. De acuerdo al uso de suelo en cada cuenca y a su grado de desarrollo, las propiedades de cada uno responderán de manera diferente en su interacción con el agua. El área de estudio se localiza en el Estado de Michoacán, a 11 km al sur de la ciudad de Morelia, donde se delimitaron dos micro-cuencas, la primera con un área de 2.91 Km², se ubica en la falda exterior de la caldera Atécuaro llamada cuenca Huertitas cuya unidad de suelo es Acrisol y la segunda cuenca de Río Grande con un área de 17.55 Km² que tiene un suelo de tipo Andosol.

Los objetivos de este trabajo son determinar las principales propiedades físicas en ambas unidades de suelos, las cuales influyen en la formación del régimen hidrológico y biológico (productivo) de las cuencas hidrográficas y hacer una comparación entre ellas de acuerdo al grado de desarrollo de cada unidad de suelo.

Se encontraron diferencias notables en las propiedades para cada unidad de suelo. El Acrisol de la cuenca Huertitas presenta una textura arcillosa en contraste con el Andosol de una textura franca; los contenidos de materia orgánica presentan diferencias notables de más de 100 % entre cada unidad de suelo; las densidades aparentes en los Andosoles están por debajo de 0.9 g*cm⁻³ mientras que en los Acrisoles alrededor de 1.25 g*cm⁻³; los valores de densidad real son similares entre 2.67 y 2.7 g*cm⁻³; las porosidades presentan porcentajes bastante diferentes de 52 % en Acrisoles y 69 % en Andosoles; la cantidad de agua aprovechable por las plantas es mayor en los Andosoles, reflejo de una mayor porosidad relacionada a su micro-agregación; la conductividad hidráulica es baja en la cuenca Huertitas en parte debido a su textura más fina con valores menores a 1 cm*h⁻¹, y en los Andosoles con valores entre 2 a 4 cm*h⁻¹. Existe mayor estabilidad de micro-agregados en los Acrisoles; la

micromorfología observada en los Acrisoles revela un arreglo de matriz extremadamente arcillosa de forma muy compacta, una estructura masiva sin agregados y ausencia de un espacio poroso, mientras los Andosoles presentan una microestructura granular, con agregados en forma semicircular que ocurren solos o en clusters y un sistema poroso abundante bien formado. Las propiedades de los Andosoles que contribuyen a su almacenamiento de agua son porosidad, el tamaño y la forma de los poros interconectados, su conductividad hidráulica, sus altos contenidos de materia orgánica con una buena estructura de sus agregados les confieren mayor capacidad de penetración y almacenamiento de agua que esta disponible para las raíces de la vegetación, en contraste con los Acrisoles que presentan una alta compactación de sus horizontes con pocos poros de transmisión de agua y la predominancia de microporosidad y grietas, y con tendencia a formar capas endurecidas o encostramiento superficial, por ende resultando en la ocurrencia de escorrentía superficial.

I. INTRODUCCION

En los últimos años, la degradación ambiental en México ha pasado a ser un tema principal en el debate nacional tomando connotaciones que afectan la gobernabilidad y la sustentabilidad de la sociedad en su conjunto. Los problemas de degradación de suelos, deforestación, explotación y deterioro de recursos hídricos, y pérdida de biodiversidad, dejaron de considerarse como simples datos estadísticos para constituir la causa de numerosos conflictos sociales.

Ante esta situación, es apremiante un cambio de paradigma en la forma como el ser humano aprovecha y dispone de los recursos naturales ya que, tradicionalmente, ha sido a través de un enfoque sectorial. Hoy en día, se recurre a una visión más integral. Considerando que los ecosistemas naturales se basan en la interacción continua de todos sus elementos, en el tiempo y en el espacio, es imposible solucionar un problema ecosistémico manipulando sólo uno de ellos por ejemplo el agua.

El agua dentro de la perspectiva del manejo de cuencas, actualmente ha cambiado, no sólo se refiere al conocimiento, análisis y protección de los recursos hídricos, sino también involucra la capacidad de los suelos, vegetación, relieve, impacto de la población, y la infraestructura civil, para la producción sustentable de bienes y servicios. De esta forma, las cuencas se convierten en unidades lógicas para la planeación y gestión de los recursos naturales, buscando obtener los beneficios que brinda una cuenca sin generar daños, para lo cual es necesario un conocimiento de los procesos, a nivel macro y micro, que ocurren en cada una de ellas y considerando que cada cuenca tiene sus particularidades.

Para la comprensión de los procesos que ocurren en una cuenca, se requiere del estudio de las interrelaciones que se dan en todos los elementos de un paisaje, así como las formas en las cuales la población se organiza para apropiarse de los recursos naturales y las interconexiones espaciales entre las distintas zonas de funcionamiento de la cuenca (Cotler, 2004).

Se presenta la cuenca como un sistema, ya que está formada por un conjunto de elementos que se interrelacionan. Los más importantes son: el agua, el clima, la vegetación, la topografía, el suelo y los estratos geológicos. En una cuenca tiene gran importancia la relación directa que existe entre la cuenca alta y la cuenca baja, de forma que las acciones que el hombre realiza en la parte alta, afectan de manera determinante en la parte baja. Por esta razón, la cuenca como sistema natural, reúne todas las condiciones para utilizarla como unidad planificadora en

el establecimiento de programas integrados, que permitan la solución de problemas de mucha complejidad.

Los suelos constituyen la base de los ecosistemas terrestres. Por ello, todas las actividades productivas que se realizan en ellos, requieren que mantenga en buen estado sus propiedades y, con ello, sus funciones.

Entre las funciones del suelo se encuentran servicios ambientales indispensables para el sostenimiento tanto del ecosistema como de la vida humana. La función más conocida es la de suministro de nutrientes a las plantas y la de soporte de la vegetación. Sin embargo, el suelo cumple con otras funciones igualmente trascendentes, como la de constituir un medio poroso y permeable, que debe ser apto para la regulación del sistema hidrológico, influyendo así en la filtración, retención y pérdida de agua, y en su purificación o contaminación, según las circunstancias. Asimismo, constituye el medio donde se realizan ciclos biogeoquímicos necesarios para la reincorporación de compuestos orgánicos y, en los últimos años, también se le ha asociado un papel importante en la captura de carbono. Además, según sus características, el suelo es el hábitat de una miríada de organismos, muchos de los cuales cumplen un papel fundamental en la salud humana. Así como también, cumple con importantes funciones socioculturales e históricas (Cotler, 2003).

El agua constituye uno de nuestros recursos naturales más importantes. Resulta necesario estudiar los ciclos del agua, ya que en muchos lugares del planeta, con un aumento o déficit de este recurso, se obtendrá un impacto adverso en la sociedad o en ecosistemas frágiles. Además, factores como el calentamiento global pudieran tener un impacto significativo en las fuentes de alimentos y agua, a nivel global. Por la magnitud del problema, se debe disponer de un entendimiento básico de la complejidad del ciclo hidrológico y considerar al ambiente como un sistema interconectado de componentes, que interactúan a diferentes escalas en tiempo y espacio (Rose, 2004).

En la presente investigación se busca entender el comportamiento de un componente del ciclo hidrológico: el agua del suelo, dentro del funcionamiento de una cuenca, atendiendo a elementos como el contenido de humedad, capacidad de retención y grado de infiltración en el suelo, por lo que, también se pretende hacer un análisis comparativo al trabajar con dos unidades edafológicas de diferente edad en dos cuencas adyacentes.

II. JUSTIFICACIÓN

En este estudio se pretende integrar una fase de investigación relacionada con el agua almacenada en el suelo y que escurre en superficie, en virtud de que las cuencas estudiadas forman parte de una mayor que abastece de agua a la presa de Cointzio que, a su vez abastece de agua potable a la ciudad de Morelia, Estado de Michoacán, poniendo de manifiesto su importancia estratégica.

Conocer o estimar el límite de la reserva hídrica del suelo en ambas cuencas, ayudaría a entender las virtudes y deficiencias de cada una de ellas, en cuanto a la cantidad de agua almacenada y disponible para un mejor manejo del recurso.

El suelo y el agua son parte integral de la zona crítica de la superficie de la Tierra, ésta se extiende a través de la zona de raíces, profundidad de la zona vadosa y agua subterránea, e incluye la superficie del terreno y su dosel de vegetación, ríos, lagos y aguas poco profundas, ya que contribuyen al origen y desarrollo de la vida en el planeta, al aumento y la disminución de las civilizaciones humanas y a la sostenibilidad o deterioro de los ecosistemas mundiales. En estas áreas fundamentales, la hidropedología contribuye a una mejor comprensión de la variedad de cuestiones relacionadas con la zona crítica, como la calidad del agua, calidad del suelo, el paisaje, procesos de gestión de cuencas hidrográficas, ciclaje de nutrientes, salud de los ecosistemas, cambio climático, eliminación de residuos en el sitio, planificación del uso del suelo, agricultura de precisión, y muchos otros de importancia social (Lin, 2002).

Es fundamental estudiar y discutir sobre el transporte de agua que se encuentra en la zona no saturada del suelo, ya que, esta agua es la fuente directa de humedad para la vegetación y, por lo tanto, es vital para la producción de alimentos y para un buen equilibrio de la cuenca. Más aún, esta zona constituye la conexión entre los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos. El agua evaporada o transpirada desde esta región no saturada suministra una gran porción de la humedad atmosférica, tan importante para el equilibrio del micro-clima y la meteorología. El agua en la zona no saturada, también controla la cantidad de precipitación que entrará al suelo o permanecerá en la superficie.

El agua que penetra al suelo pasa a formar parte de un sistema disperso que la retiene de distinta forma según el tipo de suelo y las propiedades físicas del mismo y que, a su vez, podrá ser llevada a la superficie según la profundidad de las raíces de la vegetación que cubre el suelo.

De crucial importancia es contar con información sobre bajo qué condiciones se da una mayor tasa de infiltración del agua en el suelo en varios sentidos; por una parte, en relación con el agua que se infiltra y puede ser almacenada en el perfil del suelo y, por otro lado, con respecto al agua que no se infiltra, escurre sobre la superficie y es causante de erosión.

El manejo y uso del suelo puede afectar en forma importante la escorrentía, la evaporación directa de la superficie del suelo, la cantidad de humedad disponible para las plantas dentro del alcance de sus raíces, y la profundidad a la cual pueden penetrar las mismas. La cantidad de agua que puede llegar a ser evaporada, transpirada, disponible para las plantas, retenida como humedad del suelo o recarga de agua subterránea, depende de la condición física del suelo y su influencia sobre la infiltración y escorrentía, y de las condiciones atmosféricas, ya que éstas afectan la evaporación y transpiración.

Los suelos cumplen funciones muy importantes en el ciclo hidrológico. Son uno de los principales reservorios de agua dulce, y transforman las fuentes erráticas de agua de lluvia en un relevo continuo de agua a las raíces de las plantas, y en continuas descargas de agua hacia el agua que alimenta los acuíferos, a cuerpos de agua y a los ríos. La creciente disminución de fuentes de agua de calidad para los diferentes usos (consumo humano, agricultura, industria, etc.) resalta la importancia de la conservación del agua además de la del suelo. Debido a la estrecha relación entre suelos y cantidad y calidad del agua se justifica que el uso, manejo y conservación de suelos y recursos hídricos se enfoque en forma integrada. Un mal manejo de los recursos suelo y agua puede conducir a una fuerte degradación de suelos y tierras, con un descenso en la habilidad del suelo para cumplir sus funciones como medio para el crecimiento de las plantas, como regulador del régimen hídrico, y como filtro ambiental (Pla, 2003).

El periodo máximo de crecimiento efectivo de la vegetación natural como de cultivos, depende de la duración del periodo efectivo de lluvias, y de la disponibilidad de agua en el suelo. La longitud del periodo potencial de crecimiento depende de las condiciones climáticas (lluvia y evapotranspiración potencial), de la distribución de la lluvia entre escorrentía e infiltración (afectada por los efectos de sellado superficial, encostramiento), y de la capacidad de almacenaje de agua en el suelo (determinado por la profundidad efectiva de raíces y las propiedades de retención de agua del suelo). Por lo tanto, la escorrentía y la capacidad efectiva de retención de agua del suelo, ambos componentes del balance de agua y que pueden ser afectados por procesos de degradación del suelo, se toman en cuenta en procesos de degradación en la conservación de agua y en el crecimiento potencial de las plantas y producción de cultivos.

En el marco del proyecto internacional REVOLSO (Alternative agriculture for a sustainable rehabilitation of deteriorated volcanic soils in Mexico and Chile. Contrat UE/U.J.L. Giessen: ICA4-CT-2001-10052) y ahora de DESIRE (Desertification mitigation and remediation of land: a global approach for local solutions -UE FP6-2005-Global-4 (OJ 2005 C 177/15), se están realizando estudios de degradación de los suelos y del funcionamiento hidrológico de la cuenca de Cointzio. Este trabajo contempla el estudio del comportamiento hidro-físico de los suelos en esta región del Estado de Michoacán, donde predominan dos unidades edafológicas, Andosoles y Acrisoles. Se podrá contar así con un diagnóstico físico de las cuencas, que sirva como una base para la planeación, restauración y conservación de suelos y agua. Además, su importancia radica en que los suelos de tipo Andosol, se encuentran entre los suelos más productivos debido a su elevada fertilidad y capacidad de retención de agua.

El conjunto de propiedades físicas que se analizaron en este trabajo tiene particular importancia, la mineralogía de la fracción arcilla muestra el grado de desarrollo de la unidad edafológica al conocer el tipo de arcillas presentes en el suelo, la textura indica las diferentes fracciones granulométricas que constituyen el suelo ya que cada fracción tiene un comportamiento físico diferente en el suelo, la densidad aparente junto con la resistencia mecánica sirve para conocer la condición física del suelo en relación a su grado de compactación al interior del perfil del suelo; la porosidad indica la cantidad y distribución de huecos o espacios por donde puede pasar o quedar retenida el agua; las curvas de retención de humedad del suelo indican la cantidad de agua que puede disponer la vegetación, muestran la reserva de agua en el suelo que cumple una función biológica en el desarrollo de la vegetación y la disolución de nutrientes; conocer la conductividad hidráulica en la superficie junto la posición en el terreno y la pendiente permite estimar si filtración es rápida o lenta, donde se pueden presentar procesos de infiltración o escorrentía superficial; la estabilidad de agregados mide el impacto de las gotas de lluvia en la superficie del suelo; la materia orgánica influye en las propiedades físicas mencionadas anteriormente; la micromorfología entre otras aplicaciones, permite hacer observaciones detalladas de rasgos pedogenéticos en el perfil del suelo, así como realizar descripciones cualitativas de las formas y tamaños de los poros en el suelo.

III. OBJETIVOS

El objetivo central de este trabajo es determinar las principales propiedades físicas de dos unidades edafológicas que regulan la entrada de agua al suelo y su retención en el mismo y a través de esto realizan su aportación en el funcionamiento hidrológico y biológico (productivo) de las cuencas hidrográficas, determinando los procesos que actúan en la zona no saturada del suelo y haciendo una comparación entre dos unidades de suelo con diferentes edades de formación, esperando encontrar los parámetros que determinan el movimiento libre del agua.

Como se ha indicado, en estos procesos están involucrados factores muy diversos algunos de los cuales constituyen los objetivos parciales de esta investigación, y se pueden sintetizar en los siguientes:

- Identificar y describir la interacción de la fracción mineralógica de los suelos con el agua.
- Contrastar las propiedades físicas en ambas unidades de suelo de las dos cuencas bajo estudio.
- Analizar las características físicas de los suelos en función de su evolución.

Desde el punto de vista práctico o de aplicación, el objetivo de la investigación es prever el comportamiento que a medio o largo plazo, puede tener el manejo de las cuencas y sus modificaciones, sobre el equilibrio y la calidad de agua superficial y de percolación.

IV. HIPÓTESIS

La entrada de agua al suelo o infiltración a nivel superficial, en dos unidades de suelos (Andosol y Acrisol), presentes en dos cuencas aledañas (Huertitas y Río Grande) y cuyas propiedades son contrastantes, muestran un comportamiento diferente, de tal manera, que su presencia y distribución determinan la configuración y manejo de la cuenca.

V. ANTECEDENTES

En este capítulo se exponen los trabajos llevados a cabo en la zona de estudio y en otros sitios con temas similares enfocadas al conocimiento físico del suelo y su interacción con el flujo de agua en la zona vadosa, siendo que ahí es el primer contacto o filtro, antes de que el agua llegue a ser considerada como agua de infiltración o de percolación.

El suelo, un reservorio mayor de agua fresca, tiene influencia en la calidad de aguas superficiales y subterráneas. Los procesos en la pedosfera (lixiviación, erosión, transporte de cargas suspendidas y disueltas en agua) interactúan con la biosfera y atmósfera para influenciar propiedades de la hidrosfera. Entre las propiedades físicas del suelo importantes para la hidrosfera, en términos de la calidad y cantidad de los recursos de agua fresca, son retención de agua y propiedades de conducción del agua en el suelo, área y carga superficial y composición de constituyentes orgánicos e inorgánicos (Lal y Shukla, 2004).

Los Andosoles cubren 2.35 millones de hectáreas en el territorio nacional. Se originan a partir de cenizas volcánicas, poseen alto contenido de materia orgánica (1.5 - 20 %), alta porosidad (60 - 80 %), permeabilidad (24 a 90 mm*h⁻¹), retención de humedad (30 - 60 %), microagregados estables (1 a 10 mm diámetro), baja densidad aparente ($\leq 0.9 \text{ g*cm}^{-3}$). Sin embargo, presentan deficiencias nutrimentales (fijación de fósforo, toxicidad por aluminio, etc), que pueden inhibir la actividad microbiológica y, cuando están secos, pierden las mejores características físicas (FAO-ISRIC-SICS, 2007, ver http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrb/doc/wrb2007_red.pdf).

En la cuenca de Río Grande, donde ocurre la unidad Andosol, de acuerdo con varios autores, entre las propiedades que tienen estos suelos, se destaca su alto contenido en materia orgánica, alta porosidad (60 - 80 %), baja densidad aparente, gran capacidad de retención de agua y la formación de microagregados estables. Tales características pueden explicarse en base al alto contenido en oxihidróxidos de Fe y a la estructura que las arcillas Alófanas presentan en estos suelos: esferas huecas que permanecen discretas a humedades altas (Allbrook, 1984; Grandjean *et al.*, 1984).

La peculiar composición mineralógica de los suelos ándicos, es la responsable de la existencia de unas propiedades físicas y mecánicas particulares en estos suelos (Warkentin y Maeda, 1980). Así, la baja densidad aparente, elevada estabilidad estructural, alta microporosidad y capacidad de retención de agua, alta conductividad hidráulica y velocidad de infiltración, y los altos límites de plasticidad, están estrechamente relacionados con la presencia de alofanas, imogolita y otros minerales de intervalo corto, y con una particular manera de asociarse entre sí

y con los compuestos orgánicos, generando estructuras con elevado grado de agregación y alta estabilidad. Todas estas características están en íntima relación, a su vez, con las características de erodabilidad de los suelos ándicos y, de ahí que los procesos de erosión en suelos con un predominio de minerales amorfos en la fracción fina, presenten también rasgos diferenciales respecto a los suelos con una mineralogía dominada por arcillas cristalinas (Pla, 1992).

En su estudio sobre erosión hídrica en Andosoles de las islas Canarias, Rodríguez *et al.*, (2002), concluyen que la mayor producción de sedimentos y escorrentía tiene lugar con las lluvias que caen sobre suelo seco. Dada la conocida hidrofobicidad de los horizontes orgánicos superficiales de los Andosoles, y con el suelo seco, se genera una elevada escorrentía que arrastra los agregados de la superficie del suelo desnudo, independientemente de la intensidad de la lluvia caída. Luego de la lenta humectación del suelo, la velocidad de infiltración elevada y, sobre todo, la alta capacidad de retención de agua de estos suelos (hasta $300 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), hacen que la generación de escorrentía sea muy baja y sólo se produzca con las lluvias de alto volumen de agua caída (independientemente de su intensidad) que entonces arrastra mediante flujo laminar, los agregados humectados que han sido fragmentados por el impacto de gota de lluvias previas de elevada intensidad.

Los suelos de cenizas volcánicas recientes se caracterizan por un secado continuo y uniforme desde la superficie del suelo hasta los estratos inferiores. El gradiente hidráulico en estos suelos es pequeño y la conductividad hidráulica en fase no saturada es alta (Ellies y Vyhmeister, 1981). También, se ha sugerido que la forma de los poros en estos suelos puede favorecer la alta conductividad hidráulica. A su vez, esta característica explicaría el por qué estos suelos pierden tan rápidamente el agua y sufren un secado uniforme en profundidad (Vyhmeister, 1980). Según Ellies y Vyhmeister (1981), al comparar dos suelos: un Andosol reciente y un Andosol evolucionado con otros suelos, determinaron un gradiente hidráulico muy pequeño, lo que se puede deber a su alta conductividad hidráulica en fase no saturada y al alto porcentaje de poros medianos que presentan estos suelos. En Andosoles más recientes, los gradientes hidráulicos son algo más pronunciados que en Andosoles evolucionados; los autores señalan que esto puede deberse a la mayor proporción de poros gruesos y a la extrema hidrofobia del suelo menos evolucionado.

Buytaert *et al.*, (2000), en su análisis sobre efectos de uso del suelo en la capacidad de retención de agua en la cuenca del Río Paute, en el sur de los Andes del Ecuador, mencionan que los suelos tienen una alta capacidad de retención de agua y de regulación de la misma, debido a la presencia de alófono, en la que se forman esferas huecas que almacenan agua. Los cultivos tienen una clara influencia en las propiedades hidro-físicas del suelo; sin embargo,

no está muy claro qué fenómenos controlan la retención y liberación de agua a nivel de cuenca para este caso en particular.

Egawa (1977), menciona que es común encontrar estructura granular en las capas superficiales de los Andosoles y los agregados mayores a 0.25 mm de diámetro son estables en agua, lo que implica buena agregación y estabilidad. Este mismo autor señala que en los primeros 30 cm de espesor de los suelos agrícolas que estudió hay abundantes raíces y, en los de bosque y pastizal, éstas son extremadamente abundantes, todas son delgadas y finas, y disminuyen con la profundidad. Existen numerosos poros de varios tamaños en todo el espesor y son comunes en los Andosoles. Según Egawa (1977), la porosidad en este tipo de suelos puede presentar valores $> 69 \%$, y una capilaridad $> 14 \%$ además, existe una estrecha relación entre la estructura granular y la porosidad, las cuales dan al suelo una permeabilidad rápida.

Bedolla *et al.* (2006) y Bedolla (2007), evaluó la dinámica de erosión en una cárcava de la caldera de Atécuaro en la cuenca de Cuitzeo, reportando que en los suelos sobre lo cuales se ha desarrollado una densidad alta de cárcavas son de tipo Acrisol con características texturales arcillosas (70 %), ubicados sobre laderas, pobres en materia orgánica ($< 2.2 \%$), estas características causan problemas de encostramiento y disminuyen la infiltración. La baja fertilidad, alto contenido de arcillas, densidad aparente alta (compactación) y pendientes pronunciadas provocan que no se establezca vegetación sobre la cárcava. El tamaño predominante de los microagregados presentes en la cárcava fue de 1.00 mm, lo cual se considera apropiado para una estructuración adecuada del suelo, esto explica parcialmente que la cárcava se encuentre en estado de equilibrio. El 83 % de las lluvias ocurridas durante los tres años de estudio fueron potencialmente no erosivas, con intensidades muy bajas y una energía cinética con una ligera relación con la pérdida de suelo. Lo cual sugiere que solo pocos eventos de lluvia son capaces de provocar erosión.

En la microcuenca Huertitas se ha estudiado el flujo, la calidad y uso de los manantiales ubicados, principalmente, en la porción oriente de la cuenca, reportándose que de los 14 manantiales encontrados, sólo 5 de ellos mantienen su gasto hidráulico estable hasta la época de estiaje, en tanto que en 9, el escurrimiento depende total o parcialmente de la época de lluvias. Se encontró una relación directa entre las áreas de cobertura vegetal primaria (bosque) y la presencia de manantiales. Las características permeables del Andosol y la impermeabilidad de la roca subyacente (ignimbritas y andesitas), así como el comportamiento de los manantiales ante el periodo de secas y lluvias, permite considerar a los manantiales como de contacto (relación observada en toda la Faja Volcánica Transmexicana), y no de fractura ya que, en este último caso, no habría relación entre las épocas de lluvias y estiaje con

el comportamiento hidráulico registrado. Sin embargo, también se constató que suelos sepultados ricos en arcillas (Acrisoles o Luvisoles) pueden cumplir la función de confinantes, observándose en los contactos la formación de verdaderos conductos en el suelo por los que brota el agua (González *et al.*, 2006).

Los resultados del programa internacional de investigación denominado REVOLSO (Alternative Agriculture for a Sustainable Rehabilitation of Deteriorated Volcanic Soils in Mexico and Chile), en su programa “Degradación y Restauración de Suelos con enfoques participativos en la cuenca de Cointzio, Michoacán”, revelan que las lluvias son relativamente regulares de un año a otro y durante un mismo año. Las precipitaciones que generan erosión no llegan a doce. Los Acrisoles, por su alto contenido de arcillas y hierro, son muy resistentes a la erosión; en tanto que los Andosoles, una vez cultivados y secos, sufren una fuerte erosión laminar. El sistema de “año y vez” (un año se cultiva y el otro no), genera fuertes escurrimientos en el período de descanso. Río abajo, esta agua puede provocar una erosión regresiva importante. Esto mantiene las cárcavas que proliferan en el paisaje. Sin embargo, estas cárcavas aparecieron décadas e incluso siglos antes, tal vez a raíz de algunos eventos muy localizados pero muy intensos más que de un solo evento. En el caso de los Andosoles, el agua se infiltra rápidamente a lo largo del perfil; en los Acrisoles se ha observado que, después de los 50 cm, el agua ya no fluye hacia abajo. Los horizontes superiores se recargan de agua, la cual empieza a circular lateralmente. Esta dinámica, en caso de pendientes muy fuertes, provoca pequeños deslizamientos.

Los programas de investigación REVOLSO y SEMARNAT-CONACYT (2003-2006) al trabajar sobre los procesos y dinámica de erosión en dos áreas de la cuenca de Cointzio, Acrisoles y Andosoles, encontraron los siguientes resultados: las tasas de arrastre son muy bajas ya que no superan $1 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, o sea muy por debajo de la erosión aceptable, las tasas de escurrimiento superficial son bastantes altas (40 - 50 %) con lluvias fuertes. Este dato es bastante sorprendente, ya que los Andosoles tienen la característica de tener una capacidad de almacenamiento de agua muy alta, que teóricamente debería permitir de absorber toda el agua de cada lluvia. En general, se produce un encostramiento muy rápidamente que sella la superficie del suelo e impide la infiltración. Pero este encostramiento de parte de los Andosoles, es sorprendente ya que son suelos caracterizados por su altísima porosidad. Sin embargo, se explica por el modo de cultivar estos suelos, al prepararse los campos se dejan al descubierto los suelos los cuales se secan. Al secarse, pierden sus propiedades de coherencia. Los resultados de erosión son también a relativizar ya que las parcelas experimentales tienen un largo de 30 m. Con la tasa de escurrimiento que se registró, se hace suponer que con pendientes más largas, se puede generar una erosión mucho más fuerte de la que se registró.

En el trabajo de Alcalá *et. al.* (2006), "Caracterización edafológica al sureste de la cuenca de Cointzio, Michoacán", se realizó una caracterización de la morfología y, las propiedades físicas y químicas de los suelos al sureste de la Cuenca de Cointzio, agrupando los resultados en tres grupos de suelos de acuerdo a su gradiente altitudinal. Los suelos del grupo 1 se localizan en zonas de depósito de ceniza volcánica, en altitudes mayores a los 2,250 m, la pendiente es variable y oscila de 10 % a 25 %; grupo 2, se presentan entre los 2,230 m y 2,270 m de altitud en laderas de loma y en meseta, con pendientes de 5 % a 15 %; grupo 3, se encuentran a 2,205 m y en las zonas de valle destinadas al pastoreo y con pendientes menores de 5 %. En el Grupo 1, los suelos son pardo amarillento oscuro y pardo rojizo oscuro, en los demás grupos, el color es pardo rojizo oscuro en la mayor parte de su espesor, en el Grupo 3 se hacen notar colores rojizos y verdosos, debido a condiciones de hidromorfismo. La textura franco limosa domina en los suelos del grupo 1, en los demás grupos existe una combinación de texturas, franco arcillo limosa, arcillosa y arcillo limosa. La arcilla oscila de 40 % a 80 %. Los suelos del grupo 2 son similares a los suelos profundos del grupo 1, lo cual sugiere que en este último grupo existen suelos enterrados. En todos los suelos, la distribución de la arcilla con la profundidad es irregular, debido a una discontinuidad de materiales por tratarse de depósitos de ceniza volcánica (grupo 1) y por encontrarse en las zonas más bajas de la cuenca en donde se deposita material que proviene de las áreas más altas. La densidad aparente de la mayoría de horizontes es menor de $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, característico de propiedades ándicas. El carbono orgánico de todos los grupos de suelo es de 2.0 % a 5.8 % en los primeros 30 cm de espesor. Luego, su concentración disminuye regularmente (25 % a 75 cm de profundidad) (Covaleda *et. al.*, 2007). En ciertos casos, relacionados a suelos enterrados, su concentración puede volver a subir para luego volver a disminuir.

El boletín de suelos No. 79 de la FAO (2005), menciona que la cantidad de humedad del suelo que permanece disponible para las plantas, depende de la textura y la porosidad del mismo, su volumen anterior de humedad, el volumen perdido por evaporación directa, la evapotranspiración y el drenaje profundo. El riego (si está disponible) es, por lo general, necesario cuando dos tercios del agua disponible (entre la capacidad de campo y el punto permanente de marchitez) han sido agotados. Si no existe la posibilidad de riego, es necesario manejar el suelo de tal forma que se desarrolle y permanezca una máxima cantidad de poros de varios tamaños posibles. Esto ampliará la capacidad de retención de agua y permitirá que las plantas resistan durante más tiempo a los períodos de sequía. Los suelos de textura franca, por lo general, tienen la mayor capacidad de agua disponible, mientras que, los suelos arenosos, en el otro extremo, tienen una capacidad reducida de retención de agua, tal como ocurre con la arcilla en el otro extremo, como se aprecia en la figura 1.

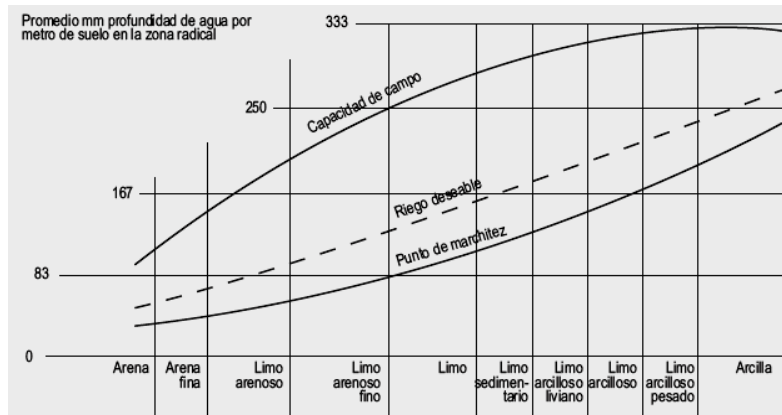


Figura 1. Capacidad de agua disponible típica de suelos de diferentes texturas. (Fuente: Smiht y Ruhe, 1955).

La misma FAO (2005) señala además que la cantidad máxima de agua disponible que puede retener un suelo (o sea la capacidad de agua disponible) varía con la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la profundidad de enraizamiento y la estructura. La materia orgánica del suelo es particularmente importante, ya que puede retener agua cerca de 20 veces su peso. El contenido de gravas en el suelo también puede ser muy importante, dependiendo de la naturaleza y abundancia. Por ejemplo, los fragmentos de óxidos de hierro de diámetro > 2 mm puede contener más de 20 por ciento de agua ($m^3 \cdot m^{-3}$) a capacidad de campo, y la cal porosa y el yeso, también pueden hacer una contribución importante a la capacidad disponible de agua del suelo. En contraste, un alto contenido de rocas no porosas, disminuirá fuertemente la capacidad disponible de agua del suelo.

Los impactos del uso del suelo sobre la hidrología como los procesos relacionados con la generación de sedimentos, sólo pueden ser verificados a escalas pequeñas (hasta algunas decenas de kilómetros cuadrados), en las que pueden distinguirse de los procesos naturales y otras fuentes de degradación. Esto sugiere que el uso de instrumentos económicos y mecanismos como programas y apoyos de reforestación, también serán más eficaces en esta escala. El suponer que las relaciones observadas a escalas más pequeñas ocurren en escalas más grandes, y que los procesos observados en una región particular pueden ser aplicados a otra, ha conducido, a menudo, a respuestas inadecuadas e ineficaces, porque los diferentes procesos son dominantes en diferentes escalas. Algunos de los impactos del uso del suelo sobre la calidad del agua, tales como la salinidad, tienen un impacto en escalas más grandes también. En este tipo de escalas los impactos son difíciles o imposibles de verificar a causa de un largo período que transcurre entre causa y efecto, y la superposición de muchos factores. Esto hace que sea difícil llegar a acuerdos entre los usuarios, acerca de los derechos y responsabilidades necesarias para la aplicación de mecanismos en el manejo de las cuencas,

para compartir costos y beneficios en general a estas escalas de las cuencas fluviales (FAO Land and Water Development Division, 2000).

VI. MARCO TEÓRICO

6.1 Propiedades físicas del suelo

Existen varias definiciones en la literatura del concepto suelo, en este trabajo se entiende como la capa exterior intemperizada y fragmentada de la superficie de la tierra, que se forma a través de la desintegración y descomposición de las rocas por procesos físicos y químicos, y es influenciado por la actividad de microorganismos (Hillel, 1988).

Estructura del suelo

Un suelo puede ser, simplemente, un ensamble suelto e inestable de partículas al azar, o puede consistir de un cuerpo estructurado de partículas interligadas y asociadas de agregados, que tienen forma y tamaño regular. La manera en la cual varias partículas son empaquetadas y mantenidas juntas para formar una red espacial continua, es llamada matriz del suelo o fábrica del suelo. El arreglo u organización de las partículas (configuración interna de la matriz del suelo) se llama estructura, y es de naturaleza inestable, ya que es afectada por cambios en el clima, actividad biológica y prácticas de manejo. Además, es vulnerable a fuerzas destructivas de naturaleza mecánica y fisicoquímica, por lo tanto, este término representa un concepto cualitativo y no cuantitativo. La estructura afecta el contenido y conducción de agua y aire en el suelo (Lal y Shukla, 2004).

En general, se reconocen tres amplias categorías de la estructura del suelo: granular, masiva y en bloques. Cuando las partículas están desligadas unas de otras, la estructura es suelta, como en el caso de un suelo arenoso o grueso, o un depósito no consolidado de polvo del desierto. Cuando el suelo está firmemente empaquetado en grandes bloques cohesivos, como algunas veces pasa con la arcilla seca, la estructura se llama masiva. Entre estos dos extremos, se reconoce una condición intermedia o granular en la cual las partículas del suelo están asociadas en pequeños montículos cuasi – estables conocidos como agregados o peds.

La estructura puede ser evaluada directamente en el campo, o bajo observación al microscopio de láminas delgadas bajo luz polarizada. Asimismo se pueden medir tamaño y forma de agregados.

Porosidad del suelo

Donde los agregados son bastantes distintos, es posible dividir la distribución de tamaños de poros en dos rangos, macroporos y microporos. Los macroporos son las cavidades inter-agregados, las cuales sirven como principales avenidas para la infiltración y drenaje de agua, y para aireación. Los microporos son los capilares intra-agregados responsables de la retención

de agua y solutos. (Hillel, 1988). Las formas típicas de los agregados se muestran en la figura 2.

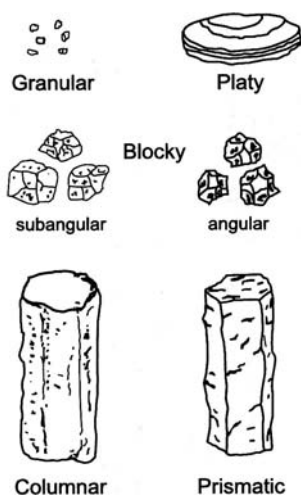


Figura 2. Formas de agregación del suelo.
(Fuente: Hillel, 1988).

Los microporos son generalmente menores a un micrómetro de ancho y se presentan típicamente en suelos arcillosos. El agua mantenida en tales poros estrechos está sujeta a campos de fuerza de absorción, y puede diferir del agua presente en poros más anchos. El agua contenida en estos dominios se puede desviar de las simples leyes de capilaridad y flujo de Darcy. Por otra parte, el agua retenida en los microporos es siempre discontinua y no participa en el ordinario fenómeno de flujo de líquidos.

Los poros capilares son los típicos poros en un suelo de textura media. Están en el rango de anchura desde varios micrómetros a unos pocos milímetros. El fluido que permea en ellos, generalmente, obedece las leyes de capilaridad y de Darcy. En estado no saturado, tales poros exhiben el típico menisco aire – agua. El flujo dentro de las porciones rellenas de agua de poros capilares es generalmente capilar.

Los macroporos pueden ser de varios milímetros o incluso centímetros de ancho y son bastante visibles a simple vista. Se presentan como hoyos o fisuras en suelos arcillosos secos, así como en todos los tipos de suelos resultado de la actividad biológica, tales poros pueden ser tanto planos como tubulares. Cuando se vacía el agua, los macroporos constituyen barreras al flujo capilar, permitiendo sólo muy lentas películas a lo largo de sus paredes. Cuando están llenos de agua, sin embargo, los macroporos permiten un rápido flujo, siempre turbulento en lugar de un flujo laminar.

La distribución de tamaños de agregados por tamaños es una determinación de la distribución de tamaños de poros del suelo y tiene un efecto en la erodabilidad de la superficie del suelo,

particularmente, por viento. En campo los agregados adyacentes siempre se adhieren uno a otro, aunque no tan tenazmente como lo hacen las partículas en cada agregado. La separación y clasificación de los agregados del suelo incluye una destrucción de la forma original, es decir, el arreglo estructural *in situ*. Así, los resultados de las pruebas de distribución de tamaños de agregados dependen del medio mecánico empleado para separar dichos agregados.

Determinar el estado de agregación de un suelo en un momento particular no es suficiente para retratar las características verdaderas de la estructura de un suelo, ya que, esta característica del suelo tiende a variar sobre el tiempo. Los suelos varían en el grado de su vulnerabilidad a fuerzas externas destructivas. La estabilidad de los agregados es una medida de esta vulnerabilidad (Kemper y Rosenau, 1986). Más específicamente, expresa la resistencia de los agregados a fragmentarse cuando son objeto de potenciales procesos destructores.

Materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo no se considera un parámetro físico del mismo. Sin embargo, influye en forma determinante en muchas de sus características físicas. La materia orgánica en los suelos aporta gran cantidad de macro y micro-nutrientes; tiene un efecto cementante que estabiliza y mantiene unidos a los agregados del suelo; favorece la retención de humedad, ya que tiene una alta capacidad de retención de agua (puede retener 20 veces su peso en agua); mejora la porosidad, la estructura del suelo y la capacidad de intercambio catiónico, facilitando el manejo de los suelos arcillosos (Nuñez, 1991). Con una interacción fuerte con la textura y arcillas minerales, la fracción orgánica afecta la susceptibilidad del suelo a la erosión, compactación, lixiviación, acidificación, formación de costras y pérdida de estructura. También, a través de su capacidad buffer, filtro, y capacidad para retener y degradar contaminantes, la fracción orgánica influencia la calidad del agua (Lal y Shukla, 2004).

Contenido de agua en el suelo

El agua en el suelo está ligada a las superficies de arcillas por un conjunto de mecanismos, que incluyen la atracción electrostática dipolar, moléculas de agua orientadas a los sitios de carga, así como sus enlaces de hidrogeno expuestos a los átomos de oxígeno en el cristal de arcilla. Otro mecanismo de hidratación surge de la presencia de cationes adsorbidos. Ya que los cationes asociados con la arcilla también tienden a hidratarse, ellos contribuyen a la hidratación total del sistema arcilloso. Cuantitativamente, este efecto depende del tipo de cationes presentes y en la capacidad de adsorción de cationes de la arcilla.

La tenacidad de adsorción arcilla-agua es mayor para la primera capa de moléculas de agua. La segunda capa es ligada a la primera por enlaces de hidrogeno, y la tercera a la segunda, etc.; pero la influencia del campo de fuerza de atracción de la superficie de arcilla disminuye

con la distancia, así que más allá de unas pocas capas moleculares llega a volverse pequeña. El espesor efectivo y las propiedades físicas de adsorber agua en la vecindad de la superficie de la arcilla, ha sido objeto de controversia durante décadas recientes. Algunos investigadores sostienen que el agua adsorbida es cuasi-cristalina, por lo que difiere de la masa de agua en viscosidad, difusividad iónica, constante dieléctrica y densidad. Otros señalan que las diferencias en propiedades entre agua adsorbida y agua capilar en el suelo son escasamente detectables y en algunos casos sin consecuencias (Hillel, 1988).

La adsorción es un fenómeno interfacial resultado de las fuerzas diferenciales de atracción o repulsión que ocurren entre moléculas o iones de diferentes fases en sus superficies expuestas. Como resultado de las fuerzas cohesivas y adhesivas que entran en juego, las zonas de contacto entre las fases pueden exhibir una concentración o una densidad de material diferente de las interiores de las mismas fases. Cuando fases diferentes entran en contacto, varios tipos de adsorción pueden ocurrir: adsorción de gases en sólidos, de gases en superficies líquidas y de líquidos tanto en solutos como en sólidos (Sposito, 1984). Se debe de hacer una distinción entre adsorción, la cual es una atracción o repulsión superficial, y absorción, la cual se refiere al caso en el cual una fase permea o penetra en otra. En realidad, es difícil separar ambos términos en el caso de sistemas altamente porosos, y así, el término neutral sorción es frecuentemente empleado.

La tensión superficial es un fenómeno que se presenta típicamente, pero no exclusivamente, en la interfase de un líquido y un gas. El líquido se comporta como si estuviera cubierto con una membrana elástica en un estado constante de tensión, lo cual tiende a causar la superficie de contacto. En la figura 3, una molécula dentro del líquido es atraída igualmente en todas direcciones, por las fuerzas cohesivas de sus moléculas vecinas; mientras que, una molécula en la superficie del líquido es atraída en la fase líquida densa por una red de fuerzas más grandes que la atracción de ésta hacia la fase gaseosa. Esta fuerza desequilibrada hace parecer a las moléculas superficiales se orienten hacia dentro del líquido, y da por resultado la tendencia para que se forme la superficie al contacto. Es por eso que las gotas de un líquido en el aire, así como burbujas de aire en un líquido, asumen la forma de una esfera, la cual es un cuerpo de exposición superficial mínima respecto a su volumen.

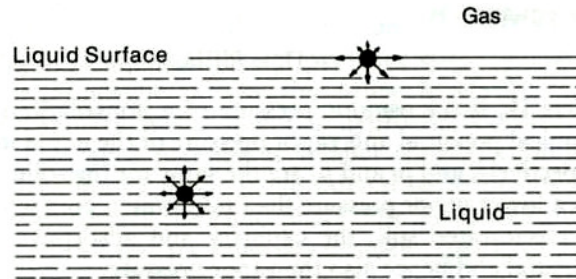


Figura 3. Fuerzas cohesivas que actúan en una molécula dentro de un líquido y su superficie. (Fuente: Hillel, 1988).

La capilaridad es la subida espontánea de un líquido en un tubo estrecho (capilar). Se debe a la existencia de dos tipos de fuerzas diferentes: cohesivas que son las fuerzas entre las moléculas del líquido y, adhesivas, que son las fuerzas que operan entre las moléculas del líquido y el capilar. En el agua las fuerzas cohesivas corresponden a los enlaces de hidrógeno. Las fuerzas adhesivas ocurren cuando el capilar está compuesto de un material que tiene enlaces polares, como el vidrio. Este material contiene muchos átomos de oxígeno que tienen carga negativa parcial, sobre la cual, se adhieren los polos positivos de la molécula de agua.

La cantidad de agua contenida en una unidad de masa o volumen de suelo, y el estado de energía del agua en el suelo, son factores importantes que afectan el crecimiento de las plantas. Otras propiedades también dependen del contenido de agua, como las mecánicas: consistencia, plasticidad, compactibilidad, y penetrabilidad. En los suelos arcillosos, la expansión y contracción asociado con la adición o extracción de agua, cambia la porosidad total y densidad aparente del suelo, así como la distribución de poros por su tamaño. El contenido de agua en el suelo, también gobierna el contenido de aire e intercambio de gas, afectando la respiración de las raíces, la actividad de los microorganismos, y el estado químico del suelo (potencial redox) (Hillel, 1988).

La condición fisicoquímica o estado del agua en el suelo es caracterizada en términos de su energía libre por unidad de masa llamada potencial (energía potencial de agua en el suelo). De los varios componentes de este potencial, el potencial matricial manifiesta la tenacidad con la cual el agua es mantenida por la matriz del suelo.

La humedad y el potencial matricial están relacionados uno al otro, y la representación gráfica de esta relación es llamada curva de retención de humedad. Sin embargo, la relación no es única, es afectada por la dirección y tasa de cambio de la humedad del suelo, y es sensible a cambios en el volumen del suelo y estructura. Tanto la humedad como el potencial matricial, varían en espacio y tiempo cuando el suelo es humedecido por la lluvia, drenado por gravedad, y secado por evaporación y extracción por las raíces.

El humedecimiento más bajo que encontramos en la naturaleza es un estado variable llamado sequedad del aire; en el laboratorio, es un estado arbitrario conocido como condición de secado en estufa. Por otro lado, la condición más húmeda posible de un suelo es la saturación, definida como una condición en la cual todos los poros del suelo están llenos con agua. La saturación es fácil de medir en el caso de suelos que no se expanden (arenosos). Puede ser difícil o imposible de definir en el caso de suelos que se expanden, ya que los suelos pueden contener agua absorbida y expandirse después de que todos los poros han sido llenados con agua.

En campo, el suelo rara vez está en saturación, ya que las burbujas de aire se pueden formar y permanecer ocluidas o encapsuladas en la matriz, incluso, cuando el suelo es inundado con exceso de agua. Sin embargo, las burbujas de aire pueden efervescer en el suelo si la temperatura asciende y la solubilidad de los gases es excedida.

La fracción del contenido de agua en el suelo puede ser expresado en términos de masa o volumen;

$$\theta = w (\rho_b / \rho_w) = w \Gamma_b$$

donde w es la masa húmeda, mientras que θ , es contenido de humedad, Γ_b es la gravedad específica del suelo. Las dos primeras expresiones se pueden relacionar por medio de la densidad aparente ρ_b y la densidad del agua ρ_w .

Ya que el movimiento del agua en un suelo arcilloso es bastante lento, la energía cinética es ignorada. La energía potencial es debida a la posición o condición interna, y es de importancia primordial, determinar el estado y movimiento de agua en el suelo. Las diferencias en energía potencial del agua entre un punto y otro, surge de la tendencia del agua a fluir en el suelo. El agua en el suelo se mueve constantemente en dirección de la disminución de energía potencial. El gradiente de la energía potencial con la distancia es el hecho de la fuerza móvil que causa el flujo.

El potencial del agua del suelo es expresado en tres formas:

- Energía por masa unitaria, se toma como la expresión fundamental de potencial, usando unidades de ergs por gr o joules por kg.
- Energía por volumen unitario, ya que el agua líquida sólo es ligeramente compresible en el rango de presión encontrado cerca de la superficie de la tierra, su densidad es independiente

del potencial. Así, existe una proporción directa entre la expresión de potencial como energía por masa unitaria, y su expresión como energía por volumen unitario, esto proporciona dimensiones de presión.

- Energía por peso unitario (carga hidráulica), que se puede expresar en unidades de presión hidrostática, y también puede ser expresada en términos de una carga equivalente de agua, la cual es la altura de una columna de líquido correspondiente a la presión dada. Este modo de expresión es más simple y conveniente que la energía por volumen unitario. Es común caracterizar el estado del agua del suelo en términos de la carga potencial total, la carga potencial gravitacional, y la carga potencial de presión.

De acuerdo a lo anterior,

$$\phi = \phi_g + \phi_p$$

podemos escribir

$$H = H_g + H_p$$

Lo anterior se lee, la carga potencial total de agua en el suelo (H), es la suma de las cargas potenciales gravitacional (H_g) y de presión (H_p). El término H es llamado carga hidráulica.

Cuando la succión es aplicada gradualmente, los primeros poros a ser vaciados van a ser los grandes, que no pueden retener agua en contra de la succión aplicada. Renombrando la ecuación de capilaridad ($-P = \Psi = 2\gamma / r$), se puede predecir que un aumento gradual en la succión resultará en el vaciado progresivo de los poros más pequeños, hasta que con valores altos de succión, sólo los poros muy estrechos van a retener agua. Similarmente, un aumento en la succión del agua del suelo está asociado con una disminución del espesor de la hidratación, es decir, el agua absorbida sobre la superficie de las partículas del suelo. El aumento de succión está asociado con una disminución de la humedad del suelo. La cantidad de agua remanente en el suelo al equilibrio, es una función del tamaño y volumen de poros llenos de agua y la cantidad de agua adsorbida en las partículas, así es una función de la succión matricial. Esta función se mide experimentalmente y se representa gráficamente por una curva llamada curva de retención de agua del suelo (Klute, 1986).

A mayor contenido de arcilla, mayor es la retención de agua a una succión particular, y más gradual es la pendiente de la curva. En un suelo arenoso, muchos de los poros son grandes, y una vez que estos grandes poros son vaciados a una succión determinada, sólo una pequeña cantidad de agua permanece. En un suelo arcilloso, la distribución de poros por tamaños es

más uniforme, y mayor cantidad de agua es adsorbida; así que este aumento de la succión matricial causa una disminución más gradual de la humedad, como se aprecia en la figura 4.

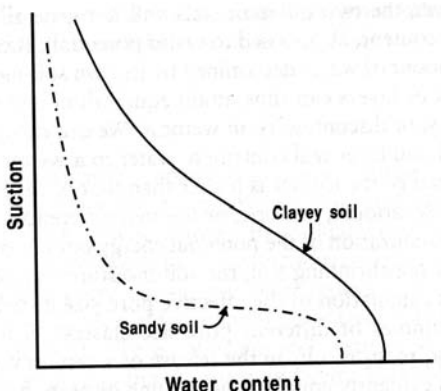


Figura 4. Efecto de la textura en la retención de agua.
(Fuente: Hillel, 1988).

La estructura influye en la forma de la curva característica de humedad del suelo en el rango de baja succión. Se puede esperar que el efecto de la compactación reduzca la porosidad total y el volumen de los grandes poros interagregados. Como resultado de la compactación, la saturación del contenido de agua y la disminución inicial del contenido de agua con la aplicación de baja succión son disminuídos. Por otro lado, el volumen de los poros de tamaño intermedio es probable que sea algo mayor en un suelo compacto (ya que algunos de los poros originales grandes han sido divididos en tamaño intermedio debido a la compactación); mientras que, los microporos permanecen casi sin afectarse, y así, las curvas de compactación y descompactación del suelo tienden a converger en el rango de alta succión, como se aprecia en la figura 5.

La relación entre humedad y succión matricial de muestras de suelo, es determinada en laboratorio por medio de un ensamble de platos de tensión en el rango de baja succión (< 1 bar), y por medio de una placa de presión o membrana de presión en el rango de succión más alto. Estos instrumentos permiten la aplicación de valores de succión sucesivos, y medidas repetidas de la humedad del suelo en equilibrio a cada succión (Klute, 1986).

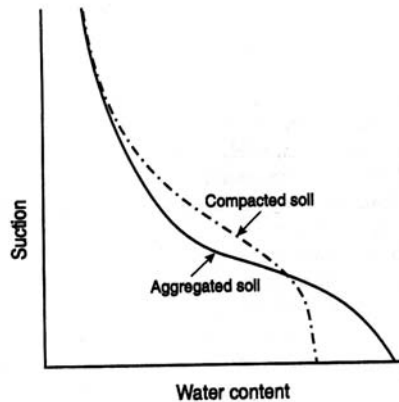


Figura 5. Efecto de la estructura del suelo en la retención de agua del suelo. (Fuente: Hillel, 1988).

El movimiento del agua en el suelo se presenta bajo condiciones saturadas y no saturadas (figura 6). Las condiciones saturadas se presentan debajo de la tabla de agua, donde el movimiento del agua es predominantemente horizontal, con menos componentes de flujo que en la dirección vertical. Mientras que, las condiciones no saturadas predominan sobre la tabla de agua (zona vadosa). Zonas locales de saturación pueden existir después de una precipitación o irrigación. Como regla general, el movimiento del agua en la zona no saturada es vertical, pero también puede contener grandes componentes laterales.

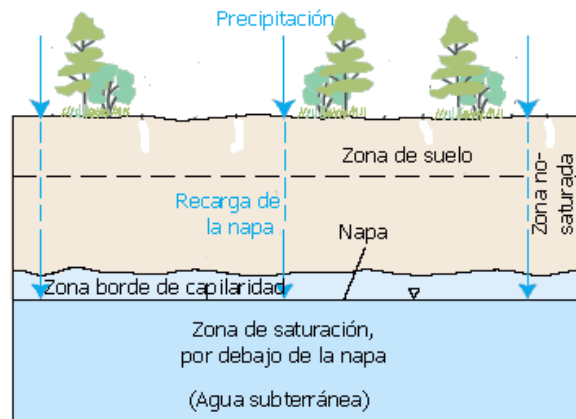


Figura 6. Zonas saturada y no saturada.
(Fuente: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>).

Las propiedades conductivas de suelos no saturados dependen de la textura y estructura. En condiciones no saturadas en suelos con grandes poros, esos poros rápidamente se vacían y se vuelven no conductores cuando se desarrolla la succión, disminuyendo así la alta conductividad inicial. En un suelo con poros pequeños, muchos de los poros retienen y conducen agua a succión apreciable, así que, la conductividad hidráulica no disminuye tan marcadamente, y puede exceder a la de un suelo con grandes poros sujeto a la misma succión.

La figura 7 muestra la dependencia de la conductividad con la succión en suelos de diferente textura (notar que K vs curvas de succión son dibujadas en una escala log – log, ya que tanto K como la succión, varían sobre varios órdenes de magnitud en el rango de succión de interés general, es decir, 0 – 100 m de carga de succión). Se puede observar que aunque la conductividad saturada de un suelo arenoso K_{s1} es mayor que la de un suelo arcilloso K_{s2} , la conductividad no saturada del primero disminuye con más inclinación con el aumento de succión y llega a ser menor.

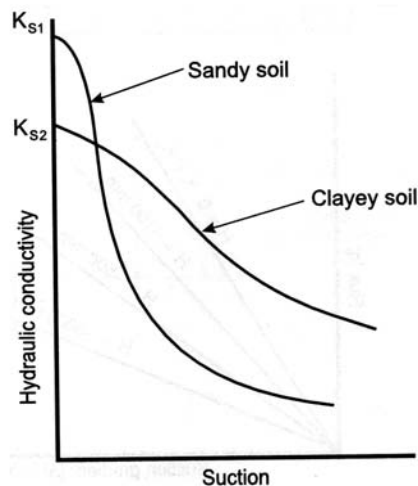


Figura 7. Dependencia de la conductividad en succión en diferentes suelos (escala log – log). (Fuente: Hillel, 1988).

La declinación de la pendiente de la curva de conductividad hidráulica con aumento de la succión matricial, lleva implicaciones respecto a la dinámica agua – suelo. Sugiere que el proceso se presenta bajo condiciones de suelo húmedo es más rápido que en condiciones de suelo seco. Así, el proceso de infiltración durante el cual el agua se mueve en el perfil del suelo a través de una zona superficial saturada, es un proceso más rápido que la evaporación, la cual incluye el movimiento del agua desde el interior del suelo a la atmósfera a través de una zona superficial seca. Una gran tormenta puede cargar a un perfil total de suelo en solo unas horas con una cantidad de agua que, subsecuentemente, la evaporación puede extraer muy lentamente en semanas.

El problema de la heterogeneidad del suelo en el campo, se relaciona a una pregunta fundamental, la escala del sistema. Obviamente, las propiedades del suelo como conductividad, porosidad, y distribución de poros por su tamaño, dependen de la escala y su magnitud, debiéndose considerar en relación a algún tamaño específico de la muestra. Ningún suelo es homogéneo, es decir, sus partículas primarias, secundarias, y espacio poroso difieren de punto a punto y su geometría es demasiado complicada para caracterizarla en detalle al microscopio. Así, el suelo es caracterizado en términos macroscópicos basado en promedios

gruesos de heterogeneidades microscópicas. Una suposición es que las propiedades físicas son medidas en un volumen de suelo suficientemente grande a las heterogeneidades microscópicas para permitir tal promedio.

Se define a la cuenca hidrográfica como un “continuum” de clima, suelos, cobertura vegetal, habitats, red de drenaje, sistemas de producción, y presencia humana a lo largo de su pendiente. El agua que cae como precipitación en una cuenca puede tener varios destinos. Parte es reevaporada antes de que alcance la tierra. Otra parte es interceptada por la vegetación, y parte de ésta es reevaporada directamente. Otra porción, escurre desde la superficie del terreno y a través de los ríos, y es regresada al mar. Todavía otra porción, se infiltra en la tierra. Para esta última porción hay numerosas salidas: parte es mantenida por capilaridad en o casi toda la superficie y es evaporada; otra parte, es usada por la vegetación y devuelta al aire a través del proceso de transpiración; otra porción se une al agua subterránea y lentamente encuentra su salida a ríos, apareciendo después de días, meses y períodos más largos, como flujo de agua subterránea; y finalmente, una cantidad que es usualmente insignificante, pero en algunas cuencas de drenaje es de importancia, se infiltra a grandes profundidades y aparece después de largos intervalos, siempre en puntos distantes, como manantiales, pozos artesianos y géiseres (Scoot, 2000).

El agua que fluye en una corriente puede crear su camino en el canal de corriente de una o varias fuentes:

- Precipitación caída directamente en la superficie de la corriente y sus tributarios.
- Escorrentía superficial, agua que cae como precipitación en la superficie del terreno y encuentra su camino en el canal de corriente sin infiltrarse en el suelo y no percolar hacia la tabla de agua.
- Flujo de agua subterránea o agua que tiene su origen en la precipitación pero infiltrada en el suelo, que se une al agua subterránea, y entonces, después de días, semanas o largos periodos, encuentra su camino a través del suelo en la corriente.

En la anterior clasificación, la segunda fuente puede ser dividida en: (1) agua que fluye directamente sobre la superficie del terreno, y (2) agua que se infiltra y entonces percola usualmente a través de una delgada capa de suelo superficial de textura gruesa, hasta que encuentra un sustrato relativamente impermeable, después del cual una parte puede continuar su viaje hacia abajo, mientras que el resto, se mueve lateralmente hacia el canal de corriente y nunca penetra hacia la tabla de agua. Esta última cantidad se llama *flujo subsuperficial*. Éste se comporta más parecido a escorrentía superficial que al flujo de agua subterránea, por que

alcanza la corriente rápidamente, aunque es difícil distinguirlo de la verdadera escorrentía superficial.

La cantidad de humedad del suelo en sus capas superficiales tiene un efecto importante en la capacidad de infiltración y en la determinación de si existirá o no aumento en el agua subterránea. Cuando el contenido de humedad es alto, la capacidad de infiltración es baja, y la cuenca es susceptible a inundaciones. También, cuando el contenido de humedad del suelo es elevado a la capacidad de campo, el agua infiltrada alcanzará la tabla de agua y aumentará la descarga de agua subterránea. Al final del verano o principios del otoño, las pérdidas por evapotranspiración reducen el contenido de humedad del suelo, si intensas lluvias caen en tales condiciones, es raro que se genere un aumento de las corrientes, ya que mucha agua entra al suelo y es mantenida como humedad del suelo.

En cualquier cuenca, la escorrentía es influenciada por el tipo de suelo debido a las diferentes capacidades de infiltración de los diferentes suelos, lo cual es resultado del tamaño del grano de los suelos, su agregación, y la forma y el arreglo de las partículas del suelo. Los suelos que contienen arcillas que se expanden y contraen con cambios en el contenido de humedad, afectan la capacidad de infiltración.

Horton (1933), fue el primero en reconocer la capacidad de una cuenca para absorber el agua que recibe como lluvia, y sugirió la teoría de la capacidad de infiltración.

La compactación mecánica causada por las gotas de lluvia reduce la capacidad de infiltración en suelos de textura fina. La superficie de suelos arcillosos expuestos puede ser convertida a una condición impermeable virtual de esta manera; mientras que, la capacidad de infiltración de un suelo arenoso es afectada muy poco por la compactación. La protección de la cobertura vegetal puede minimizar o eliminar este efecto, incluso en suelos de textura fina. El tráfico de vehículos y animales en el suelo puede volver la superficie relativamente impermeable.

Cuando un suelo llega a estar muy seco, la superficie contiene partículas finas. Cuando inicia la infiltración, estas partículas finas son acarreadas en el suelo, el cual actúa como un filtro, y el material fino es depositado en el espacio intersticial, reduciendo así la capacidad de infiltración.

Una estructura de suelo permeable se puede desarrollar bajo fenómenos naturales como madrigueras de animales e insectos, por la descomposición de materia vegetal como raíces, por heladas y soleadas. El arado y cultivo, también producen una estructura gruesa. Sin embargo, las altas capacidades de infiltración producidas de esta manera, son siempre reducidas muy rápidamente por compactación debido a la lluvia.

La presencia de una densa cobertura vegetal como bosque o pastos, tiende a acelerar la infiltración. La cobertura vegetal no sólo da protección de la compactación debido a la lluvia, sino que también, suministra una capa de materia orgánica descompuesta, la cual promueve la actividad de madrigueras de insectos y animales.

La capacidad de infiltración de una cuenca cambia anual y estacionalmente. El cambio anual resulta de cambios en el uso del suelo, de cambios en el carácter de la vegetación anual, y del avance del estado en el desarrollo de la vegetación perenne. Cuando en una cuenca una gran porción es objeto de un repentino cambio en el uso del suelo, como una deforestación y transformada en agricultura, el cambio resultante en la capacidad de infiltración puede ser muy marcado. La capacidad de infiltración depende principalmente de la estructura del suelo y del tamaño y de la distribución de los poros. La formación de una estructura favorable esta relacionada a la cantidad de materia orgánica (Sánchez, 1976). Debido al mayor contenido de materia orgánica de los suelos bajo bosques, la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en estos suelos también es alta, lo que juega un papel importante en el régimen hidrológico de las cuencas, reflejandose entre otro en el comportamiento del caudal durante las diferentes estaciones de tiempo del año (Lininger y Weingartner, 1999).

VII. CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

7.1 Localización geográfica

La región que comprende la zona de estudio se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán al sur de la ciudad de Morelia (Fig. 8). La ubicación geográfica está comprendida por los paralelos 19° 30' y 19° 37' de Latitud Norte y por los meridianos 101° 09' y 101° 15' de Longitud Oeste. La cuenca Huertitas se localiza al oeste de la localidad Atécuaro, cuenta con un área de 2.91 Km², la cota de máxima altitud es de 2,540 m y la mínima de 2,000 m; mientras que, la cuenca de Río Grande tiene su cota de máxima altitud en 2340 m y la mínima de 2,200 m, y tiene un área de 17.55 Km²

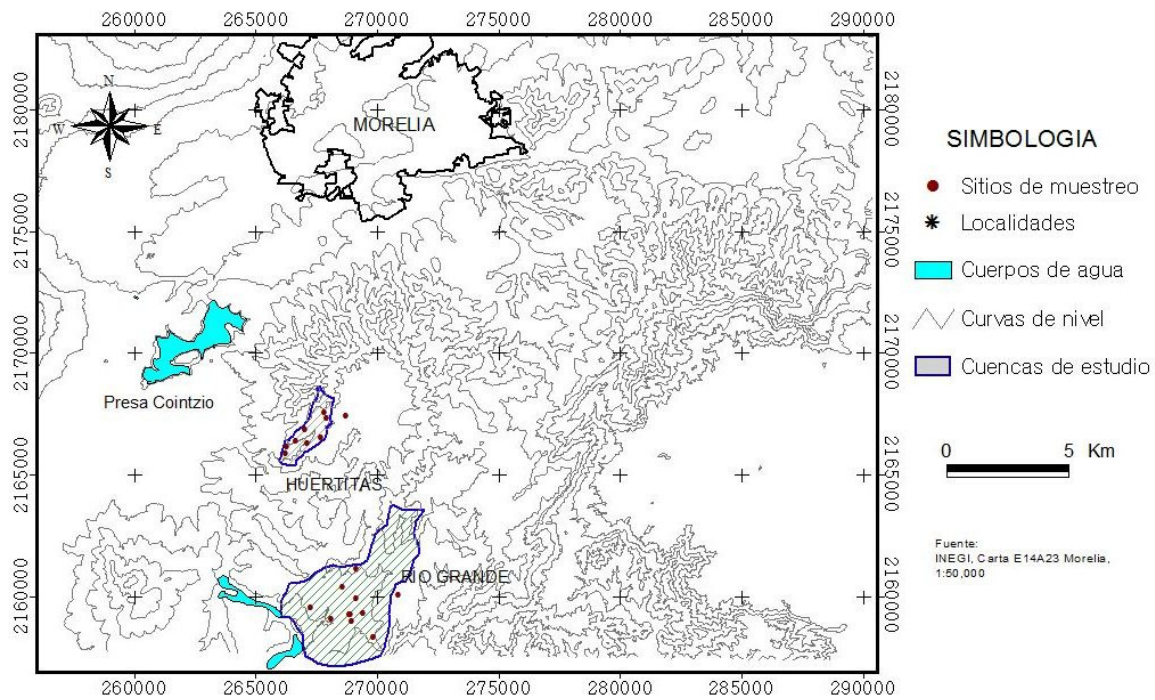
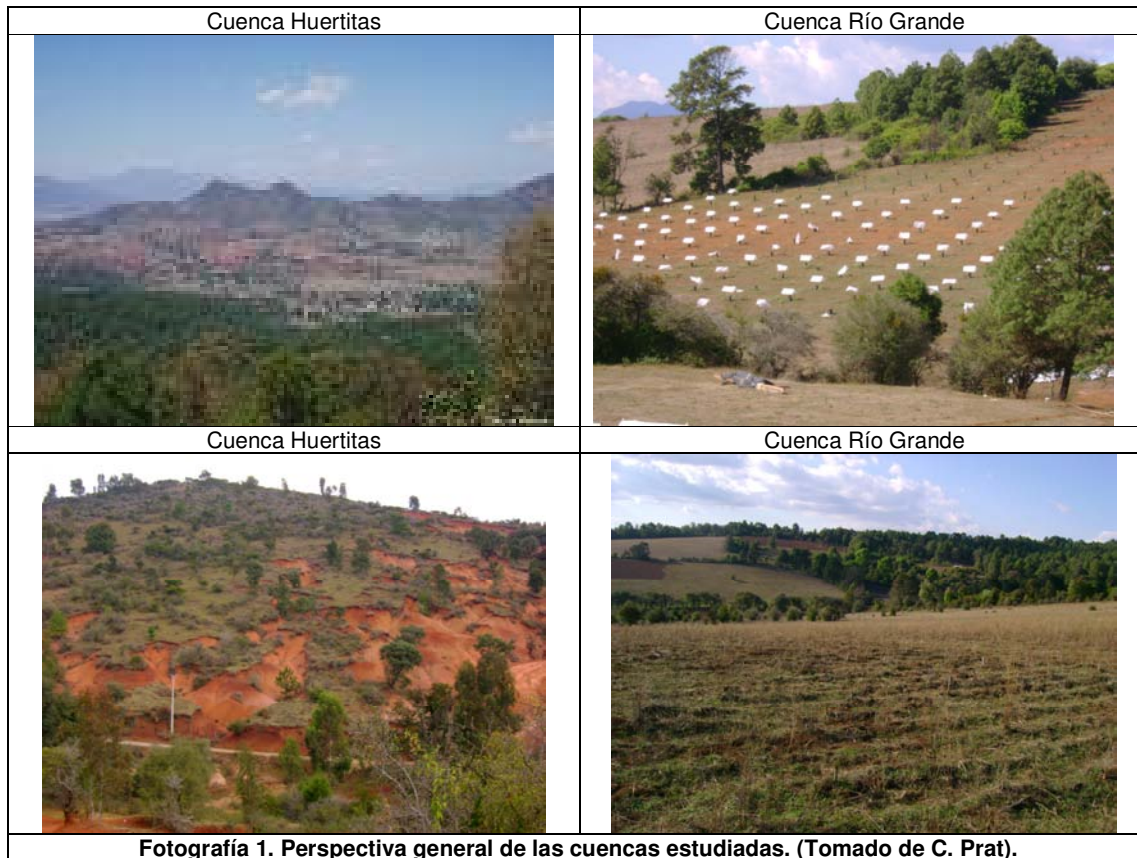


Figura 8. Localización del área de estudio.

La fotografía 1 muestra las imágenes con una vista general de las cuencas estudiadas, donde se pueden apreciar rasgos distintivos de cada una de ellas. Se aprecia el contraste en el desarrollo de la vegetación, así como los efectos de erosión completamente notorios en la cuenca Huertitas.



7.2 Geología

La descripción del área el estudio que se presenta en este capítulo se tomó principalmente de la Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán (SPP, 1985). Las cuencas estudiadas se ubican dentro de la Provincia del Eje Transvolcánico, a la cual se le caracteriza como un cinturón de rocas volcánicas de diversos tipos, acumuladas en innumerables y sucesivos episodios volcánicos iniciados desde mediados del Terciario hasta el presente. La zona está integrada por grandes sierras volcánicas y coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios volcanes-escudo de basalto y depósitos de arena y cenizas, además de otras formaciones, que se encuentran dispersas entre extensas llanuras.

El relieve estructural original de la Provincia del Eje Transvolcánico está constituido esencialmente, esencialmente, por rocas volcánicas jóvenes del Cenozoico Superior. El paisaje de esta región conserva en su mayor parte rasgos estructurales originales. Es aquí donde se reconocen, a simple vista, el mayor número de estructuras volcánicas como son los conos cineríticos, aparatos volcánicos complejos, domos riolíticos y andesíticos, coladas de lava basáltica, y depósitos piroclásticos. Estas estructuras han sido afectadas en una etapa geotectónica, asociada a fenómenos volcánicos por algunos sistemas de fallas y fracturas

orientadas este-oeste. Sobre las estructuras volcánicas más jóvenes, el desarrollo natural de los procesos geomorfológicos superficiales ha sido incipiente; sin embargo, los procesos erosivos, recientemente, están siendo acelerados por las actividades humanas.

Otro rasgo esencial de la provincia lo constituyen las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos como: Pátzcuaro y Cuitzeo. Estos lagos se formaron por bloqueo del drenaje original debido a productos volcánicos, o por el afallamiento que provocó un hundimiento, formando un graben, proceso de formación que sufrió el lago de Chapala.

La zona de estudio pertenece a la subprovincia volcánica Tarasca que comprende un área de 7,751.79 Km² dentro del Estado de Michoacán y representa el 1.17% del área total estatal. Se caracteriza por un vulcanismo reciente (Plioceno-Cuaternario) muy particular. La mayor parte de su extensión está clasificada fisiográficamente, como sierra volcánica con llanuras.

El Valle de Morelia lo delimitan tres sistemas montañosos: al este el cerro del Punhuato que se une al sureste con la sierra del Otzumatlán. Los cerros de Atécuaro, el Venado y las Ánimas por el sur se corresponden con el lomerío de Santa María.

Dentro de la región, se asocian también los Valles de Queréndaro y Alvaro Obregón, que pertenecen a la cuenca del lago de Cuitzeo, siendo el último, una zona de influencia del Río Grande de Morelia.

7.3 Edafología

En la subprovincia Neovolcánica Tarasca los suelos más importantes de la región son los Andosoles, derivados de cenizas volcánicas, que se presentan en sierras, mesetas y lomeríos. En general, son suelos profundos, negros y pardo-rojizos; muy ligeros, pues su espacio poroso es abundante, presentando una densidad aparente menor a 0.85 g*cm⁻³, caracterizados en su fracción mineral por la presencia de alófanos, que son materiales amorfos de alta capacidad de intercambio catiónico y alta retención de fósforo; la saturación de bases es moderada, y los contenidos de calcio, sodio y magnesio son también moderados y, los de potasio, bajos. La textura dominante de estos suelos es migajón arcillosa, lo que permite una permeabilidad media y drenaje moderado. En cuanto al contenido de materia orgánica se distinguen tres tipos de Andosoles: húmicos, mólicos y ocrícos, es decir, ricos, moderados y pobres, respectivamente. Los más ricos son fuertemente ácidos y, los otros, muestran un grado de acidez moderado. Gran parte de estos suelos se desarrollan en las masas forestales más importantes del Estado, constituidas por bosques de pino y encino, y asociaciones de éstos,

otro uso de estos suelos es la agricultura de temporal con cultivos permanentes, siendo el cultivo más importante el del aguacate.

En segundo orden de importancia están los Acrisoles, los cuales son suelos rojos que, se localizan en zonas de relieve montañoso donde prevalecen climas templados. Estos suelos presentan texturas francas y arcillosas, por lo que, pueden ser permeables y poco permeables y, en cuanto a su drenaje, moderados y lentos, respectivamente. Son fuertemente ácidos y ricos en materia orgánica. Presentan una saturación de bases muy baja, así como las cantidades de cationes intercambiables; también son sumamente pobres en fósforo. En general, tienen fertilidad baja. Se desarrollan bajo bosques de encino y pino y, en áreas ya desmontadas, se lleva a cabo agricultura de temporal.

La carta edafológica Morelia E14-1 escala 1:250,000, indica que en la zona de estudio existen principalmente dos unidades de suelo (Figs. 9 y 10). En la cuenca Huertitas predomina la unidad Acrisol órtico, que es un suelo con una profundidad mayor a 100 cm, espesor del horizonte A < 10 cm, de textura fina, estructura en bloques subangulares de tamaño fino y desarrollo moderado; el horizonte B de textura fina, estructura en bloques de tamaño medio y desarrollo fuerte, con acumulación de arcilla. En la cuenca de Río Grande prevalece la unidad Andosol húmico – órtico, que es un suelo con una profundidad mayor a 100 cm, espesor del horizonte A de 15 cm, de textura media, estructura en bloques subangulares de tamaño medio y desarrollo moderado; el horizonte B de textura media, estructura en bloques de tamaño medio y desarrollo moderado.

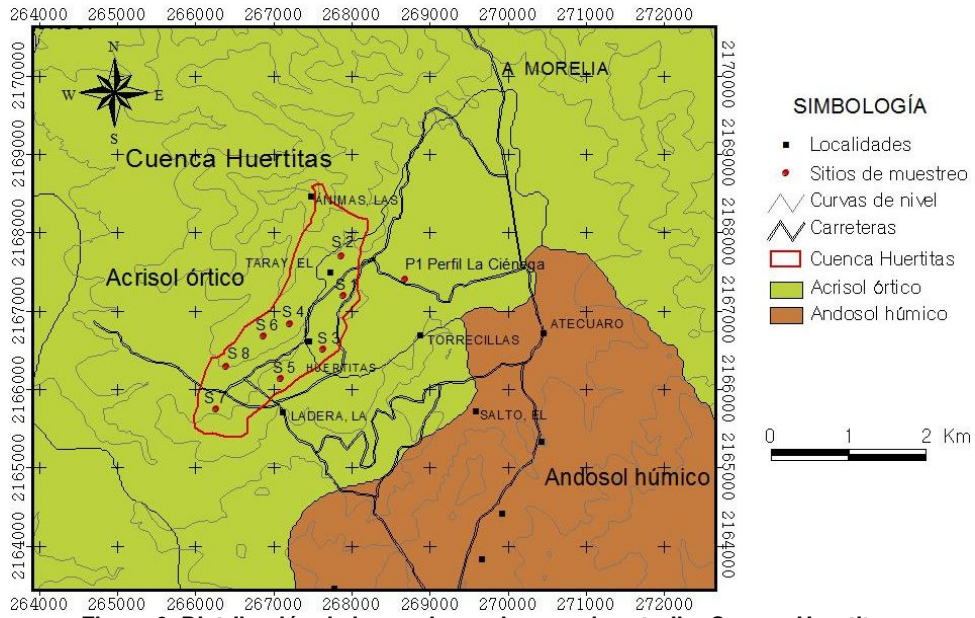


Figura 9. Distribución de los suelos en la zona de estudio, Cuenca Huertitas.

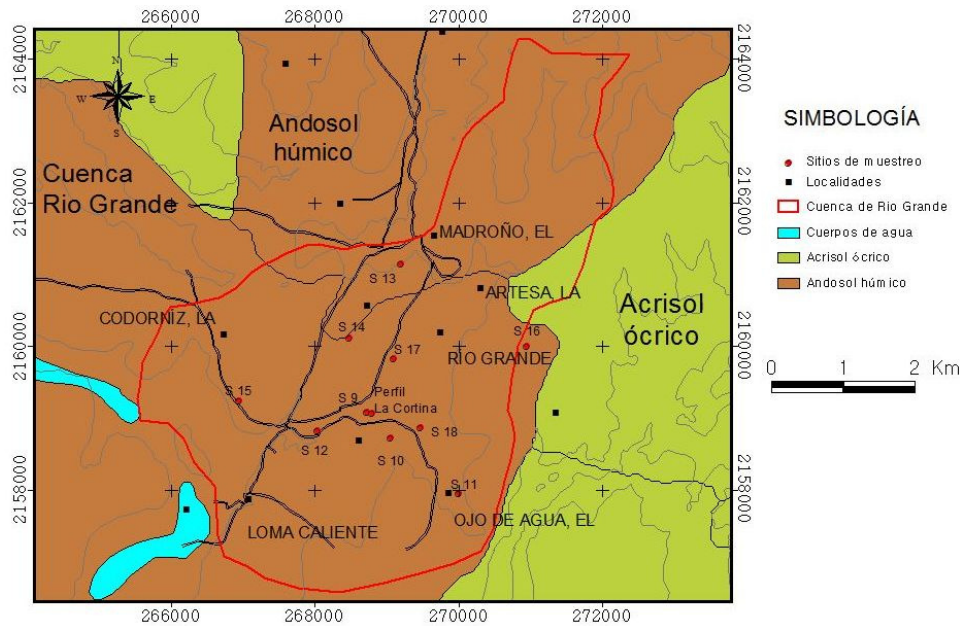


Figura 10. Distribución de los suelos en la zona de estudio, Cuenca de río Grande.

7.4 Clima

De acuerdo con García (1988), el clima que corresponde a esta zona es C(w2)(w), es decir, clima templado subhúmedo, con régimen de lluvias en verano, y con un porcentaje de lluvia invernal menor a 5.

En Morelia la temperatura media anual es de 17.7° C, la media mensual más alta se registra en mayo con 21° C y, la más baja, en enero con 14.2° C. La precipitación media anual es de 785 mm, con abundancia en julio de 175 mm, y escasez en febrero y marzo con 5.7 mm.

La precipitación del mes más húmedo, que se presenta en la mitad del año cuando está el verano, es mayor a 10 veces la del mes más seco; mientras que, la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm. El porcentaje de lluvia invernal es menor del 5% de la anual. El cociente de precipitación/temperatura (P/T) es mayor de 55, el cual corresponde al tipo más húmedo de los climas C(w).

En esta área se presenta el mes más cálido durante el verano, y el más seco durante el invierno, con una oscilación térmica de 5° C a 7° C y no se presenta canícula, con una marcha de la temperatura tipo ganges.

Los vientos que proceden del mar ascienden por montañas y producen lluvias principalmente en las laderas. En menor escala, los lagos y presas de Michoacán son también una fuente de humedad, ya que éstos cubren una superficie de 1,200 km², que representa el 1.8 % de la superficie del Estado. Al desplazarse la zona subtropical de alta presión al norte durante el verano, los vientos alisios tienen mayor influencia y soplan en superficie con una dirección este-noreste recogiendo humedad del Golfo de México.

En el invierno, al desplazarse la faja subtropical de alta presión hacia el sur, resulta en el predominio de aire seco, presentándose también masas de aire polar continental del sur de Canadá y de los Estados Unidos.

Lo anterior indica que la evaporación supera a la precipitación, por lo que, el agua superficial y de los acuíferos depende de la infiltración que se realiza a través de la región hidrológica.

El grado de humedad relativa alcanza hasta un 98.4 % para los meses de Julio a Agosto. Los tipos de intemperismo que se presentan en la región son heladas y granizadas; para las primeras, la frecuencia es de 20 a 40 días; mientras que, para las segundas son de 2 a 4 días por año. Los vientos dominantes son del suroeste durante el verano, y noroeste durante el invierno.

7.5 Hidrología

La zona de estudio se localiza en la región hidrológica No. 12 “Lerma-Chapala-Santiago”, que cubre una superficie aproximada de 14,818.25 Km². La parte correspondiente al estado de Michoacán constituye una región alta que se caracteriza por tener zonas planas y amplias, que basculan ligeramente hacia el noroeste. Estos valles se encuentran separados por elevaciones que corresponden a estructuras volcánicas, cuyas altitudes varían entre los 1,600 y 2,000 m. En la porción norte del Estado se encuentran orientados de oeste a este. Además, existen amplias llanuras de inundación alrededor de los principales cuerpos de agua como los de Cuitzeo, Chapala, Pátzcuaro y otros, que confirman la reducción del nivel de las aguas, situación observada en todos los cuerpos de agua del país con una tendencia a desaparecer.

A su vez, la zona se ubica dentro de la cuenca 12 G “Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Laguna de Yuriria”, que comprende una superficie de 4,269.59 Km² en Michoacán y dentro de la subcuenca 12 GA “Lago de Pátzcuaro”. Actualmente, el lago de Cuitzeo y la laguna de Yuriria se intercomunican por medio de canales que, finalmente, desembocan en el río Lerma. Sin embargo, no deja de considerarse que el origen de su formación es debido a su estructura de cuencas cerradas, modificada por la apertura de dichos canales. Además de los lagos antes mencionados, en esta zona hay almacenamientos como el de Cointzio que surte de agua potable a la ciudad de Morelia. Estos contienen grandes volúmenes de agua que no son contemplados en el reporte de cantidades escurridas, dan un gasto de 1.851 m³*s⁻¹ y un 0.50 % del total escurrido en la entidad; por ello, no se refleja ni la realidad ni la importancia de esta zona. El patrón de drenaje de esta área no se encuentra integrado porque algunas veces los escurrimientos son canalizados, o bien, se infiltran en el terreno. Sin embargo, se puede considerar que tiene un drenaje radial centrípeto, ya que la mayoría de las corrientes convergen hacia las depresiones lagunares; sin embargo, pero en raras ocasiones se llega a observar un drenaje dendrítico indefinido y poco denso, así como un drenaje radial centrífugo.

Se denomina unidades de escurrimiento a aquellas áreas en las que el escurrimiento tiende a ser uniforme dadas las propiedades físicas de las rocas y de los suelos, además de su cubierta vegetal y la precipitación media. La combinación de estos factores da por resultado un coeficiente de escurrimiento, que equivale al porcentaje de agua precipitada que escurre superficialmente, y en un momento dado puede servir como indicativo para la determinación de puntos estratégicos para la captación de éstos. La región hidrológica No. 12 presenta una gran uniformidad de escurrimiento, que está dada, por la predominancia del parámetro cuatro, que corresponde a una lámina media de 100 a 200 mm.

7.6 Vegetación y uso de suelo

En la comunidad de Atécuaro las principales actividades productivas son: el aprovechamiento forestal 32 %, agricultura básica 25 %, y pastoreo 14 %, lo que implica un cambio de uso de suelo, la ganadería extensiva y la migración temporal dentro del País (Cabrera, 2000). También, se realizan otras actividades en menor escala como la piscicultura. Aproximadamente, el 15 % de las superficies son áreas erosionadas y el 13 % es vegetación arbustiva, lo que supone la pérdida de las áreas forestales (Mas Porras, 1997). La extracción de madera no se ha podido cuantificar debido a las actividades ilegales (Amador, 1997). Los principales usos del bosque son la extracción de madera de construcción, y leña para uso doméstico. La falta de recursos económicos y problemas de organización, han provocado que los recursos forestales hayan estado sujetos a un aprovechamiento no controlado.

Actualmente, en la región queda muy poco de la vegetación natural, donde se distinguen algunos manchones de vegetación como el bosque de encino – pino, manchones de pastizal, y algunas áreas suburbanas de pinos, (Figs. 11 y 12).

Bosque de encino, comunidad de entre 3 y 4 m de altura, con especies como *Quercus castanea*, y *Q. obtusa*. Dentro del estrato arbóreo son comunes *Acacia farnesiana*, *Cadalia aff. mexicana*; en el estrato herbáceo se identifica *Asclepias linaria*, *Crotón sp.* *Crotalia aff. rutundi dolio*. En la transición al pinar son comunes *Quercus rugosa*, *Q. crassipes* y *Q. candicans*; los pinos dominantes son *Pinus leiophylla*, *P. pseudostrobus*, *P. montezumae* y *P. michoacana*, que se distribuyen alrededor del Valle de Morelia.

El bosque de pino presenta una altura variable entre los 10 y 20 m. Los elementos más comunes son *Pinus pseudostrobus*, *P. leiophylla*, *P. lawsonii*, *P. michoacana*, y *P. montezumae*, que pueden estar acompañados por especies de *Quercus* en el estrato arbóreo; mientras que, en el estrato arbustivo algunas especies de *Eupatorium*, *Callindra*, *Senecio*; y en el herbáceo, algunos elementos de los géneros *Bouvardia*, *Castilleja*, *Geranium*, *Muhlebergia*, *Stevia*, *Ganaphalium* y *Lobelia*.

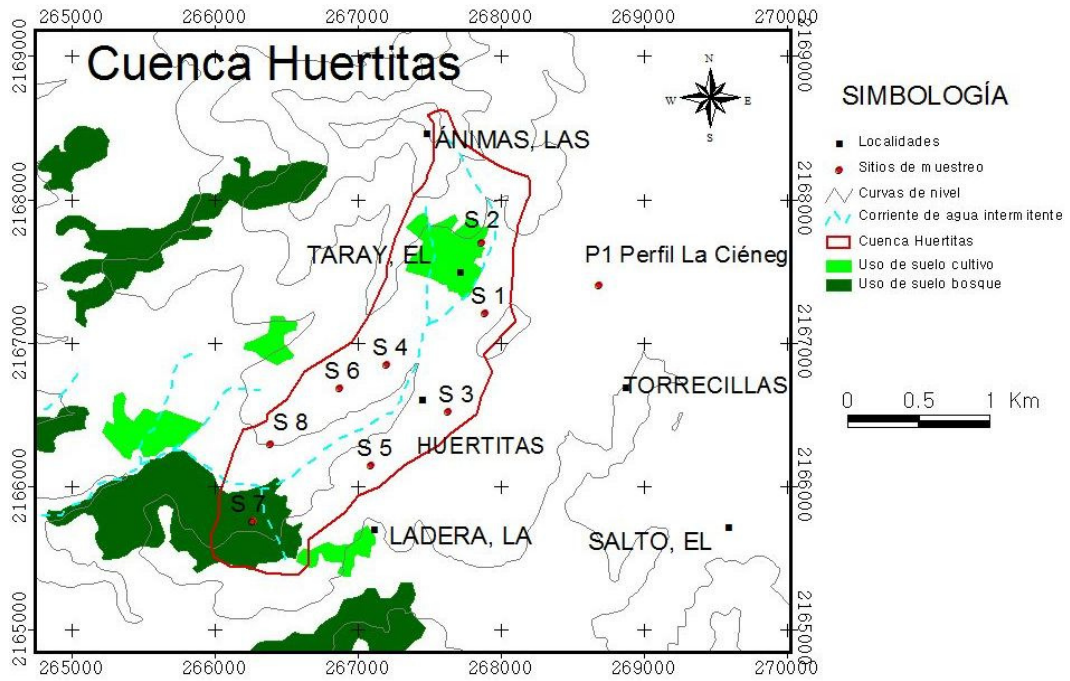


Figura 11. Uso del suelo. Cuenca Huertitas.

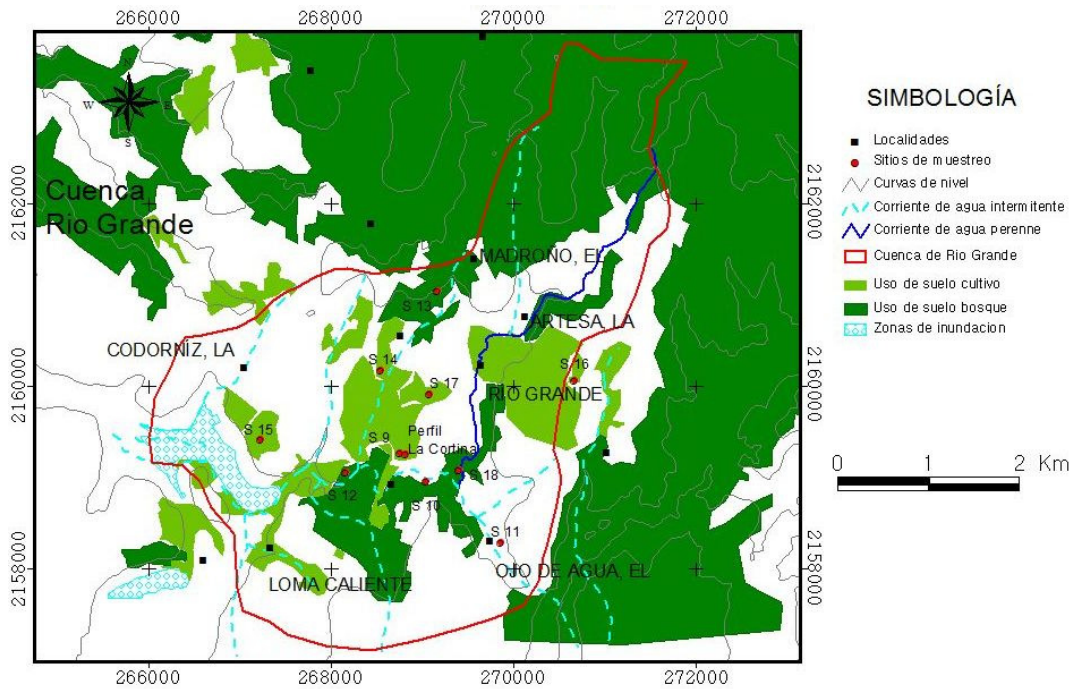


Figura 12. Uso del suelo. Cuenca Río Grande.

VIII. METODOLOGIA

8.1 Muestreo

Se llevaron a cabo actividades de reconocimiento del área de estudio a través de cartografía editada por INEGI, se determinó el número y la distribución más adecuada de los puntos de muestreo, tratando de que fueran lo más representativo de la zona a estudiar, y buscando obtener información cualitativa y cuantitativa de las propiedades físicas del suelo en cada punto, llevando el nivel de representatividad a la escala del área de estudio, y así poder hacer comparaciones entre las dos cuencas.

El muestreo representativo juega un papel muy importante en la calidad y utilidad de los datos analíticos, pues debe tener altos niveles de precisión y exactitud, que proporcione confiabilidad en las características del sitio, además de que los resultados sean reproducibles. La exactitud se refiere a la aproximación del valor del análisis de suelo con respecto al contenido real en campo, y la precisión describe la posibilidad de reproducir los resultados. Ambos parámetros están determinados por el número de muestras tomadas en campo. A medida que se incrementa el número de muestras, aumenta la exactitud y la precisión (Mason, 1992).

La investigación se realizó en cuatro etapas: recopilación de información de la zona de estudio, trabajo de campo, análisis de laboratorio y descripción e interpretación de resultados. En el trabajo de campo se efectuó una salida por cada cuenca a estudiar, el número de puntos de muestreo se determinó de acuerdo al tamaño y forma de cada cuenca. En primer lugar se visitó la cuenca Huertitas en donde se decidió muestrear en 8 sitios, en la cuenca de Río Grande se eligieron 10 sitios. Las muestras en cada sitio se tomaron a una profundidad de 0-30 cm. La localización de cada sitio de muestreo fue registrada por un sistema de posicionamiento global (GPS).

En las figuras 13 y 14 se muestra la ubicación de dos perfiles de suelo representativos de cada cuenca, el perfil La Ciénega (P1) localizado en la cuenca de Huertitas, y el perfil La Cortina de la cuenca de Río Grande, así como los 18 sitios de muestreo.

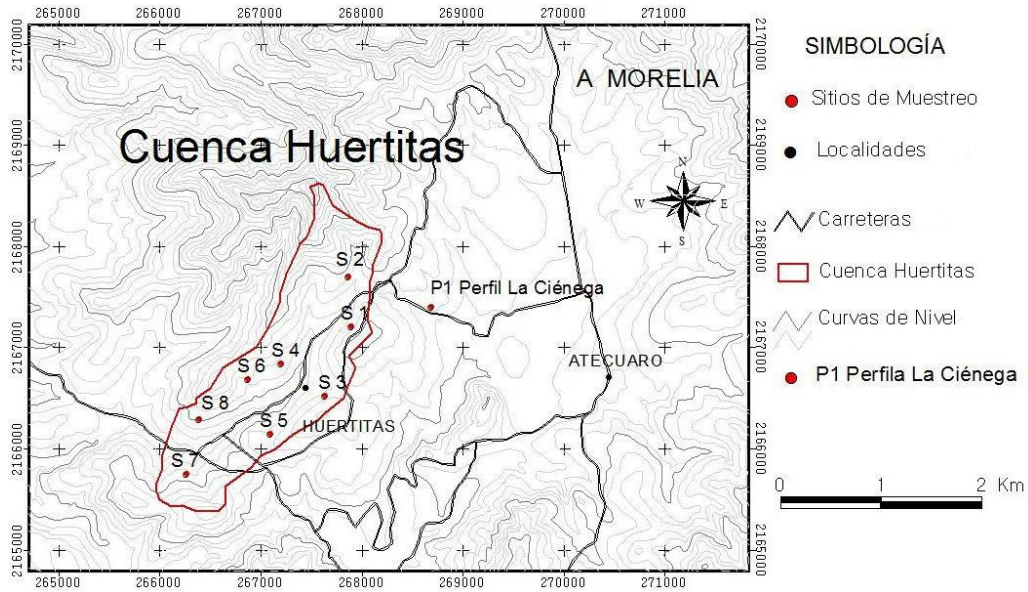


Figura 13. Localización de los sitios de muestreo. Cuenca Huertitas.

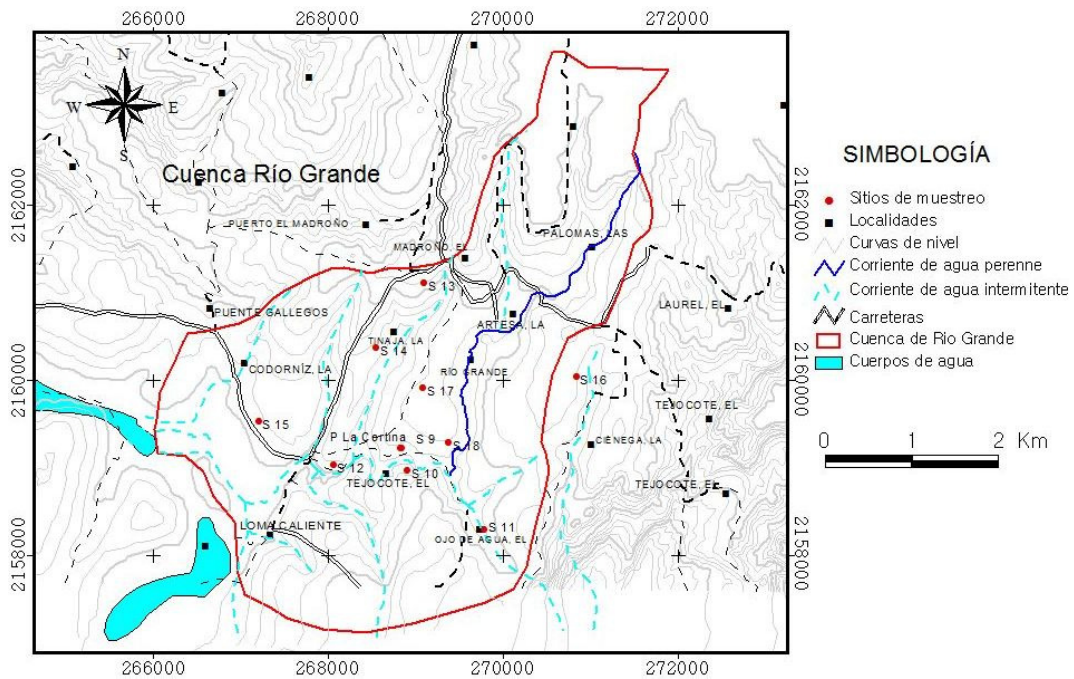


Figura 14. Localización de los sitios de muestreo. Cuenca Río Grande.

La toma de muestras se llevó a cabo en cada horizonte de los dos perfiles, La Ciénega y La Cortina, para su análisis mineralógico, y recolección de muestras inalteradas en bloques orientados de acuerdo a su posición en el perfil y protegidas con papel aluminio para la elaboración de secciones delgadas; en los sitios se tomaron núcleos de volumen conocido por medio de un muestreador tipo Uhland, identificados por número. Se tomó el peso del núcleo con suelo en campo. Estos núcleos se utilizaron para la determinación de densidad aparente, conductividad hidráulica y curvas de retención de humedad. También se tomaron

aproximadamente 2 Kg de muestra de suelo para textura, distribución del tamaño de partículas, densidad real, microagregados y separación de la fracción arcilla. Se llevaron a cabo pruebas en campo de resistencia mecánica utilizando penetrómetro de cono, en cada punto de la cuenca Río Grande; complementando lo anterior, se hizo una descripción de las características físicas del sitio.

En las tablas 1 y 2 se indican los usos de suelo de cada uno de los sitios en donde se tomaron muestras.

Tabla 1. Usos del suelo de la cuenca Huertitas.			
Sitio	Coordenadas (ITRF92)		Uso del suelo
	x	y	
P1	268663	2167563	Parcela de cultivo en descanso, no cultivada
1	267867	2167408	Pastos, arbustos, vegetación secundaria
2	267843	2167516	Parcela de cultivo en descanso, no cultivada
3	267608	2166723	Pastos, arbustos, vegetación secundaria
4	267245	2166847	Pastos, arbustos, vegetación secundaria
5	267069	2166348	Pastos, arbustos, vegetación secundaria
6	266846	2166425	Pastos, arbustos, vegetación secundaria
7	266242	2165956	Manchón de Bosque, capa de humus de 5 cm
8	266362	2166096	Pastos, arbustos, vegetación secundaria

Tabla 2. Usos del suelo de la cuenca de Río Grande.			
Sitio	Coordenadas (ITRF92)		Uso del suelo
	x	y	
P2	268831	2159223	Parcela de cultivo de maíz en descanso
9	268807	2159247	Parcela de cultivo de maíz en descanso
10	268966	2159024	Pastos, arbustos, vegetación secundaria
11	269753	2158429	Pastos, arbustos, vegetación secundaria
12	269707	2159043	Bosque, vegetación original
13	269244	2161201	Bosque, vegetación original
14	268520	2160369	Cultivo en descanso
15	267172	2159468	Cultivo de maíz en descanso
16	270807	2160232	Cultivo en descanso, a un costado de plantación de aguacate
17	269053	2160115	Cultivo de maíz en descanso
18	269424	2159127	Bosque

8.2 Descripción de los análisis físicos

Es conveniente recordar que los sistemas de flujo de los suelos están condicionados por un patrón natural que define a éstos como medios esencialmente heterogéneos y anisótropos. En la práctica llegar a medir este patrón natural es muy difícil, por no decir que muchas veces resulta prácticamente imposible.

Por lo tanto, parámetros físicos tales como la densidad aparente, humedad gravimétrica, resistencia mecánica, textura, etc., considerados aisladamente para el diagnóstico del suelo, no

resultan suficientes cuando se desea determinar su potencialidad físico-funcional. Pero éstos, junto con otros parámetros dependientes como la porosidad total, porosidad de aireación o efectiva, y la conductividad hidráulica, en un análisis integrado, resultan más convenientes para estudiar y explicar los procesos físicos en el perfil del suelo.

En los siguientes apartados se da una descripción de la aplicación y procedimiento de cada análisis llevado a cabo en cada muestra, que nos permitirá conocer las propiedades físicas de los suelos.

8.2.1 Textura y distribución del tamaño de partículas

La textura y distribución del tamaño de partículas se determinó a través del método de la pipeta. Esta técnica ha sido adaptada de Day (1965). Consiste, básicamente, en la determinación de la densidad de partículas en suspensión a profundidades fijas en función del tiempo. Para obtener buenos resultados y minimizar errores, las partículas analizadas deben estar independientes unas de otras (no deben de existir agregados de partículas), por lo tanto, se requiere de un tratamiento de dispersión previo al análisis granulométrico.

El procedimiento general consiste en los siguientes pasos. Disponer de 10 g de suelo seco y tamizado con malla 10 (2 mm de abertura). Realizar los pretratamientos para destruir agentes cementantes: remoción de carbonatos y sales solubles, remoción de materia orgánica y remoción de óxidos de hierro. Separar la fracción arena con lavados de agua destilada y a través de un tamiz de malla 270 (53 μm). Determinar la fracción limo y arcilla por pipeta.

8.2.2 Densidad aparente, densidad real y porosidad

La determinación de la densidad aparente (ρ_b) fue a través del método del núcleo de volumen conocido (Carter, 1993). La densidad real (ρ_s) se obtuvo por el método del picnómetro (Blake, 1986).

Dado que ρ_b representa la relación de la masa de suelo seco al volumen combinado de sólidos y poros, la relación ρ_b / ρ_s dará la fracción en volumen ocupada por los sólidos. La fracción ocupada por el espacio poroso (St) es, por lo tanto, calculada como sigue:

$$St = 1 - (\rho_b / \rho_s)$$

Los resultados para St se pueden expresar como una fracción en volumen o en porcentaje.

8.2.3 Curvas de retención de humedad

Los datos para la elaboración de las curvas características de retención de humedad se obtuvieron usando membranas de porcelana por el método de extracción con olla de presión (Klute, 1986). Cabe mencionar que para la cuenca Río Grande se utilizaron muestras de suelo no alterado colocadas en núcleos de acero inoxidable de 3 cm de alto y 5 cm de diámetro, mientras que, en la cuenca Huertitas se utilizó suelo molido y homogeneizado.

8.2.4 Conductividad hidráulica

El procedimiento llevado a cabo se basó en el método de flujo constante (Klute y Dirksen, 1986). El principio para mediciones de conductividad hidráulica en suelos saturados en laboratorio, se basa en la aplicación de la Ley de Darcy para una columna de suelo saturado en un área uniforme conocida. Una diferencia de flujo hidráulico se lleva a cabo en la columna, y el flujo resultante de agua es calculado. La conductividad está dada por:

$$K_s = V L / [A t (H_2 - H_1)]$$

En donde V es el volumen de agua que atravesó el área A en un tiempo t, y $(H_2 - H_1)$ es la diferencia de flujo hidráulico que atraviesa una longitud L.

8.2.5 Resistencia mecánica

La compactación es definida por Marshall y Holmes (1988), como el proceso por el cual un suelo no saturado es comprimido por una carga aplicada durante un lapso breve sin expulsión de agua. La resistencia a la penetración se determinó en campo, únicamente para los sitios de la cuenca Río Grande, se utilizando un penetrómetro de ultrasonido de la marca RIMIK CP20.

8.2.6 Estabilidad de agregados

La determinación de la estabilidad de agregados depende de las técnicas empleadas y los aparatos seleccionados. En el presente estudio, se utilizó el Wet Sieving Apparatus, el cual ha sido diseñado especialmente para probar la estabilidad de agregados de manera rutinaria. Su diseño permite correr una gran cantidad de muestras en 8 tamices (con 2 repeticiones), usando muy poco reactivo y suelo. Sin embargo, tiene la desventaja de que para cada fracción de agregado cuantificada, se parte de una muestra de suelo distinta que puede no representar el fenómeno de desagregación completo al no poder recuperar las fracciones inferiores. Por otro lado, se disminuye la cantidad de muestra por lo que se puede aumentar la incertidumbre.

8.3 Contenido de material orgánico

Se determinó la materia orgánica fácilmente oxidable por titulación con FeSO_4 . El cálculo se reporta como porcentaje de carbono en peso de la fracción menor a la malla de 75 micras. El método utilizado fue el de Walkley y Black (1935).

8.4 Micro-morfología

Las muestras para secciones delgadas, fueron impregnadas con resina cristal MC-40 y una vez secas, se montaron y pulieron a fin de tener las preparaciones con el espesor requerido de 30 micras y observadas bajo el microscopio óptico marca Olympus.

8.5 Mineralogía de la fracción arcilla

Se procedió a realizar los tratamientos a las muestras de cada horizonte para la separación y limpieza de la fracción arcilla. Una vez obtenidas las fracciones de arcillas limpias se realizaron los análisis de Difracción de Rayos X, en el Laboratorio de Difracción de Rayos X, en el Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología. Los difractogramas se obtuvieron en un difractómetro Philips Mod. 1130/96 y PW 1050/25 (goniómetro) con registro digital de los datos, utilizando radiación $\text{Cu K}\alpha$.

8.6 Análisis estadístico

Con el Software STATGRAPHICS Plus 5.1 se realizó un análisis estadístico a los resultados obtenidos de ambas cuencas, el cual consistió en un análisis de varianza simple (ANOVA), análisis de comparaciones múltiples, análisis de regresión lineal y análisis de correlación, cuyos resultados de las correlaciones entre las variables determinadas se presenta en el siguiente capítulo.

IX. RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados de los diferentes análisis, se procedió a ordenarlos, para presentarlos en forma gráfica y poder realizar una interpretación de los mismos.

9.1 Descripción de los perfiles

Entre los resultados se tiene la información de dos perfiles de suelo: el Perfil La Cortina, y el Perfil La Ciénega, estudiados como parte del proyecto REVOLSO. Las tablas 3 y 4 muestran una breve descripción de ambos perfiles. En el Anexo 1 se presentan los resultados de los análisis de varias propiedades de los dos perfiles.

Tabla 3. Perfil La Cortina. Cuenca de Río Grande.



Ap (0-15) horizonte cultivado; seco: 7.5YR4/4, húmedo: 7.5YR2.5/3; no compactado; franco; muy frágil; sin gravas; raíces densas (20%); transición clara (<1cm) y ondulada (5cm).

A (15-30) horizonte cultivado; seco: 7.5YR4/4, húmedo: 7.5YR2.5/3; franco arcilloso; estructura subangular; muy frágil; pocas raíces delgadas (0.5 mm); pedazos de carbón; transición clara (>0.5cm) y ondulada (10cm).

Bw (40-70) horizonte de alteración; seco: 7.5YR4/6, húmedo: 7.5YR3/4; franco arcilloso; estructura subangular; compacto; frágil; algunas raíces (15%) delgadas (0.5mm); límite claro de transición ondulada.

Bw/Bt1 (70-80) h de transición

Bt1 (80-100) horizonte de acumulación; seco: 5YR4/6, húmedo: 2.5YR3/4; arcilloso; estructura subangular; muy compacto; frágil; canales cubiertos por delgados cutanes; presencia de krotovinas; límite de transición ondulada.

Bt2 (100-120) horizonte de acumulación árido; seco: 5YR3/6, húmedo: 2.5YR3/4; rojo intenso; estructura subangular; compacto; frágil; presencia de arenas y gravas de andesita (0.5-2cm); límite de transición ondulada.

C (>150) Material parental intemperizado, estructura masiva.

Tabla 4. Perfil La Ciénega. Cuenca Huertitas.



Ap (0-10) horizonte cultivado no compactado; seco: 5YR4/6, húmedo: 5YR3/4; raíces muy delgadas; límite subhorizontal; clara transición (<1 mm).

A (10-30) horizonte cultivado compactado; seco: 5YR4/6, húmedo: 5YR3/4; límite de transición ondulada; porción de raíces muy finas (1mm); frágil; muy pocas gravas pequeñas.

Bw (40-70) horizonte de alteración; seco: 2.5YR3/6, húmedo: 2.5YR3/3; compacto; no frágil; pequeñas gravas (1cm); límite de transición ondulada.

Bt1 (70-80) horizonte de acumulación; 2.5YR3/6, húmedo: 2.5YR3/3; estructura prismática con una subestructura angular poliédrica; muy compacto; no frágil; límite de transición ondulada.

Bt2 (100-120) horizonte de acumulación; seco: 2.5YR3/6, húmedo: 2.5YR3/3; estructura columnar prismática; compacto; no frágil; pocas gravas (1cm); límite de transición ondulada.

C (>120) Material parental intemperizado

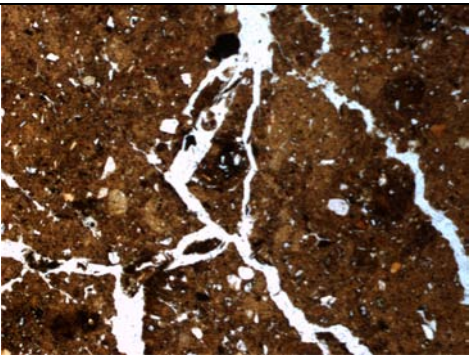
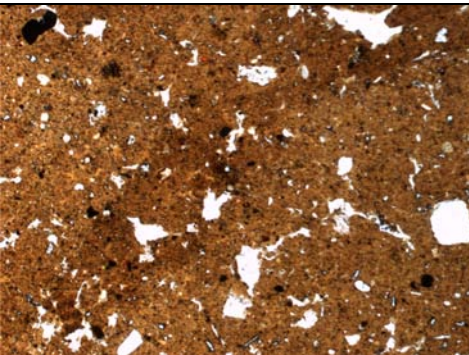
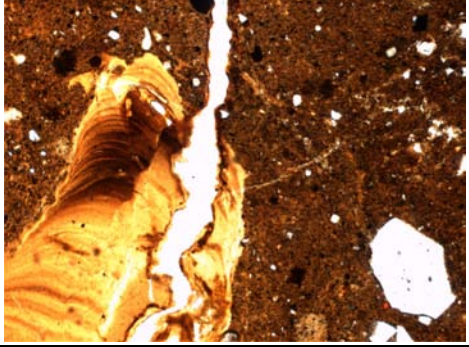
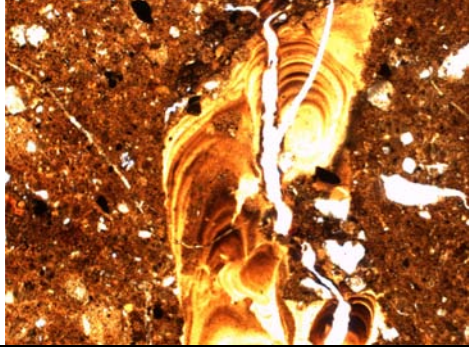
9.2 Micro-morfología

La observación al microscopio de láminas delgadas se utilizó como un método indirecto para caracterizar la estructura del suelo, teniendo en cuenta que se trata de algo cualitativo y en función de los objetivos del estudio, que tienen que ver con la porosidad total, así como con la forma de los poros en el suelo y su arreglo por tamaños.

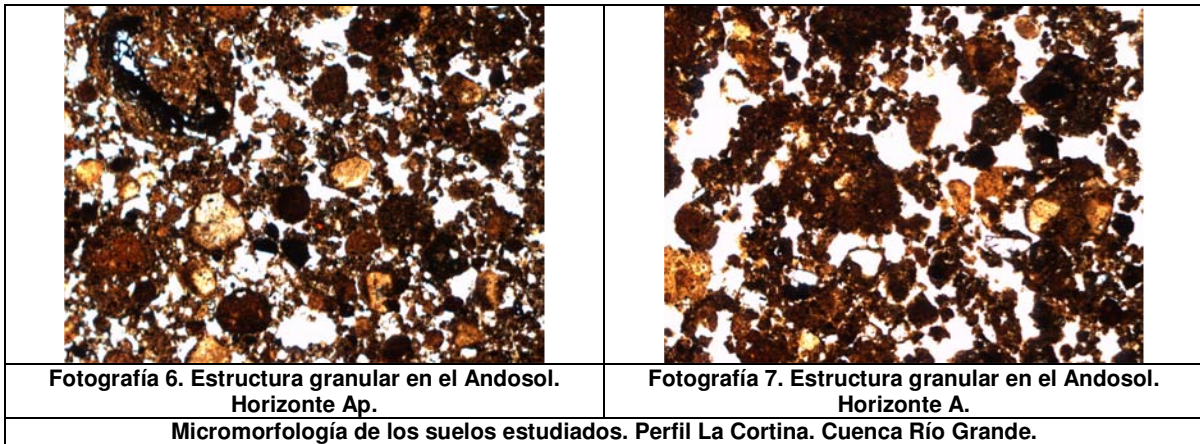
La estructura específica del suelo puede ser caracterizada cualitativamente al especificar las formas típicas de los agregados encontrados en los horizontes del perfil, o cuantitativamente al medir sus tamaños. Además, a partir de la observación micromorfológica se pueden deducir los procesos que han tenido lugar durante la formación del suelo (Fitzpatrick, 1990).

Las fotografías 2 y 3 corresponden a los horizontes Ap y A del perfil La Ciénega (Acrisol), respectivamente, se observa un arreglo de matriz extremadamente arcillosa de forma muy compacta, se aprecia una estructura masiva sin agregados, ausencia de un espacio poroso, más bien se observan poros discretos y aislados no interconectados, predomina la presencia de grietas y fisuras con un ancho de entre 40 y 60 μm ; en los horizontes Bt (fotografías 4 y 5) están presentes cutanes de iluviación de arcilla, algunos fragmentados por actividad biológica, los cutanes están relleno los poros, con estas características el agua sólo puede circular a través de las fisuras y grietas formadas en los horizontes, además se observan restos de

cristales de plagioclasas. La forma de los poros en los horizontes A superficiales no tienen una forma definida, su tamaño varía desde 20 a 50 μm , se observa una mínima cantidad de poros y se encuentran aislados, distribuidos en mayor cantidad en los horizontes superiores.

	
<p>Fotografía 2. Fracturas en los horizontes superiores del Acrisol. Horizonte Ap.</p>	<p>Fotografía 3. Matriz arcillosa en el Acrisol. Horizonte A.</p>
	
<p>Fotografía 4 Cutanes de arcilla en el Acrisol. Horizonte Bt1.</p>	<p>Fotografía 5. Cutanes de arcilla en el Acrisol. Horizonte Bt1.</p>
<p>Micromorfología de los suelos estudiados. Perfil La Ciénega. Cuenca Huertitas.</p>	

En el perfil La Cortina, los horizontes superiores A y Ap (fotografías 6 y 7) presentan una microestructura granular, con agregados en forma semicircular no concordantes que ocurren solos o en clusters, un sistema poroso abundante bien formado entre y alrededor de los agregados, con poros en varios tamaños y conectados entre sí. En la transición entre horizontes Bw y Bt hay mezcla de material granular de Bw y de material arcilloso de Bt. En las mismas fotografías se puede apreciar a los agregados con una forma esférica subredondeada. En los horizontes superficiales, la forma de los poros es redondeada a subredondeada, se observa una distribución inter e intragranular entre los agregados del suelo, distribuidos de manera abundante en los horizontes del perfil, de varios tamaños que van de 100 a 150 μm , conectados entre sí y de forma continua a profundidad entre los horizontes.



El tamaño de los poros no sólo incide sobre la cantidad de agua que puede retener el suelo, sino que regula la energía con que la misma está retenida, el movimiento hacia la planta, hacia la atmósfera y hacia otras zonas del suelo; procesos todos regulados por diferencias de estados de energía, en la tabla 5 se da una descripción de las funciones de los tipos de poros.

Tipo	Tamaño (micras)	Tensión (atm)	Función
Macroporos	> 60	0.05	Aireación; Infiltración; Conductividad Saturada
Mesoporos	60 – 10	0.05 -- 0.33	Conducción lenta
Microporos	10 – 0,2	0.33 – 15	Almacenaje
Microporos	< 0,2	< 15	Agua no disponible

Fuente: Hamblin, 1985.

9.3 Mineralogía de la fracción arcilla

En las tablas 6 y 7 se presentan los resultados de los análisis obtenidos por difracción de rayos X, realizados para las muestras de cada horizonte que corresponden a los Perfiles La Cortina y La Ciénega.

Horiz. (Prof. cm)	Fases identificadas	Observaciones
Ap (0-15)	Halloisita	Aparece gibsita, cuarzo y material amorfo
A (15-30)	Halloisita	Aparece gibsita, cristobalita, posibles trazas de cuarzo y material amorfo
Bw (40-70)	Halloisita	Aparece gibsita, posibles trazas de cristobalita, cuarzo y material amorfo
Bt (80-100)	Halloisita	Aparece gibsita, cristobalita y cuarzo. Disminuye ligeramente la cantidad de material amorfo
C (>150)	Cambio importante de arcilla muy pura. kaolinita	Cambio importante. Arcilla muy cristalina y pura, desaparece la gibsita. Trazas muy pequeñas de cristobalita

Tabla 7. Horizontes del Perfil La Ciénega, cuenca Huertitas.		
Horiz. (Prof. cm)	Fases identificadas	Observaciones
Ap (0-10)	Kaolinita muy pura	Trazas de cuarzo y cristobalita
A (15-25)	Kaolinita muy pura	Cristobalita. Trazas de cuarzo
Bw (40-50)	Kaolinita	Aparece la gibsita. Trazas de cristobalita
Bt2 (110-120)	Kaolinita	Aparece la gibsita. Trazas de cuarzo
C (>180)	Kaolinita	Desaparece la gibsita. Trazas mínimas de cuarzo

En el Perfil La Cortina en todos los horizontes excepto el C, aparecen minerales del grupo de la kaolinita, especialmente halloisita, con trazas de gibsita, cristobalita, cuarzo y material amorfo. El cambio importante de fase mineral ocurre en el horizonte C donde aparece la kaolinita como fase principal y que predomina en todos los horizontes del Perfil La Ciénega, observando también en este último perfil trazas de cuarzo, cristobalita y gibsita. El cuarzo como uno de los minerales más abundantes y resistentes al ataque químico le confiere al suelo buena parte de su porosidad, debido a que suele estar en forma de granos más o menos gruesos, lo que permite el desarrollo de la porosidad intergranular. La presencia de kaolinita indica que se trata de un mineral que ha tenido una alteración durante mucho más tiempo para su formación, en comparación con el mineral halloisita, pues se requiere de un mayor tiempo de alteración para su formación. También, indica que el medio en el cual se formó, tiene una buena permeabilidad, es decir un medio húmedo.

Algunas propiedades de las arcillas minerales se dan en las tablas 8 y 9. El espesor promedio de las plaquetas de la illita es alrededor de 50 angstroms (Å), y para kaolinita es de unos pocos de cientos de Å. El área superficial específica para kaolinita es del orden de 10-20 m²*g⁻¹, el cual es bajo entre las arcillas. Aunque las superficies de kaolinita parecen tener una densidad más alta de cargas electrostáticas, por y mayor actividad de arcilla es proporcional a la superficie específica. De acuerdo a esto, la kaolinita es menos activa y la montmorillonita es la más activa de varias arcillas minerales. La arcilla halloisita tiene mayor área superficial y capacidad de intercambio catiónico que la arcilla kaolinita. La gibsita es un mineral rico en aluminio que se acumula en suelos muy meteorizados. Posee hojas compuestas de iones Al⁺³ (entre las capas de iones OH⁻) en coordinación octaédrica; estos minerales se agrupan con los óxidos y se pueden encontrar en forma de Al₂O₃, (AlOH)₃. Los productos de solución o de la solución del suelo son lixiviados dependiendo de las condiciones climáticas y de la permeabilidad del suelo. El resultado es una acumulación de coloides del suelo cuyas composiciones son enriquecidas con aluminio, hierro y magnesio.

Tabla 8. Propiedades de arcillas minerales (valores aproximados).						
Propiedades	Arcilla mineral					
	Halloisita	Kaolinita	Illita	Montmorillonita	Chlorita	Alofano
Diámetro planar (μm)		0.1 – 4	0.1 – 2	0.01 – 1	0.1 – 2	
Espesor de capa básica (Å)		7.2	10	10	14	
Espesor de partícula (Å)		500	50 – 300	10 – 100	100 – 1000	
Superficie específica (m^2g^{-1})	60	10 – 20	80 – 120	700 – 800	80	
Capacidad de intercambio catiónico ($\text{mEq}\cdot 100\text{g}^{-1}$)	10 - 40	3 – 15	15 – 40	80 – 100	20 - 40	40 – 70
Área por carga (Å^2)		25	50	100	50	120

Fuente: Hillel, 1998.

Tabla 9. Propiedades de carga y área superficial específica de arcillas minerales.				
Arcilla mineral	Capacidad de intercambio catiónico ($\text{cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$)	Capacidad de intercambio aniónico ($\text{cmol}\cdot\text{Kg}^{-1}$)	Densidad de carga [$\text{cmol}(+)/\text{m}^2\cdot 10^{-3}$]	Área superficial específica (m^2g^{-1})
Kaolinita	3-15	-	60-75	5-20
Illita	10-40	-	10-20	100-200
Vermiculita	100-150	5-10	30-33	300-500
Esmectita	80-150		11-19	700-800
Alofano	20-30	10-20	-	>600

Fuente: Lal *et al.*, 2004

9.4 Textura y distribución del tamaño de partículas

Las tablas 10 y 11 muestran la clase de textura en cada punto de muestreo, así sus correspondientes porcentajes de cada fracción de partículas.

Tabla 10. Textura. Cuenca Huertitas.				
Sitio	% Are	% Lim	% Arc	Textura
1	8.56	34.31	57.12	Arcilla
2	20.02	37.20	42.76	Arcilla
3	7.08	25.78	67.13	Arcilla
4	9.96	25.45	64.58	Arcilla
5	25.74	30.50	43.74	Arcilla
6	17.74	33.93	48.31	Arcilla
7	22.58	40.12	37.29	Franco arcilloso
8	26.50	32.68	40.80	Arcilla
Media	14.66	35.01	46.53	
Mínimo	7.08	25.45	35.44	
Máximo	25.74	45.75	67.13	
Desv. St.	7.80	5.13	11.31	

Are: Arena; Lim: Limo; Arc: Arcilla;
Desv. St: Desviación Estandar

Tabla 11. Textura. Cuenca Río Grande.				
Sitio	% Are	% Lim	% Arc	Textura
9	35.31	26.05	38.63	Franco Arcilloso
10	31.54	37.73	30.72	Franco Arcilloso
11	28.50	34.13	37.35	Franco Arcilloso
12	34.50	29.35	36.14	Franco Arcilloso
13	34.10	26.46	39.43	Franco Arcilloso
14	33.02	37.66	29.30	Franco Arcilloso
15	28.98	44.11	26.89	Franco
16	26.32	39.00	34.67	Franco Arcilloso
17	23.50	42.46	34.03	Franco Arcilloso
18	25.12	42.97	31.89	Franco Arcilloso
Media	29.78	35.76	33.42	
Mínimo	23.50	26.05	26.89	
Máximo	35.73	44.11	38.63	
Desv. St.	4.23	6.43	3.85	

Are: Arena; Lim: Limo; Arc: Arcilla;
Desv. St: Desviación Estandar

Como se observa en la tabla 10 para la cuenca Huertitas, la textura predominante fue clasificada dentro de la clase de las arcillas, excepto el sitio 7 que fue franco arcilloso. Los valores medios de las fracciones en toda el área muestreada fueron 14.66 % de arena, 35.01

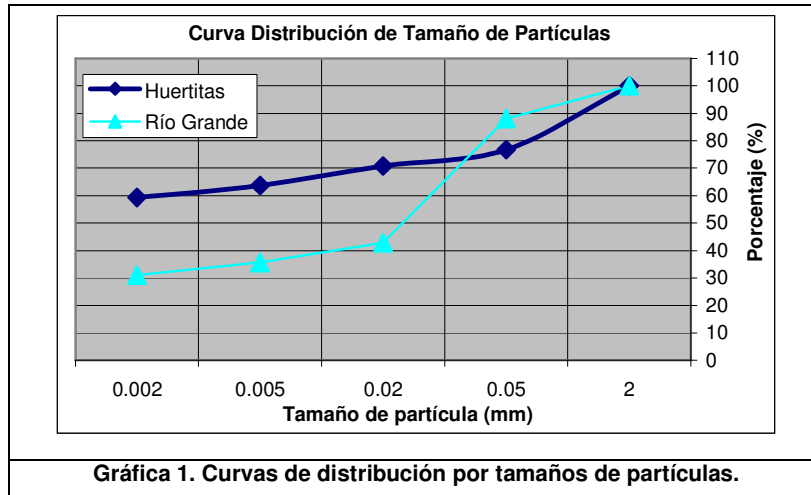
% de limo y 46.53 % de arcilla. El porcentaje de arena osciló entre 7.08 y 25.74 %, el de limo entre 25.45 y 45.75 %, y el de arcilla en un rango de 35.44 y 67.13 %. El mayor porcentaje de arcilla se presenta en los sitios 3 y 4 que tienen un uso de suelo con vegetación secundaria, mientras el menor porcentaje de arcilla lo tiene el sitio 7 que se localiza dentro de un manchón de bosque dentro de la cuenca estudiada.

La presencia de mayores porcentajes de arcillas resulta en un aumento de la capacidad de intercambio catiónico (Tamhane *et al.*, 1978) y un aumento en el porcentaje de materia orgánica (Buckman y Brady, 1985). Los suelos arcillosos tienen mayor área superficial, por lo que poseen facultades elevadas de adsorción y retención de humedad, gases y nutrientes, son de medianos a pobres en drenaje y aireación y son bastante difíciles de manejar con fines de cultivo (Tamhane *et al.*, 1978). Un suelo arcilloso tiende a absorber y retener más agua, y se vuelve plástico y pegajoso cuando está húmedo, así como apisonado y cohesivo cuando está seco, y por lo tanto, difícil de cultivar. Desde el punto de vista de su comportamiento físico se dice que es un suelo pesado.

En la tabla 11 se aprecia que en la cuenca de Río Grande la textura predominante fue clasificada dentro de la clase franco arcilloso, excepto el sitio 15 que fue de textura franca. Los valores medios de las diferentes fracciones en toda el área muestreada fueron: 29.78 % de arena, 35.76 % de limo, y 33.42 % de arcilla. El porcentaje de arena osciló entre 23.50 y 35.73 %, el de limo entre 26.05 y 44.11 %, y el de arcilla en un rango de 26.89 y 38.63 %.

Estos suelos franco arcillosos contienen una mezcla balanceada de partículas gruesas y finas con propiedades intermedias entre arena, limo y arcilla. Su capacidad para retener agua y nutrientes es superior a un suelo arenoso; mientras que, su drenaje, aireación y propiedades de labranza, son más favorables que en un suelo arcilloso.

En la gráfica 1 se presentan las curvas de distribución por tamaño de las partículas en una representación integral o acumulativa para ambas cuencas. Al comparar las gráficas, se observa que en las muestras de Huertitas se tiene mayor porcentaje de partículas en el diámetro menor a 0.002 mm, menor porcentaje de partículas de tamaño limo y mayor porcentaje del tamaño arena, esto da pie a que las partículas más pequeñas se acomoden o rellenen el espacio de los poros que se crea entre las partículas más grandes, formando así lo que se llama un empaquetamiento cerrado. Mientras que, en las muestras de Río Grande predominan las partículas de tamaño del limo, partículas de tamaño más uniforme, originando un empaquetamiento abierto, que da mayor porosidad.



9.5 Densidad aparente, densidad real y porosidad

Las tablas 12 y 13 muestran los valores obtenidos para las densidades aparente y real, así como la porosidad total. Se observan valores muy parecidos para los sitios correspondientes a cada unidad de suelo, para cada una de las tres variables. Los resultados de porosidad claramente están marcados de acuerdo al valor de la densidad aparente, es decir, no se notan cambios apreciables que pudieran estar influenciados de acuerdo al tipo de uso de suelo. En los Acrisoles, los sitios 5 y 6 con valores de porosidades mínima y máxima, están en relación directa con los valores de sus densidades mínima y máxima, respectivamente.

Sitio	Densidad aparente (g*cm ⁻³)	Densidad real (g*cm ⁻³)	Porosidad (%)
1	1.26	2.66	52.76
2	1.31	2.75	52.48
3	1.22	2.72	55.21
4	1.24	2.72	54.49
5	1.21	2.76	56.12
6	1.31	2.64	50.41
7	1.26	2.65	52.36
8	1.21	2.69	54.94
Media	1.25	2.70	53.57
Mínima	1.21	2.64	50.41
Máxima	1.31	2.76	56.12

Sitio	Densidad aparente (g*cm⁻³)	Densidad real (g*cm⁻³)	Porosidad (%)
9	0.85	2.68	68.37
10	0.76	2.71	72.00
11	0.82	2.73	69.88
12	0.80	2.68	70.07
13	0.85	2.81	69.51
14	0.88	2.61	66.12
15	0.83	2.63	68.41
16	0.81	2.59	68.64
17	0.78	2.62	70.00
18	0.88	2.64	66.66
Media	0.82	2.67	68.95
Mínima	0.76	2.59	66.12
Máxima	0.88	2.81	72.00

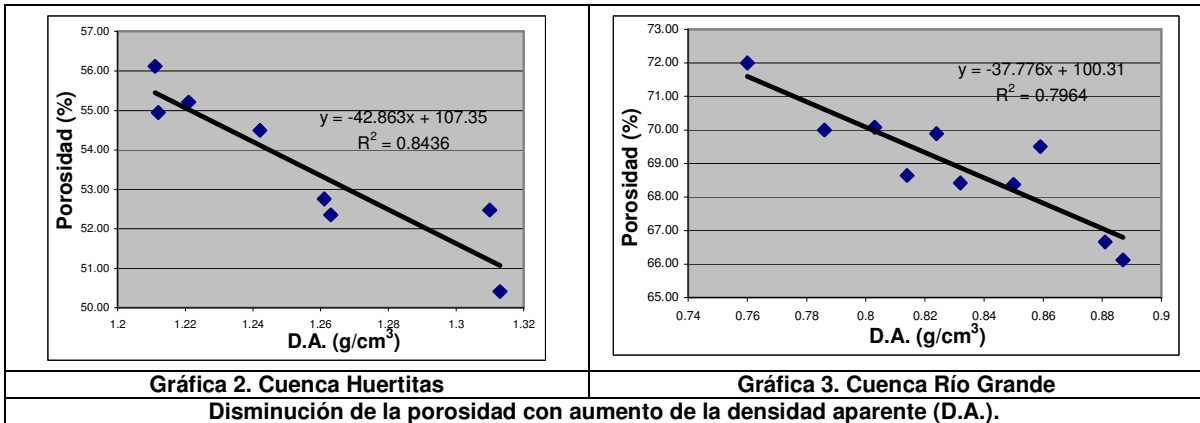
Las densidades aparentes de los suelos de Huertitas son mayores que las de Río Grande, tienen una media de 1.25 g*cm⁻³ y se sitúan entre los valores mínimo y máximo de 1.21 y 1.31 g*cm⁻³, respectivamente; en cuanto a la densidad real, esta variable presenta valores de 2.64 a 2.76 g*cm⁻³ con una media de 2.7 g*cm⁻³; estos suelos presentan un espacio poroso medio de 53 %.

En la cuenca de Río Grande los valores de la densidad aparente de los Andosoles fueron menores a 0.9 g*cm⁻³, se encuentran entre 0.76 a 0.88 g*cm⁻³, estos valores más bajos en comparación con los de la cuenca Huertitas probablemente se deban a la presencia de material amorfo. El valor medio fue de 0.82 g*cm⁻³. Los valores de densidad real van de 2.59 a 2.81 g*cm⁻³, con un valor medio de 2.67 g*cm⁻³. El espacio poroso medio es de 68 %.

De todas las propiedades del suelo, la porosidad es tal vez la más fácil, frecuente y ampliamente alterada por las operaciones de labranza o manejo sin laboreo. En los suelos de la cuenca Río Grande, que posee densidades aparentes más bajas, se espera que la conductividad hidráulica sea mayor que en los Acrisoles.

La densidad aparente ≤ 0.9 g*cm⁻³ en los Andosoles se atribuye al desarrollo de micro-agregados estables con alta porosidad (Shoji *et al.*, 1993) y, de manera parcial, al alto contenido de humus (Shoji *et al.*, 1985) pues la fase sólida ocupa sólo de 20 a 30 % de su volumen.

Las gráficas 2 y 3, muestran la relación entre los valores de densidad aparente y porosidad de los suelos de ambas cuencas, que muestra como la porosidad aumenta al disminuir el valor de la densidad aparente y viceversa.



9.6 Curvas de retención de humedad

Las tablas 14 y 15 muestran los porcentajes de retención de humedad a diferentes tensiones, para los ocho sitios de muestreo de la cuenca Huertitas, y para los sitios de la cuenca de Río Grande a excepción de los puntos 15 y 17 que no se incluyeron en esta parte del muestreo, estos valores de las tablas antes mencionadas se utilizaron para elaborar las curvas de retención de humedad. En todos los sitios de Huertitas los valores de retención de humedad son muy parecidos, con excepción del sitio no. 7, que pertenece a una zona de bosque que muestra valores de capacidad de campo y agua aprovechable por las plantas muy por encima de la media. En los Andosoles de Río Grande el sitio 11 es el que presenta menor cantidad de agua aprovechable y el sitio 13 la mayor.

Tabla 14. Cuenca Huertitas.										
Sitio	Tensión del agua (Atm)									Agua Aprovechable
	15 (PMP)	12	8	4	2	1	0.66	0.33 (CC)	0.1	
1	21.16	24.71	25.48	27.9	28.51	31.6	32.75	35.07	39.93	10.91
2	22.07	19.46	21.44	24.46	25.29	29.34	32.79	33.37	37.16	15.3
3	21.37	25.16	27.68	28.82	29.02	31.51	34	34.56	39.05	10.19
4	22.36	23.82	26.28	27.28	28	29.52	32.77	33.72	35.89	11.36
5	22.02	24.76	25.14	27.19	28.02	31	33.23	33.87	39.17	11.85
6	20.16	21.93	23.73	25.69	26.88	31.07	34.53	35.75	41.04	15.59
7	21.41	28.35	29.43	31.34	34.6	38.24	39.06	43.13	51.29	21.72
8	20.22	20.99	21.31	23.23	26.54	30.59	31.91	36.04	43.04	15.82
Media	21.35	23.50	24.92	26.88	28.25	31.51	33.82	35.58	40.60	13.68
Máximo	22.36	28.35	29.43	31.34	34.6	38.24	39.06	43.13	51.29	21.72
Mínimo	20.16	19.46	21.31	23.23	25.29	29.34	31.91	33.37	35.89	10.19

PMP: Punto de Marchitez Permanente; CC: Capacidad de campo; las unidades están en % en volumen.

Tabla 15. Cuenca Río Grande.										
Sitio	Tensión del agua (Atm)									Agua Aprovechable
	15 (PMP)	12	8	4	2	1	0.66	0.33 (CC)	0.10	
9	31.75	32.01	33.74	40.08	42.17	47.23	50.81	53.35	67.33	21.60
10	26.53	27.22	28.41	39.46	42.44	44.11	47.07	52.22	63.02	25.69
11	33.68	34.02	34.93	40.68	42.92	47.24	51.96	52.79	59.35	19.11
12	28.44	29.13	29.84	41.40	46.38	53.97	55.34	56.41	66.14	27.97
13	21.75	22.06	22.83	35.88	38.29	43.72	47.05	55.82	64.34	34.07
14	37.36	38.02	39.61	44.27	47.32	51.63	57.65	61.42	69.32	24.06
16	34.39	35.10	36.40	43.86	47.41	51.47	56.90	57.49	68.65	23.10
18	30.52	30.89	31.46	40.45	41.79	45.14	46.21	52.07	65.36	21.55
Media	30.18	30.68	31.76	40.68	43.49	47.93	51.44	55.11	65.37	24.28
Máximo	37.36	38.02	39.61	44.27	47.41	53.97	57.65	61.42	69.32	34.07
Mínimo	21.75	22.06	22.83	35.88	38.29	43.72	46.21	52.07	59.35	19.11

PMP: Punto de Marchitez Permanente; CC: Capacidad de campo; las unidades están en % en volumen.

De las tablas 14 y 15 se tomaron los valores medios de humedad gravimétrica que corresponden a la capacidad de campo (0.33 atm), así como los valores de la densidad aparente y porosidad total de las tablas 12 y 13, de ambas cuencas, para calcular la porosidad de aireación de acuerdo a las siguientes formulas:

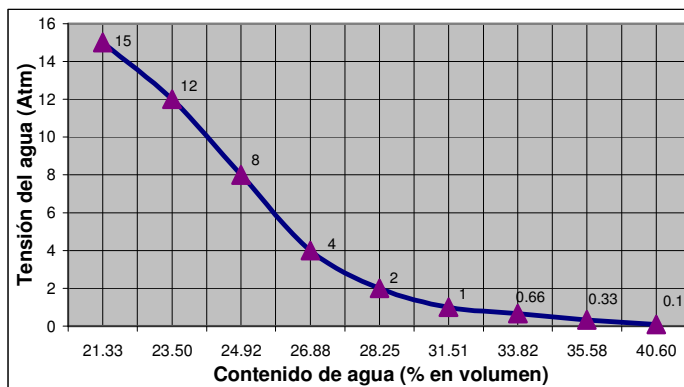
$$\text{Humedad volumétrica} = \text{Humedad gravimétrica} * \text{Densidad aparente}$$

$$\text{Porosidad de aireación} = \text{Porosidad total} - \text{Humedad Volumétrica.}$$

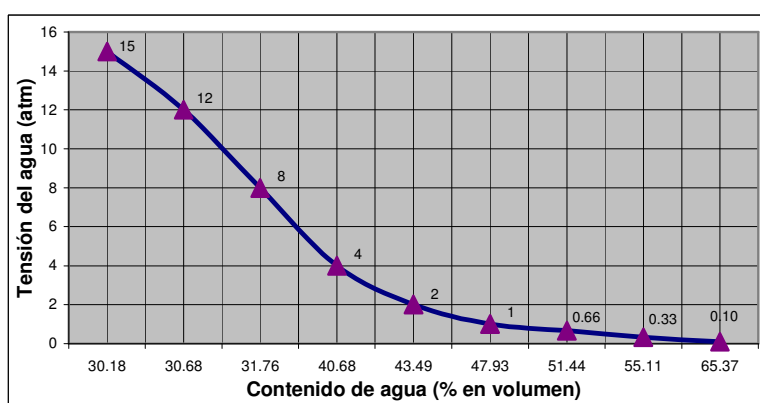
La porosidad de aireación en capacidad de campo, es la porosidad que no retiene agua y por lo tanto da una idea de la proporción de los poros de mayor tamaño. A veces se la denomina porosidad efectiva. Los resultados se presentan en la tabla 16, como se aprecia de acuerdo a la porosidad de aireación los Andosoles son los suelos que cuentan con mayor cantidad de poros de mayor tamaño.

Tabla 16. Porosidad de aireación.					
Cuenca	Humedad gravimétrica (%) en peso)	Densidad aparente (g*cm ⁻³)	Humedad volumétrica (%) en volumen)	Porosidad total (%)	Porosidad de aireación (%)
Huertitas	35.58	1.25	44.47	53.57	9.1
Río Grande	55.11	0.82	45.19	68.95	23.76

De las tablas 14 y 15, con los valores medios se elaboraron las gráficas 4 y 5, que muestra los resultados de la variación de la succión matricial con la humedad.



Gráfica 4. Curva de retención de humedad. Cuenca Huertitas.



Gráfica 5. Curva de retención de humedad. Cuenca Río Grande.

En la curva de la gráfica 4 se aprecian dos regiones que indican el predominio de diferentes mecanismos de retención de agua, el que va de 0.1 a 2 atm y el de 2 a 15 atm. La región de 1 a 2 atm por encima de 28% de humedad presenta bajos cambios de succión con un incremento de 12 % de humedad. La región con humedad inferior a 28 % de 2 a 15 atm presenta mayor tasa de incremento de succión, con una variación baja de humedad de 7 %, posiblemente en esta zona la alta pendiente de la curva sugiere que la distribución de poros cubre un cierto rango de diámetros.

Por otro lado, en la gráfica 5 se observan 2 regiones, la primera de 0.10 a 8 atm con un cambio amplio de humedad de 33 % de humedad, y la segunda región de 8 a 15 atm con un cambio de muy pequeño de 2 % de humedad. Aunque la tendencia de las gráficas es similar, el tamaño de los poros hace que los cambios de porcentajes de humedad sucedan a diferentes intervalos de succión.

La tabla 17 da una comparación entre la textura, los valores medios de la densidad aparente, porosidad y las cantidades de agua disponible para los dos suelos bajo estudio.

	Textura	Densidad aparente (g*cm ⁻³)	Porosidad (%)	Humedad a CC (% en volumen)	Humedad a PPM (% en volumen)	Agua disponible (% en volumen)
Cuenca Huertitas	Arcilla	1.25	53.57	35.58	21.50	13.68
Cuenca Río Grande	Franco arcilloso	0.82	68.9	55.11	30.18	24.28

CC: Capacidad de Campo; PPM: Punto de Marchitez Permanente

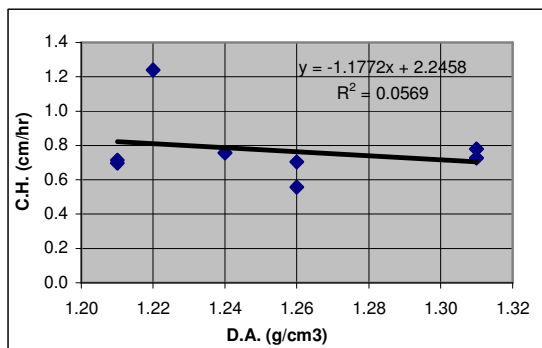
9.7 Conductividad hidráulica

Las tablas 18 y 19 presentan los resultados de conductividad hidráulica de cada sitio de muestreo para ambas unidades de suelos. En la cuenca Huertitas se tienen valores muy similares, una media de 0.75 cm^*h^{-1} , resaltando el sitio 3 con un valor de 1.23 cm^*h^{-1} . En Río Grande se hizo una división de los sitios de acuerdo con el tipo de uso de suelo, observando que las zonas de cultivo tienen una media de 2.88 cm^*h^{-1} , las zonas con vegetación secundaria 3.15 cm^*h^{-1} , y los suelos de bosque muestran los valores más altos de esta variable, con 5.21 cm^*h^{-1} . La conductividad hidráulica es una característica espacialmente variable, pero es constante bajo condiciones de saturación para alguna posición determinada en el campo en un tiempo dado (Moosegar y Warrick, 1986).

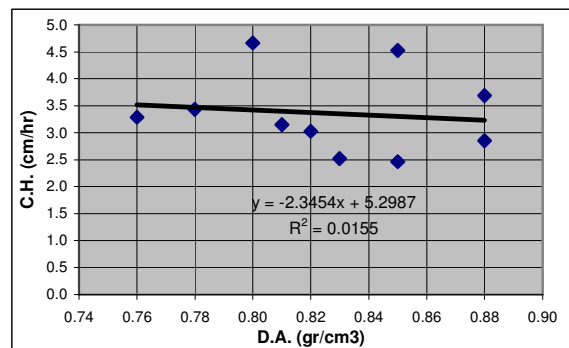
Sitio	(cm*h ⁻¹)	(cm*s ⁻¹)	Clase
1	0.7033	0.000195	Baja
2	0.7269	0.000202	Baja
3	1.2393	0.000344	Baja
4	0.7560	0.000210	Baja
5	0.7132	0.000198	Baja
6	0.7794	0.000216	Baja
7	0.5559	0.000154	Baja
8	0.6968	0.000194	Baja
Media	0.7528	0.000209	
Mínimo	0.5559	0.000154	
Máximo	1.2393	0.000344	

Tabla 19. Conductividad hidráulica. Cuenca Río Grande.			
Sitio	(cm*h ⁻¹)	(cm*s ⁻¹)	Clase
9	2.4625	0.000684	Media baja
10	3.2870	0.000913	Media baja
11	3.0240	0.000840	Media baja
12	4.6667	0.001300	Media baja
13	4.5269	0.001260	Media baja
14	2.8528	0.000792	Media baja
15	2.5200	0.000700	Media baja
16	3.1500	0.000875	Media baja
17	3.4364	0.000955	Media baja
18	3.6878	0.001020	Media baja
Media (Cultivo)	2.8843	8.01E-04	
Media (Veg. Sec.)	3.1555	8.77E-04	
Media (Bosque)	4.8025	1.12E-03	
Mínimo	2.4625	6.84E-04	
Máximo	4.6667	1.30E-03	

Las gráficas 6 y 7 describen la variación de la conductividad hidráulica con el aumento de la densidad aparente para los resultados obtenidos de las muestras de suelo de ambas cuencas estudiadas. Se observa que existe una ligera relación inversa entre la conductividad hidráulica y la densidad aparente. Este comportamiento general, muy posiblemente sea debido a que el aumento de la densidad aparente trae aparejado una disminución en el volumen total de poros del suelo. Pero como se observa también en las gráficas, la tendencia de disminución de la conductividad hidráulica no es significativo, como lo señala el coeficiente de correlación entre ambas variables ($r = -0.24$), debiendo existir otros factores que rigen a la conductividad hidráulica, que pueden incluir a la porosidad total, distribución de tamaños de poros, la estabilidad y continuidad del sistema poroso, la textura y porcentaje de arcilla.



Gráfica 6. Cuenca Huertitas
Variación de la conductividad hidráulica (C.H.) con el aumento de la densidad aparente (D.A.).



Gráfica 7. Cuenca Río Grande
Variación de la conductividad hidráulica (C.H.) con el aumento de la densidad aparente (D.A.).

La porosidad en los Acrisoles, alrededor de 50 % se considera aceptable, sin embargo a nivel superficial existe la formación de costras endurecidas de suelo, ocasionando que el agua no se infiltre ya que el encostramiento impide al agua penetrar, ya que estas costras por no tener

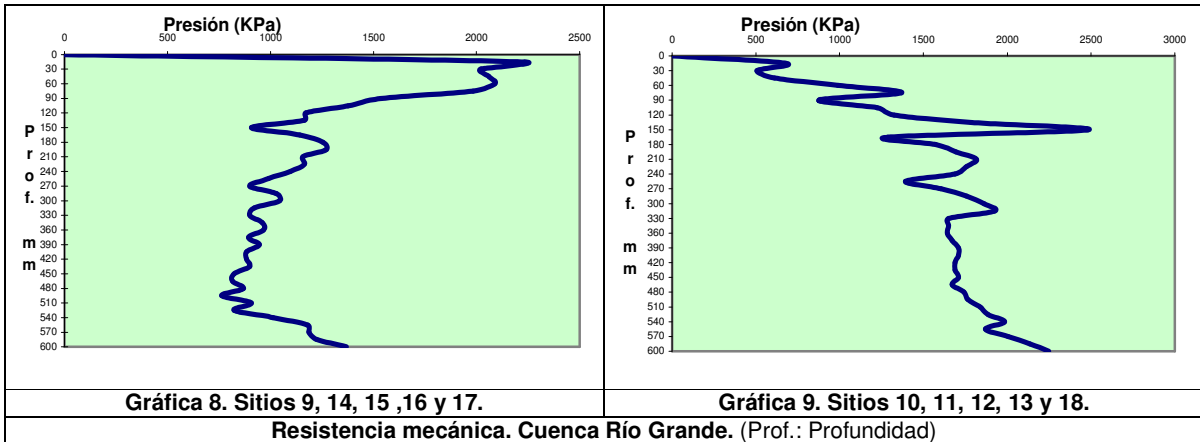
porosidad , se comportan como una capa casi impermeable, esta impermeabilidad de las costras se debe a que es material fino (arcilla, limo) que se ponen en suspensión en el agua durante la lluvia y que después, al secarse, se depositan lentamente, expulsando el aire adentro de las partículas minerales y forman lechos de suelo sin aire ni conductos por donde pueda circular el agua.

9.8 Resistencia mecánica

Como ya se mencionó anteriormente, esta prueba sólo se realizó en la cuenca de Río Grande, ya que en la cuenca Huertitas no fue posible por el estado tan compactado que tenía el suelo, lo que está indicando que estos suelos tienen una densidad aparente alta, un volumen de espacio poroso disminuido, una distribución de tamaño de poros que cambia con la profundidad del suelo a un tamaño de poro más pequeño, y disminución de la continuidad del espacio poroso, lo que resulta en una disminución o impedimento del movimiento de agua y aire a través del suelo, al reducirse el número de poros grandes.

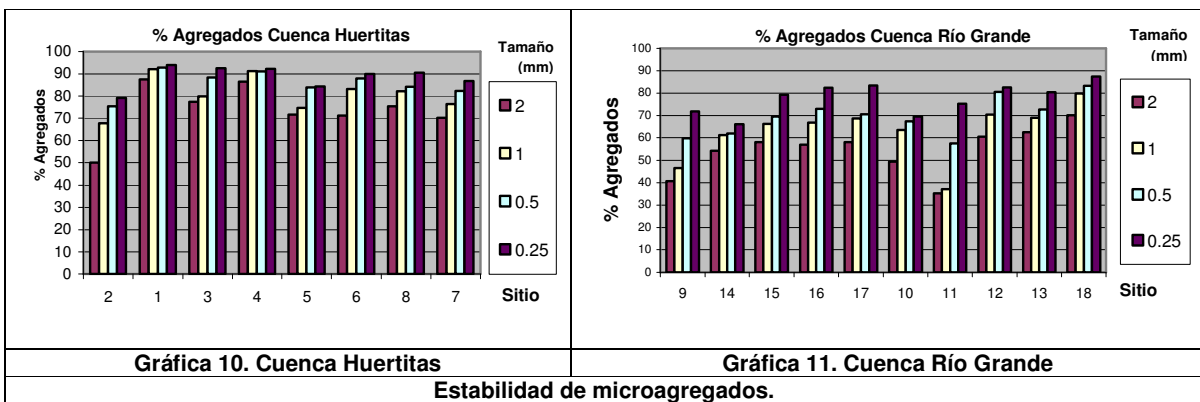
Los resultados son el promedio de la resistencia obtenida a través de las distintas profundidades. Las determinaciones de resistencia a la penetración son dependientes del contenido hídrico edáfico, miden el grado de compactación del suelo, y dan valores más elevados cuanto más seco está el suelo.

Se analizaron las gráficas de los sitios de Río Grande, y se puede decir que hay dos tipos de curvas que siguen patrones muy similares, por un lado se tiene que los sitios 9, 14, 15, 16 y 17 (gráfica 8), con un uso de suelo que corresponden a zonas de cultivo, la resistencia mecánica es alta en los primeros centímetros del suelo, disminuyendo con la profundidad, lo cual puede ser atribuido a la labranza, ya que con el tiempo, los horizontes superficiales de estos suelos se endurecen formándose el llamado pie de arado, es decir, que las prácticas de cultivo tienden a endurecer la superficie del suelo y como no están recién labrados, se observan las consecuencias de esas prácticas de cultivo realizadas durante mucho tiempo. Los sitios 10, 11, 12, 13 y 18 (gráfica 9), muestran que los valores de la resistencia mecánica son bajos en la superficie del suelo y se incrementan con la profundidad del perfil, estos sitios corresponden a zonas de bosque y con vegetación secundaria, la resistencia mecánica de los Andosoles es baja, sin embargo, al ser pisados se compactan y pierden su extraordinaria capacidad de retención de agua; cuando se presenta un sobrepastoreo, se deja al suelo sin protección contra el sol, se seca la parte superficial en forma irreversible y se vuelve extremadamente vulnerable a la erosión hídrica y eólica.

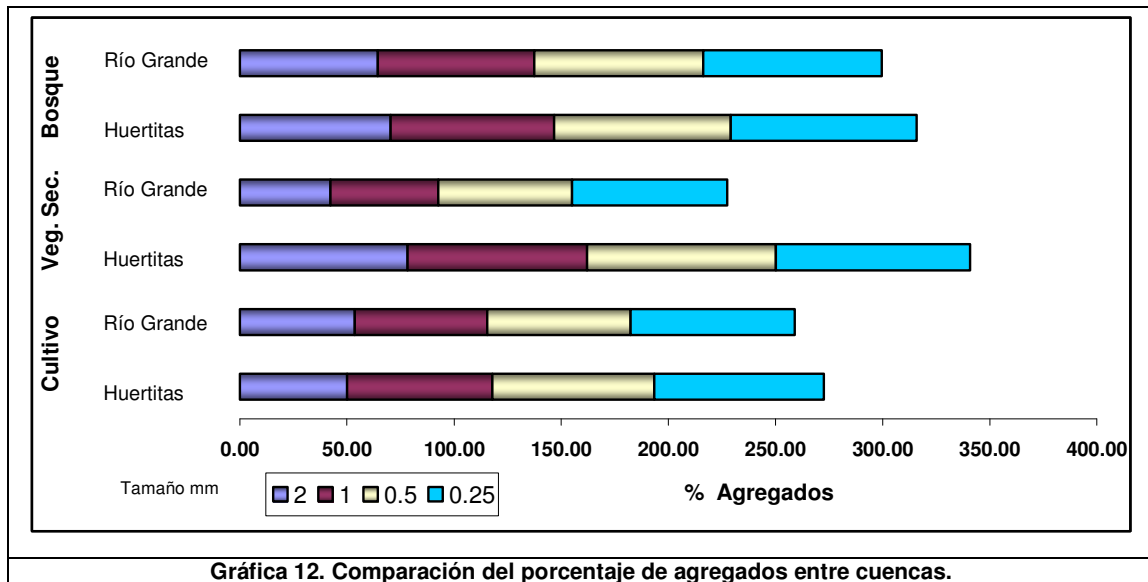


9.9 Estabilidad de agregados

Las gráficas 10 y 11 muestran los porcentajes de estabilidad de micro-agregados en cada uno de los sitios de muestreo analizados. El análisis se realizó para cuatro tamaños diferentes de micro-agregados que son de 2, 1, 0.5 y 0.25 mm. En Huertitas el sitio 2 presenta los menores porcentajes de agregados en los 4 tamaños analizados donde el uso del suelo es de cultivo; en Río Grande, el sitio 18 presenta los mayores porcentajes, teniendo un uso de bosque y los menores porcentajes ocurren en el sitio 11 que corresponde a vegetación secundaria.



De los valores de las gráficas 10 y 11 se obtuvieron los valores medios de acuerdo al tipo de uso de suelo de cada sitio y se elaboró la gráfica 12, para una mejor visualización y comparación de los resultados, la cual muestra una comparación de los valores medios de agregados estables de diferente tamaño, entre ambas cuencas y de acuerdo al uso de suelo.



En Huertitas los mayores porcentajes de agregados en los 4 tamaños se presentan en zonas con vegetación secundaria (arbustos, pastos, etc), y los menores porcentajes en las zonas de cultivo, lo cual confirma que las prácticas de manejo del suelo, con el tiempo, logran deteriorar las propiedades físicas del mismo. Mientras que para la cuenca de Río Grande los porcentajes más altos para los cuatro tamaños ocurren en zonas de bosque y los porcentajes más bajos en zonas con vegetación secundaria que, probablemente, fueron áreas dedicadas al cultivo y, posteriormente, abandonadas. Los sitios cuyos suelos están bajo cultivo tienden a perder sus características físicas originales por el fraccionamiento de los agregados mayores en unidades menores, ya que la estabilidad de los agregados cambia en respuesta a la secuencia de cultivos, tipo de manejo de suelo y niveles de materia orgánica.

El orden de estabilidad propuesto para los diferentes tipos de uso del suelo con relación a los valores observados en la gráfica 12, en los primeros 30 cm de espesor de suelo es el siguiente: Huertitas: vegetación secundaria > bosque > cultivo; en Río Grande: bosque > cultivo > vegetación secundaria.

En general, los mayores porcentajes de agregados se presentan en la cuenca Huertitas para los tres tipos de uso de suelo, esto probablemente debido a los mayores contenidos de arcilla y de hierro. La buena estabilidad de los agregados crea condiciones en superficie para una correcta entrada y circulación de agua y aire (Lal y Stewart, 1994).

En suelos con apreciable contenido de arcillas, en circunstancias favorables, estas partículas tienden a agruparse en unidades estructurales compuestas conocidas como agregados. Tales agregados no son caracterizados por un tamaño fijo ni son necesariamente estables. Un

prerrequisito para la agregación es que la arcilla sea floculada y la presencia de agentes cementantes químicos y las exudaciones y muerte de raíces que promueve la actividad microbiana, resultando en la producción de cementantes húmicos (Metting, 1993). Determinar el estado de agregación del suelo en un momento particular, no es suficiente para generalizar las características estructurales reales del suelo, ya que los agregados que definen la estructura, tienden a variar con el tiempo.

En suelos bien agregados, se hace una distinción entre poros estrechos en cada agregado (poros intra-agregados), y espacios más anchos o cavidades entre agregados adyacentes (poros inter-agregados). Los poros intra-agregados incluyen a los microporos y poros capilares, mientras que, los poros inter-agregados pueden estar parcialmente en la categoría de poros capilares y macroporos. La porosidad total es la suma de las porosidades inter-agregados e intra-agregados. La fracción en volumen de los últimos excede la de los primeros. Los poros inter-agregados son importantes en procesos como infiltración; mientras que, los poros intra-agregados son más importantes en la retención de humedad del suelo posterior a la infiltración (Hillel, 1988).

9.10 Contenido de material orgánico

Las tablas 20 y 21 presentan los porcentajes de materia orgánica fácilmente oxidable en cada sitio de muestreo de las cuencas estudiadas.

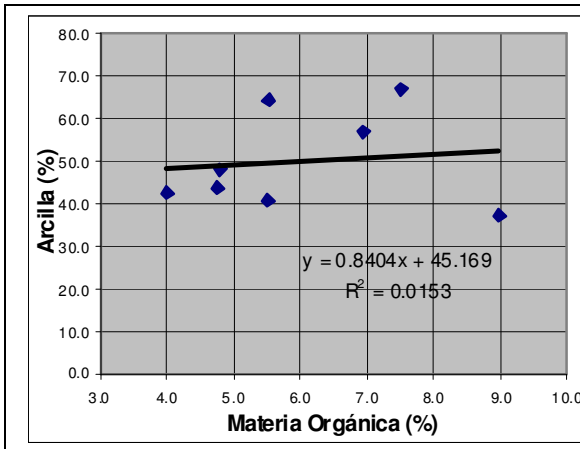
Tabla 20. Materia orgánica. Cuenca Huertitas.		
Sitio	Porcentaje (%)	Clase (Moreno, 1978)
1	6.9	Extremadamente rica
2	4.0	Muy rica
3	7.5	Extremadamente rica
4	5.5	Extremadamente rica
5	4.7	Extremadamente rica
6	4.7	Extremadamente rica
7	8.9	Extremadamente rica
8	5.5	Extremadamente rica
Media	6.006	
Mínimo	8.985	
Máximo	4.013	
Desv. St.	1.66	
Varianza	0.278	

Tabla 21. Material orgánico. Cuenca Río Grande.		
Sitio	Porcentaje (%)	Clase (Moreno, 1978)
9	12.5	Extremadamente rica
10	11.1	Extremadamente rica
11	9.6	Extremadamente rica
12	10.9	Extremadamente rica
13	12.4	Extremadamente rica
14	14.3	Extremadamente rica
15	14.3	Extremadamente rica
16	18.0	Extremadamente rica
17	17.3	Extremadamente rica
18	11.2	Extremadamente rica
Media	12.997	
Mínimo	18.008	
Máximo	9.681	
Desv. St.	2.90	
Varianza	0.224	

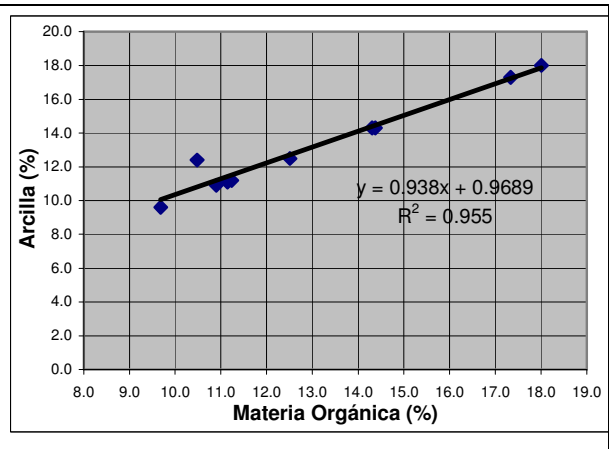
En general, en Huertitas se tienen menores porcentajes de materia orgánica que en Río Grande. Se hizo una separación de los sitios de muestreo de acuerdo al uso de suelo, con lo cual se puede señalar que en Huertitas los valores menores de materia orgánica se dan en las zonas de cultivo (4 %), y los más altos en zonas de bosque (8.9 %). En Río Grande los valores más altos ocurren en zonas de cultivo, mientras que, las zonas con vegetación secundaria y bosque, mantienen valores similares alrededor de 11 %.

Los mayores contenidos de materia orgánica se presentan en los Andosoles de la cuenca de Río Grande, lo que significa que estos suelos deben de poseer una mayor estabilidad de agregados, lo cual a su vez, proporciona una mejor estabilidad de la estructura, que daría lugar a macroporos más estables y con mayor interconexión, mayor rango de capacidad de retención de humedad, menor densidad aparente, alta porosidad y, teóricamente, alta capacidad de intercambio catiónico.

De las tablas 10 y 11, se tomaron los valores de los porcentajes de arcillas de los sitios de Huertitas y Río Grande, se graficaron con sus respectivos porcentajes de materia orgánica, obteniendo las gráficas 13 y 14, respectivamente, que muestran que a mayor porcentaje de arcilla hay un aumento en el porcentaje de materia orgánica en la cuenca de Río Grande, pues en Huertitas el R^2 es muy pequeño.



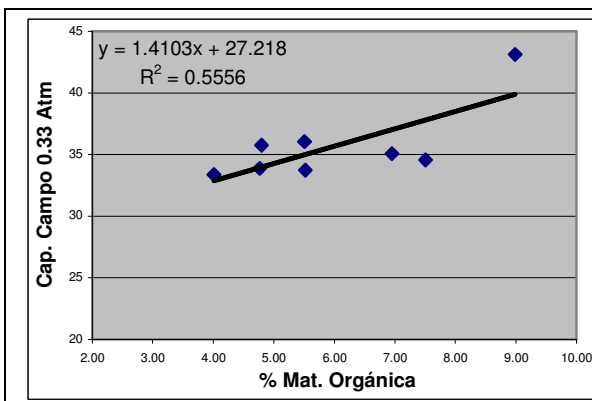
Gráfica 13. Cuenca Huertitas



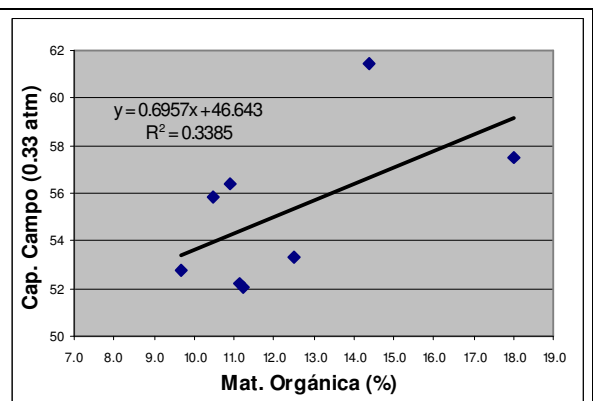
Gráfica 14. Cuenca Río Grande

Comparación entre el porcentaje de arcilla y materia orgánica.

El contenido de materia orgánica afecta directa y positivamente la capacidad de campo, al igual que el contenido de arcilla, como se aprecia en las gráficas 15 y 16, de manera que a mayor cantidad de materia orgánica se incrementa el valor de la capacidad de campo. Por su parte una mayor cantidad de materia orgánica reduce el punto de marchitez permanente en el caso de los Acrisoles de Huertitas, ver gráfica 17, y una mayor cantidad de materia orgánica aumenta el punto de marchitez permanente en los Andosoles de Río Grande, ver gráfica 18. Destacar que en los altos porcentajes de materia orgánica obtenidos en los Andosoles, no están totalmente disponibles para ser tomados de forma directa por la vegetación, ya que en este tipo de suelos con presencia de alofano e imogolita, con los primeros compuestos orgánicos hidrosolubles producto de la descomposición de la hojarasca, actúan sobre la fracción mineral extrayendo el hierro y aluminio de las estructuras minerales formando los complejos organo-metálicos insolubles.

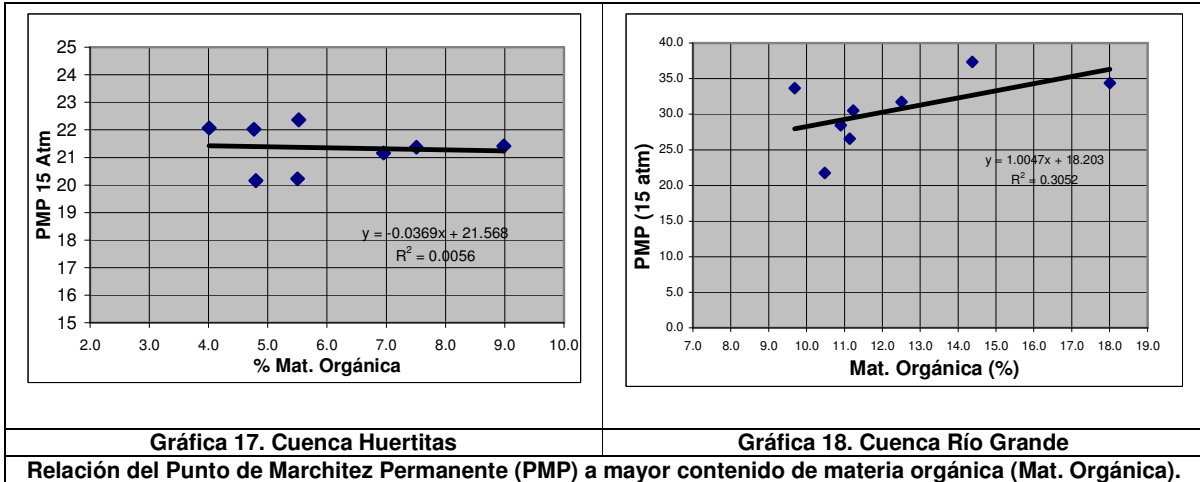


Gráfica 15. Cuenca Huertitas



Gráfica 16. Cuenca Río Grande

Aumento de la capacidad de campo (Cap. Campo) a mayor contenido de materia orgánica (Mat. Orgánica).



9.11 Análisis estadístico de los resultados

En este apartado se describen los análisis estadísticos que se aplicaron primero a los resultados de la cuenca Huertitas. Se realizó un análisis de varianza simple para evaluar el efecto de sitio sobre las diferentes variables de estudio: materia orgánica, densidad aparente, densidad real, porosidad, punto de marchitez permanente, capacidad de campo a 0.33 y 0.1 atm, agua aprovechable y agregados en tamaño de 2, 1, 0.5 y 0.25 mm.

Posterior al análisis de varianza y cuando éste fuera significativo, se realizó un análisis de comparaciones múltiples entre medias de acuerdo al uso de suelo para todas las variables, encontrando que para un nivel de 95 % de confianza, no existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tipos de uso de suelo con relación a las variables de densidad aparente, densidad real, porosidad, conductividad hidráulica, punto de marchitez permanente, y porcentaje de agregados de tamaño 1 mm,.

Se encontró que si existen diferencias estadísticamente significativas entre los tipos de uso de suelo bosque-cultivo para la variable materia orgánica; así como entre los tipos de uso de suelo de bosque-cultivo y bosque-vegetación secundaria para la variable capacidad de campo; además de entre los tipos bosque-vegetación secundaria para la variable agua aprovechable; y también para los agregados de tamaño 2 mm, 0.5 mm y 0.25 mm hubo diferencias estadísticamente significativas entre los grupos cultivo-vegetación secundaria.

También se aplicó un análisis de regresión múltiple para describir la relación entre conductividad hidráulica y 6 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

Conductividad Hidráulica = 166.447 + 0.336808 * Materia Orgánica - 111.453 * Densidad Aparente + 51.7849 * Densidad Real - 2.97408 * Porosidad - 0.134345 * Punto de Marchitez Permanente - 0.164767 * Capacidad de Campo a 0.33 atm

La tabla 22 muestra las correlaciones momento producto de Pearson entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de relación lineal entre las variables. De manera general, se pueden apreciar los bajos valores de correlación entre las distintas propiedades, lo cual puede estar en correspondencia con la variabilidad de los valores obtenidos en los sitios de muestreo. Las correlaciones positivas indican que hay una relación directamente proporcional entre las variables, y las negativas muestran una relación inversamente proporcional entre las mismas. Las variables que presentan valores significativos entre sí están remarcadas en negrillas.

En la tabla 22 se observa las correlaciones esperadas entre las variables densidad aparente y real con la porosidad, así como entre las capacidades de campo y agua aprovechable. La variable materia orgánica muestra correlaciones positivas con las propiedades como capacidad de campo a 0.33 y a 0.10 atm (0.7448 y 0.6831, respectivamente), la densidad real muestra correlaciones negativas con la capacidad de campo a 0.33 y 0.10 atm (- 0.6904 y - 6844, respectivamente), el punto de marchitez permanente muestra correlaciones positivas con los agregados de tamaño 2, 0.5 y 0.25 mm (0.8077, 0.7910, 0.7417, respectivamente), por último las variables de estabilidad de agregados muestran altas correlaciones entre sí, mayores a 0.9.

Tabla 22. Matriz de correlación de las propiedades físicas. Cuenca Huertitas.

	MO	DensAp	DensRe	Porosidad	CondHid	PMP	CC33	CC10	AguaAprov	Agreg2	Agreg1	Agreg05	Agreg25
MO	1.0000												
DensAp	-0.2605	1.0000											
DensRe	-0.5125	-0.2677	1.0000										
Porosidad	-0.0091	-0.9099	0.6426	1.0000									
CondHid	0.0833	-0.2386	0.3190	0.3162	1.0000								
PMP	0.5906	-0.5421	-0.0909	0.3899	0.4623	1.0000							
CC33	0.7448	0.0502	-0.6904	-0.3337	-0.4237	-0.0165	1.0000						
CC10	0.6831	-0.0229	-0.6844	-0.2727	-0.4267	-0.0576	0.9732	1.0000					
AguaAprov	0.2868	0.3413	-0.5184	-0.4907	-0.6049	-0.5670	0.8330	0.8336	1.0000				
Agreg2	0.3979	-0.5104	-0.3154	0.2687	0.1451	0.8077	-0.0166	-0.0630	-0.4606	1.0000			
Agreg1	0.2196	-0.1965	-0.4229	-0.0254	0.0377	0.6006	-0.0964	-0.1642	-0.4117	0.9221	1.0000		
Agreg05	0.2949	-0.2850	-0.3503	0.0706	0.2725	0.7910	-0.1335	-0.1906	-0.5477	0.9453	0.9328	1.0000	
Agreg25	0.4379	-0.3690	-0.4635	0.0910	0.3388	0.7417	0.0166	-0.0180	-0.3967	0.9201	0.9003	0.9269	1.0000

MO: Materia orgánica; Dens Ap: Densidad aparente; Dens Re: Densidad real; Cond Hid: Conductividad hidráulica; PMP: Punto de marchitez permanente; CC33: Capacidad de campo a 0.33 Atm; CC10: Capacidad de campo a 0.10 Atm; Agua Aprov: Agua aprovechable por las plantas; Agreg2; Agregados de 2 mm; Agreg1: Agregados de 1 mm; Agreg05: Agregados de 0.5 mm; Agreg25: Agregados de 0.25 mm.

Igualmente para la cuenca de Río grande se realizó el análisis de varianza simple para evaluar el efecto de sitio sobre las diferentes variables de estudio: materia orgánica, densidad aparente, densidad real, porosidad, punto de marchitez permanente, capacidad de campo a 0.33 y 0.1 atm, agua aprovechable y agregados en tamaño de 2, 1, 0.5 y 0.25 mm.

Posterior al análisis de varianza y cuando éste fuera significativo, se realizó un análisis de comparaciones múltiples entre medias de acuerdo al tipo de uso de suelo para todas las

variables, encontrando que para un nivel de 95 % de confianza, no existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tipos de uso de suelo con relación a variables como densidad aparente, densidad real, porosidad, punto de marchitez permanente, agua aprovechable, y agregados de tamaño 0.25 mm.

Se encontró que si existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tipos de uso de suelo, en los usos de suelo de cultivo-bosque y cultivo-vegetación secundaria, con relación a la variable materia orgánica; también se encontró que existen diferencias entre los grupos de uso de suelo de bosque-cultivo y bosque-vegetación secundaria para la variable conductividad hidráulica; así como para capacidad de campo a 0.10 atm entre los tres grupos de uso de suelo; además para los agregados de tamaño 2 mm, 1 mm, si hubo diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de vegetación secundaria-bosque; y para los agregados de 0.5 mm entre los grupos de bosque- cultivo y bosque-vegetación secundaria.

También se realizó un análisis de regresión múltiple a los resultados de la cuenca de Río Grande para describir la relación entre conductividad hidráulica y 6 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Conductividad Hidráulica} = 422.243 - 0.277339 * \text{Materia Orgánica} - 207.116 * \text{Densidad Aparente} + 52.698 * \text{Densidad Real} - 5.62538 * \text{Porosidad} - 0.259442 * \text{Punto de Marchitez Permanente} + 0.203474 * \text{Capacidad de Campo 0.33 atm}$$

La tabla 23 muestra las correlaciones momento producto de Pearson entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de relación lineal entre las variables. De manera general, se pueden apreciar bajos valores de correlación entre las distintas variables. Las correlaciones positivas indican que hay una relación directamente proporcional entre las variables, y las negativas muestran una relación inversamente proporcional entre las mismas. Las variables que presentan valores significativos entre sí están remarcadas en negrillas.

Igualmente se encontraron correlaciones esperadas entre las variables densidad aparente y real con la porosidad, así como entre las capacidades de campo y punto de marchitez permanente con la variable agua aprovechable. La variable materia orgánica muestra una correlación negativa con la variable densidad real (-0.7285) y positiva con la capacidad de campo a 0.10 atm (0.7571), la variable densidad real muestra una correlación negativa con el punto de marchitez permanente (-0.7669), la conductividad hidráulica presenta una correlación negativa con el punto de marchitez permanente (-0.7046) y dos positivas con las variables de agua aprovechable y agregados de 0.5 mm (0.7562 y 0.7401, respectivamente), por último la

variable de agregados de 2 mm muestra alta correlación con los agregados de 1 y 0.5 mm (0.9717 y 0.8998, respectivamente), igualmente la variable agregados de 1 mm con agregados de 0.5 mm (0.9037) y agregados de 0.5 mm con agregados de 0.25 mm (0.8196).

Tabla 23. Matriz de correlación de las propiedades físicas. Cuenca Río Grande.

	MO	DensAp	DensRe	Porosidad	CondHid	PMP	CC33	CC10	AguaAprov	Agreg2	Agreg1	Agreg 0.5	Agreg 0.251
MO	1.0000												
DensAp	0.0670	1.0000											
DensRe	-0.7285	-0.1152	1.0000										
Porosidad	-0.3837	-0.8986	0.5368	1.0000									
CondHid	-0.3871	-0.1090	0.4100	0.2753	1.0000								
PMP	0.5532	0.2655	-0.7609	-0.5736	-0.7046	1.0000							
CC33	0.5819	0.3490	-0.3693	-0.4553	0.0189	0.4054	1.0000						
CC10	0.7571	0.3792	-0.6572	-0.5964	-0.1411	0.3569	0.6830	1.0000					
AguaAprov	-0.1797	-0.0379	0.5461	0.2890	0.7562	-0.7733	0.2661	0.0973	1.0000				
Agreg2	0.1224	0.3013	-0.1860	-0.3257	0.6611	-0.3324	0.2099	0.3962	0.4963	1.0000			
Agreg1	0.1621	0.1261	-0.2441	-0.1967	0.6164	-0.3562	0.1565	0.4090	0.4844	0.9717	1.0000		
Agrg05	-0.0036	-0.0045	-0.1699	-0.0659	0.7401	-0.3986	-0.0654	0.2034	0.3752	0.8998	0.9037	1.0000	
Agreg25	-0.0312	0.0536	-0.0257	-0.0767	0.6118	-0.3047	-0.2553	-0.0374	0.1446	0.6419	0.5661	0.8196	1.0000

MO: Materia orgánica; Dens Ap: Densidad aparente; Dens Re: Densidad real; Cond Hid: Conductividad hidráulica; PMP: Punto de marchitez permanente; CC33: Capacidad de campo a 0.33 Atm; CC10: Capacidad de campo a 0.10 Atm; Agua Apro: Agua aprovechable por las plantas; Agreg2; Agregados de 2 mm; Agreg1: Agregados de 1 mm; Agreg05: Agregados de 0.5 mm; Agreg25: Agregados de 0.25 mm.

X. DESCRIPCION DE UNIDADES EDAFOLOGICAS

10.1 Perfiles de suelo

La tabla 24 muestra los valores promedio de resistencia a la penetración del penetrómetro con los valores de la densidad aparente a diferentes profundidades, que corresponden a los espesores de cada horizonte para el perfil La Cortina. Se observan valores bajos de resistencia en superficie que aumentan a mayor profundidad igual que los valores de densidad aparente.

Horizonte (Prof. cm)	Promedio resistencia (KPa)	Densidad aparente ($g \cdot cm^{-3}$)
Ap (0 – 15)	240	0.94
A (15 – 30)	278	0.98
Bw (40 – 70)	346	0.94
Bw/Bt1 (70 – 80)	369	0.98
Bt1 (80 – 100)	353	1.20
Bt2 (100 – 120)	300	1.20

Con los datos de profundidad, humedad y densidad aparente tomados del anexo 1 para ambos perfiles, se obtuvo la lámina de agua total en cada perfil, como se aprecia en las tablas 25 y 26. En el perfil La Cortina, no se aprecian diferencias notables en cuanto a su contenido de agua en cada horizonte, salvo el horizonte superior que muestra un menor contenido debido a su menor espesor; en el perfil La Ciénega, los contenidos de humedad son menores aunque cuenta con densidades aparentes mas levadas; en general los valores de lámina total son muy parecidos. Es de notar que aunque los valores son parecidos, la energía con que es retenida el agua es diferente en cada perfil, conforme al tamaño de los poros, por lo que no toda el agua esta fácilmente disponible.

Espesor (cm)	Humedad Gravimétrica (% en peso)	Densidad aparente ($g \cdot cm^{-3}$)	Humedad Volumétrica (% en volumen)	Lámina de agua (mm)	Lámina total (mm)
0-10	54.32	0.94	51.06	51	404
10-30	55.14	0.98	54.03	108	
30-50	59.07	0.94	55.52	110	
50-80	46.32	0.98	45.39	135	

Espesor cm	Humedad Gravimétrica (% en peso)	Densidad aparente ($g \cdot cm^{-3}$)	Humedad Volumétrica (% en volumen)	Lámina de agua (mm)	Lámina total (mm)
0-10	20.05	1.30	26.06	26	397
10-30	26.88	1.39	37.36	74	
30-60	28.26	1.56	44.08	132	
60-90	37.20	1.48	55.05	165	

10.2 Comparación y funcionamiento de las unidades edafológicas dentro de las cuencas

En cuanto a la textura en cada unidad edafológica hay una clara diferencia, por un lado en el Acrisol de la cuenca Huertitas predomina la textura arcillosa, cuyo suelo tiene 40 % o más de partículas de tamaño de arcilla, esto da pie a la formación de un mayor número de micro-poros con menos conexiones entre sí, dada la función de estos poros de retener agua en forma de películas adheridas a las partículas del suelo a tensiones elevadas, ofrecen limitaciones en cuanto a la cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo y de la cantidad de agua que el suelo puede absorber, sostener y proveer a las plantas, salvo que formen un buen sistema de grietas. Como el agua solo se trasmite a través de los poros, el flujo que circula será proporcional al diámetro de los poros, disminuyendo conforme los diámetros se reducen, pero esta disminución de velocidad, aparte del efecto geométrico, es aún en mayor grado para los pequeños poros, debido a que la movilidad de las moléculas de agua unidas a las partículas sólidas, es muy baja por los efectos de adsorción (sortividad). Conforme el contenido de humedad baja, disminuye el potencial mátrico y la conductividad hidráulica tiende a disminuir con mayor rapidez.

En la cuenca de Río Grande, los Andosoles poseen una textura media – fina, es decir más equilibrada en cuanto al tamaño de sus partículas, esto se aprecia al graficar los porcentajes de partículas en la curva de distribución de tamaños por partículas (gráfica 1) cuya forma en “S” de la curva indica que el rango de partículas que conforman el suelo es más amplio, en comparación con el Acrisol de Huertitas, tal característica hace que se formen poros en un rango más amplio de tamaños y mejor conectados entre sí particularmente en la superficie del suelo, lo que resulta en un comportamiento diferente a nivel superficial de entrada de agua, esto mejora la infiltración, reduce la escorrentía y beneficia el desarrollo del cultivo. Cabe mencionar que el número, el tamaño y la conexión entre los poros del suelo varían de acuerdo al tipo de suelo y la manera en que éste es manejado. Poco se puede hacer por el tipo de suelo, pero un buen manejo de la tierra puede tener un gran impacto en la restitución, mejoramiento y protección de la porosidad del suelo. Esto, a su vez, incrementará el contenido del agua del suelo disponible y los poros interconectados minimizarán cualquier riesgo potencial de anegamiento.

Los valores de densidad real en ambos suelos son similares, su ligera variación se debe al tipo de mineral de arcilla presente en cada unidad edafológica. Los porcentajes de porosidad son muy diferentes, están marcados por sus diferencias en las densidades aparentes. En la cuenca Huertitas, la porosidad es más reducida ya que posee densidades aparentes altas, en Río Grande debido a que posee mayores contenidos de materia orgánica disminuyen los valores de densidad aparente, aumentando la porosidad, lo que trae aparejado un incremento en la

infiltración y disminución de agua de escorrentía, un aumento en la capacidad del suelo para retener agua y aire, se facilita la penetración de las raíces y aumenta la conductividad hidráulica. En Huertitas la textura fina del suelo permite menos espacio poroso, a su vez aumenta los valores de la densidad aparente, el estado de compactación que guarda el suelo es muy alto, lo cual se corroboró al no poder realizar la prueba en campo con el penetrómetro. Los valores más altos de porosidad en el Andosol, indican que existe mayor cantidad de espacio para la entrada de agua y aire, sin embargo, el tamaño de los poros influye en la retención o infiltración de agua.

Los factores que afectan la capacidad de campo son la textura en relación a su porcentaje de arcilla, el tipo de arcillas minerales, porosidad, distribución de tamaños de poros y contenido de materia orgánica. Los Andosoles poseen los contenidos más altos de materia orgánica que se ve reflejado en mayores porcentajes de capacidad de campo. El punto de marchitez permanente no es influenciado por agregación, porosidad estructural y contenido de materia orgánica del suelo, más bien es influenciado por la cantidad y naturaleza del contenido de arcilla (Lal *et al.*, 1994), a mayor contenido de arcilla más alto es el punto de marchitez permanente, a pesar de que Huertitas tiene mayor porcentaje de arcilla es en Río Grande donde se presentan porcentajes más altos en esta variable. En general, en la cuenca de Río Grande se tienen los porcentajes más altos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, originado por sus mayores contenidos de materia orgánica y un mayor rango de tamaño de poros, como consecuencia la cantidad de agua aprovechable por las plantas es mayor en los suelos de Río Grande.

Los Andosoles presentan un rango más amplio de tamaños de poros, eso aunado a sus valores más altos de conductividad hidráulica en la capa de los primeros 30 cm de suelo les otorga mejores propiedades para permitir que el agua ingrese en el perfil del suelo. Por otro lado, el menor tamaño de poros en los Acrisoles, hacen que el agua de lluvia ingrese al suelo pero de una manera más lenta, de modo que el agua, en su mayor parte, se escurre superficialmente.

En Huertitas las propiedades físicas que afectan la retención de agua en el suelo son la textura y la estructura, el fenómeno del mecanismo de retención de agua es directamente proporcional a la superficie específica de las partículas del suelo, por ejemplo para un mismo peso de suelo, las arcillas presentan un área superficial mucho mayor que las demás partículas minerales, por lo cual poseen mayor fuerza de retención de agua que las arenas o dicho de otra forma, a un mismo valor de potencial el contenido de humedad es mayor en las arcillas que en las arenas. En Río Grande la retención de agua puede estar más influida por los contenidos de materia orgánica. Además, los suelos arcillosos y los que tienen ricos contenidos de materia orgánica

presentan materiales coloidales con cargas negativas que se unen al polo positivo de las moléculas de agua, estableciendo puentes de hidrógeno.

Es sabido que las características que tiene el suelo y que lo hace susceptible a modificar su infiltración o entrada de agua al mismo es el diámetro de los poros sobre la superficie, la conductividad hidráulica, la capacidad de reserva del suelo en función del volumen de porosidad ya ocupado por el agua. Considerando lo anterior, los Andosoles poseen valores de conductividad hidráulica mucho más elevados que los Acrisoles, y porcentajes más altos de porosidad, lo que en primera instancia supone una mayor entrada de agua hacia el interior del suelo, destacando que aspectos como la influencia de la cobertura vegetal tienen influencia en la hidrodinámica del suelo particularmente las áreas de bosque en donde se tienen los valores mas altos de conductividad hidráulica.

En Huertitas no fue posible medir la resistencia mecánica del suelo a la penetración, debido al elevado estado de compactación del suelo, lo cual tiene un efecto en el desarrollo y densidad de las raíces, indica un impedimento físico al establecimiento de vegetación, lo cual fue comprobado en campo al observar zonas sin vegetación establecida. Cuando el suelo está compactado, el volumen de espacios o poros del suelo disminuye ocasionando que se altere la estructura, que como ya se mencionó es una propiedad variable en el tiempo y espacio, así el suelo tiene menor capacidad de almacenamiento de agua, se reduce la porosidad del suelo, la capacidad de infiltración y la permeabilidad, lo que afecta al flujo de agua y aire a través del suelo.

A pesar de que los Acrisoles de Huertitas tienen porcentajes más altos de estabilidad de agregados, son aceptables los porcentajes en Río Grande, lo cual crea buenas condiciones en superficie para una entrada correcta y circulación de agua y aire, manteniendo una estructura favorable ligado a los porcentajes elevados de materia orgánica. Los porcentajes de agregados en sus diferentes tamaños varían de acuerdo al uso y manejo que se le da al suelo.

En la regulación del régimen hidrológico establecido en cada cuenca, el suelo a través de sus características o propiedades, es visto como el primer contacto con el agua de lluvia, por lo que juega un papel muy importante en la entrada de agua y su almacenamiento, así como en su capacidad para cederla, de esta manera, para mantener el suelo como un regulador del ciclo hidrológico, su conservación es importante. Las propiedades con que cuentan los Andosoles indican en primera instancia una capacidad más alta de permitir la entrada de agua al interior del suelo.

Efectos en superficie

Para la cuenca Huertitas se encontró que la variable materia orgánica es uno de los factores que hace vulnerable la superficie del suelo y su estabilidad estructural a pérdidas por erosión hídrica y producción de escorrentía superficial, sobre todo en lugares con bajos contenidos de materia orgánica que se presentan básicamente en zonas con menor cobertura vegetal, como son las parcelas de cultivo y áreas con vegetación secundaria. Entre las funciones de este factor está la de mantener unidos a los agregados del suelo. Por ejemplo, cuando se presentan lluvias cortas y de alta intensidad evita el desarrollo de costras. Un manejo inadecuado del suelo lleva inevitablemente a una reducción del contenido de materia orgánica con la consecuencia de las alteraciones en sus propiedades físicas. En Río Grande los porcentajes están por arriba de 9 % en todos los sitios, cabe mencionar que son porcentajes muy altos y que no todo en materia orgánica disponible en primera instancia para la vegetación ya que es un producto que se encuentra formando complejos organo-metálicos, pero que si tiene una función de mantener una estructura estable, impidiendo el sellado y la formación de costras superficiales al secarse el suelo. Los resultados de este trabajo concuerdan en la mayor susceptibilidad de mayor erosión en Huertitas como lo indican los resultados del programa REVOLSO.

Entre los factores que pudieran afectar la infiltración están: (1) el tipo de cubierta vegetal, de hecho algunas propiedades de los suelos muestran diferencias de acuerdo al uso que se le da al suelo; (2) las características hidráulicas del suelo, representadas por su conductividad hidráulica, las cuales muestran un ligero incremento en las zonas con vegetación más densa como son los bosques; (3) formación de costras superficiales, que se presentan en años posteriores a los trabajos agrícolas llegando al endurecimiento del suelo en superficie.

La escorrentía tiene mayor posibilidad de presentarse en Huertitas debido al desarrollo de costras superficiales, en la estación seca constituye una limitación para el ingreso del agua al suelo. Según Pla (1992) es un proceso muy particular de compactación superficial que se produce por la desintegración de los agregados superficiales de los suelos expuestos al impacto directo de las gotas de lluvia, al redepositarse las partículas dispersas en un arreglo más denso o al moverse con el agua percolante relleno los poros. El resultado es la formación de una costra superficial que impide la infiltración de agua, causando anegamiento en zonas planas o escorrentías en zonas con pendientes. Al secarse puede dificultar la emergencia de las plántulas e impiden o disminuyen el almacenamiento de agua en el perfil del suelo.

10.3 Relación del uso de suelo con sus propiedades físicas

La figura 15 corresponde a una imagen de satélite de la cuenca Huertitas, muestra los sitios de muestreo y se delimitó a las zonas que tienen un uso de suelo de bosque y zonas de cultivo, se observan también aquellas zonas que presentan cárcavas y zonas con vegetación secundaria. En cuanto al contenido y tamaño de partículas del suelo, el sitio con menor contenido de partículas de tamaño arcilla es el 7, que corresponde a bosque, los de mayor contenido son los sitios 3 y 4 que representan zonas con vegetación secundaria, arbustos y pastos; los sitios con menor contenido de arena son el 3, 1 y 4 que son zonas con vegetación secundaria, arbustos y pastos, mientras que los de mayor contenido son el 8, 5 y 7, los dos primeros con vegetación secundaria, arbustos y pastos y el tercero de bosque. La densidad aparente es muy parecida, mayor en los sitios de zonas de cultivo y menor en zonas de vegetación secundaria. La porosidad es menor en el sitio 6 de vegetación secundaria (50 %) y mayor en el sitio 5 con el mismo uso de suelo. El sitio 7 con bosque posee el mayor contenido de humedad a capacidad de campo (43 %), los demás sitios son muy parecidos entre 33 y 36 %. Los valores de conductividad hidráulica están por debajo de $1 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$, solo el sitio 3 (vegetación secundaria) tiene un valor de $1.24 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$. El contenido de materia orgánica fue mayor en el sitio 7 (bosque), y menor el sitio 2 que es una zona de cultivo.

La textura y el contenido de materia orgánica son las propiedades de acuerdo al uso de suelo que más diferencia muestran en sus valores, en cuanto a conductividad hidráulica no se notan particularidades siendo en general, valores demasiado bajos. Se puede decir con respecto a la vegetación que cualquier cambio de uso del suelo resulta en cambios específicos en el ecosistema, que causa efectos cualitativos y cuantitativos en el sistema hídrico, para este estudio, es de mencionar que la vegetación influye en el ciclo de agua de diferentes formas, como la interceptación, es la cantidad de agua que es directamente retenida y evaporada por la superficie de la vegetación y que no puede ser activo en el proceso de erosión.

La figura 16 muestra la cuenca de Río Grande, así como los puntos de muestreo y se delimitaron las zonas de acuerdo al uso de suelo. El sitio con menor contenido de partículas de tamaño arcilla es el 15, que corresponde a zona de cultivo, el de mayor contenido es el 13, que es zona de bosque; los sitios con menor y mayor contenido de arena son el 16 y 17, y el 9, respectivamente, que son zonas de cultivo. La densidad aparente y la porosidad no muestran una variación de acuerdo al uso de suelo. El sitio 14 de cultivo posee el mayor contenido de humedad a capacidad de campo con 61 %, los demás sitios son muy parecidos entre 52 y 57 %. Los valores de conductividad hidráulica más altos son para las zonas de bosque ($4.6 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) y los más bajos están en las zonas de cultivo ($2.46 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$). El contenido de materia orgánica fue mayor en los sitios 16 y 17 (cultivo), y menor el sitio 11 que es una zona con vegetación

secundaria, arbustos y pastos. Las mejores condiciones para que se de una entrada de agua en el suelo, son las zonas de bosque, debido a su conductividad hidráulica, contenido de material orgánico, y mejor equilibrio entre sus porcentajes de tamaño de partículas.

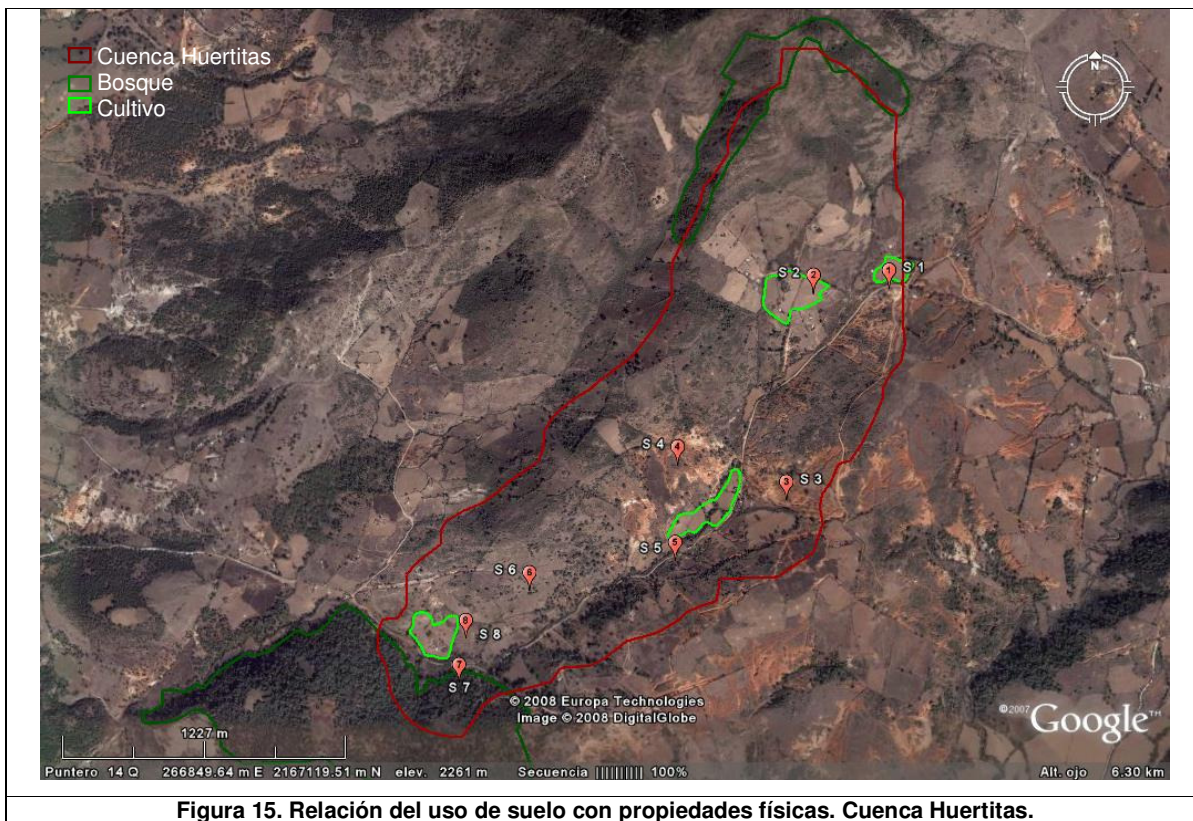


Figura 15. Relación del uso de suelo con propiedades físicas. Cuenca Huertitas.

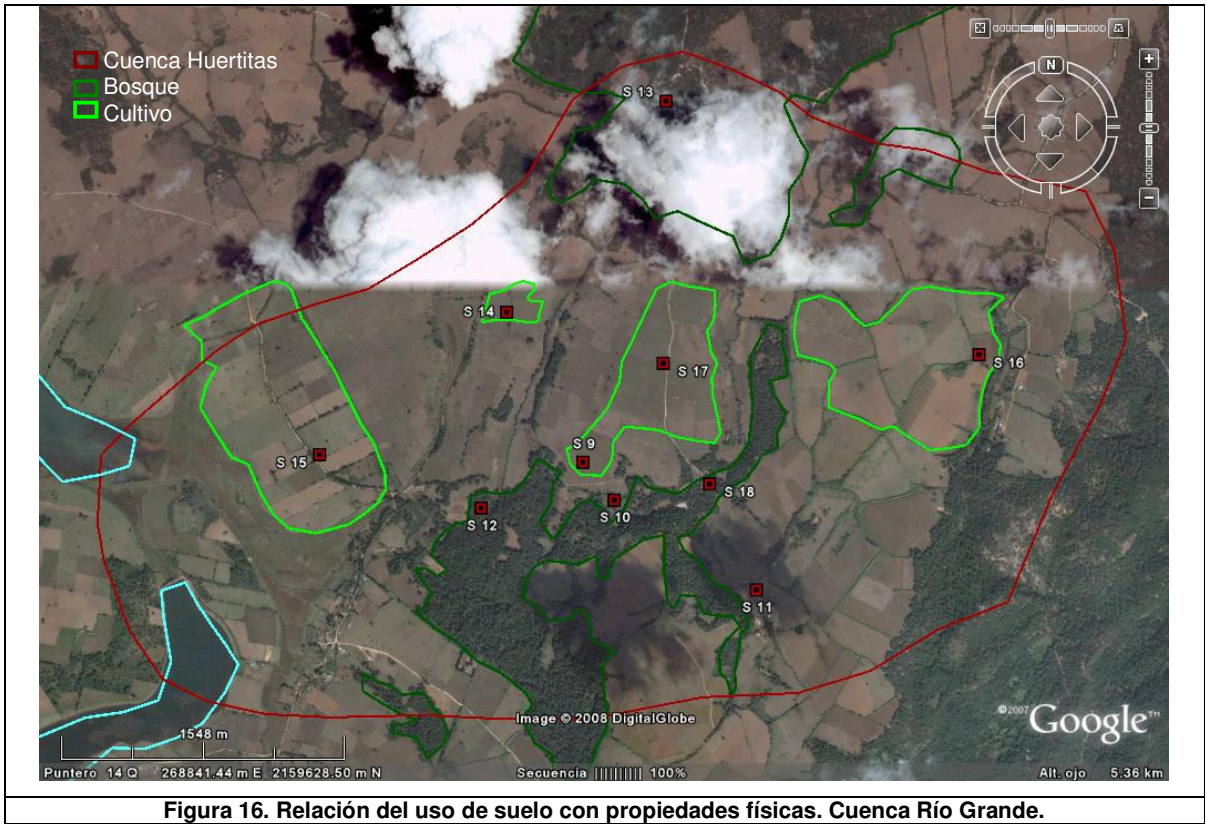


Figura 16. Relación del uso de suelo con propiedades físicas. Cuenca Río Grande.

XI. CONCLUSIONES

Existe una marcada diferencia en la micro-estructura que conforma cada unidad de suelo, en el Acrisol se observa más bien una estructura masiva y compacta, sin un espacio poroso intercomunicado y continuo entre los horizontes del suelo, con tendencia a formar grietas, mientras en el Andosol se observan agregados de forma semicircular que conforman un espacio poroso con conductos estables para la circulación de agua y aire.

Los minerales presentes en la fracción arcilla en el Andosol pertenecen al grupo de la kaolinita, principalmente se encuentran halloisita, gibsitita y trazas de material amorfo, las propiedades de la halloisita le confieren mayor cantidad de moléculas de agua ligadas a la superficie de estas arcillas, y la presencia de material amorfo crea una estructura de esferas huecas que se agrupan en agregados que se mantienen hidratados; mientras la Kaolinita predomina en el Acrisol e indica un estado o grado de alteración mas avanzado en su formación, donde desaparece el mineral halloisita y material amorfo.

Los Acrisoles poseen una textura arcillosa con porcentajes de arcilla arriba de 40 %, excepto en zonas de bosque, una densidad aparente media – alta, tienen una capacidad de campo, punto de marchitez permanente y agua aprovechable por las plantas mucho menor en comparación a los Andosoles, la conductividad hidráulica es baja, con porosidades aceptables pero formada por micro-poros aislados, y con porcentajes de materia orgánica aceptables en zonas de bosque únicamente, son propiedades que los vuelven poco aptos para mantener humedad al interior del suelo en cantidad y disponibilidad suficientes para sostener vegetación.

Los Acrisoles se encuentran en un estado muy alto de compactación que se mantiene probablemente durante los meses secos del año, indica un estado muy seco del suelo, valores elevados de densidad aparente, predominancia de micro-poros, condicionando un impedimento a la entrada de agua a nivel superficial, esto provoca una menor cantidad de almacenamiento de agua al interior del perfil con un menor desarrollo y cobertura de la vegetación, al no poder establecerse la vegetación de una manera permanente.

Los Andosoles de la cuenca de Río Grande son suelos poco profundos, tienen un espesor variable ya que están cubriendo a los suelos de tipo Acrisol, poseen una textura media con un porcentajes equilibrado de tamaños de partículas, una densidad aparente muy baja menor a 0.9 g*cm^{-3} , una porosidad alta mayor que los Acrisoles, mayor cantidad y tamaño de macro-poros y una conductividad hidráulica media, una estructura muy porosa debido a que están formados por complejos organo-metálicos en forma de esferas huecas, propiedades que les confiere la capacidad de permitir la entrada de mayor cantidad de agua favoreciendo la

infiltración a nivel superficial, así como mayor capacidad de retención de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, que a la vez esta disponible para la vegetación favoreciendo su desarrollo.

La cantidad de agua aprovechable por las plantas es mayor en Andosoles, a pesar de tener un punto de marchitez permanente más elevado que en los Acrisoles, se compensa por tener una capacidad de campo mayor en los primeros, los Andosoles cuentan con mayores contenidos de materia orgánica que influyen en los mayores contenidos de agua, a su vez muestran diferencias de acuerdo a su uso de suelo. Esto significa que la vegetación natural y agrícola ubicada en Andosoles debería tener mayor protección contra estrés hídrico durante los períodos relativamente secos y por eso posiblemente mayor productividad.

Los porcentajes de agregados en ambas unidades edafológicas dependen del tipo de uso del suelo, en los Acrisoles los mayores porcentajes se obtienen donde el uso de suelo es de vegetación secundaria y los menores porcentajes en zonas de cultivo, en los Andosoles los porcentajes más elevados se encuentran en zonas con uso de suelo de bosque y los porcentajes más bajos en zonas de vegetación secundaria. En general, los Acrisoles cuentan con mayores porcentajes probablemente debido a los mayores contenidos de arcilla y de hierro. En los Andosoles a pesar de tener menores porcentajes, se mantienen en un estado aceptable debido a contar con zonas de vegetación más permanente y estable con un aporte constante de restos vegetales.

Debido a una edad más avanzada en el desarrollo y formación de los Acrisoles de la cuenca Huertitas presentan una textura más fina, con mayores porcentajes de la fracción arcilla y menores porcentajes de arena, esto es, han tenido mayor tiempo de contacto con los agentes de intemperismo. Los Acrisoles de la cuenca Huertitas poseen una menor cantidad de agua aprovechable por las plantas, debido en gran parte al tamaño de poros predominantes que corresponde a los microporos, esto también hace que posean una conductividad hidráulica baja. La propiedad del suelo que pudiera estar más directamente relacionada con este mecanismo es la textura, que en este caso es de tipo arcillosa, debido al micro-tamaño de las partículas minerales del suelo, poseen mayor superficie específica, teniendo más área para que se presenten fuerzas de adsorción, que son las responsables de la retención de agua en los microporos creados por la textura mas fina. Este proceso dificulta la obtención de agua por las raíces de la vegetación dificultando su desarrollo. Además de esto los valores relativamente bajos de la conductividad hidráulica deben causar mayor escorrentía superficial de agua durante los períodos lluviosos debido a menor capacidad para su infiltración al suelo.

La cuencas Huertitas posee zonas claras sin vegetación establecida que proteja y ayude en la intercepción de la energía cinética de las gotas de lluvia y de aporte de residuos orgánicos, lo que deja a la superficie del suelo susceptible de crear encostramiento superficial, además su textura arcillosa mantiene un estado alto de compactación subsuperficial, que impide la penetración de raíces, el colapso del espacio poroso y la infiltración del agua de lluvia, generando escorrentía superficial, ya que no hay red con espacios porosos intercomunicados sino un red de grietas aisladas a mayor profundidad del suelo.

El contenido de materia orgánica, se notó que puede tener influencia en las propiedades hídricas de los Andosoles en relación a la cantidad de agua que pueden retener, pero es una propiedad que puede variar a corto y mediano plazo, por ejemplo un evento de lluvia intensa, cambios en la vegetación, o en el tipo de cultivo. En zonas cultivadas de la cuenca Río Grande algunos de los efectos de la labranza causan consecuencias en la estructura del suelo, erosión del suelo, disponibilidad de nutrientes y pérdida de nutrientes, en lo que respecta al contenido de materia orgánica, estos efectos llevarían a la disminución de la retención de agua, aumento de la hidrofobicidad y destrucción de la materia orgánica.

Las propiedades de los Andosoles son responsables en buena parte de la buena regulación del agua en el funcionamiento hidrológico de la cuenca, debido a su estructura muy ligera y porosa y la extraordinaria capacidad de almacenamiento de agua, funcionan como receptores tipo esponja, un reservorio de agua importante que la libera lentamente, aparte de estar sobreponiendo a los Acrisoles, en la zona de contacto entre estos dos paquetes de suelos con características diferentes, principalmente textura y diámetro de los conductos, se crea una disminución del régimen de infiltración en el momento que el frente de humedad llega a esta interface y una disminución de la conductividad, favoreciendo posiblemente un movimiento horizontal del agua.

En la cuenca de Río Grande los suelos tienen una textura franca con tendencia a fina, tiene un porcentaje importante de la fracción arcilla que junto a la elevada cantidad de material orgánico le hace tener buena agregación y estructuración de las partículas que ayuda en el control de la erosión, es importante mantener esta buena estructuración por que crea conductos estables por donde puede circular el agua e infiltrarse, que posteriormente percola a estratos inferiores del subsuelo y llega a formar parte de la recarga del acuífero, la densidad aparente es baja por lo que tiende a aumentar la porosidad total, la humedad del suelo y una alta actividad de microorganismos que también ayudan en la creación de canales para una buena circulación del agua, tiene una resistencia mecánica en zonas de cultivo que presentan una capa endurecida en superficie, son zonas que empiezan a mostrar efectos negativos de labranza, pero que al poseer valores altos de material orgánico los hace menos susceptibles a la compactación.

El conocer las propiedades y limitaciones de una cuenca nos lleva a un mejor uso de sus recursos, por el contrario un manejo inadecuado llevaría a una alteración o modificación irreversible en las propiedades de uno de sus elementos de su funcionamiento hidrológico como es el suelo, teniendo como consecuencia alteraciones en sus propiedades como densidad aparente, contenido de materia orgánica, tamaño de poros, en la capacidad de retención de agua y en la estabilidad de los agregados, que contribuyen a la pérdida de su calidad y de la estabilidad de su estructura.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña E., Poch R. 2001. Variabilidad de propiedades físicas de suelos forestales. Aplicación a la cuenca rasa de cogulers (el solsonès, prepirineo catalán). Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida. EDAFOLOGÍA, Vol. 8 (3), pp. 11-23, 2001.
- Alcalá M., Ortiz S., Gutiérrez C. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra* 2001; 19: 227-239.
- Alcalá M., Prat C., Ramos A., Hidalgo C., Cabrera A., Garduño V. 2006. Caracterización edafológica al sureste de la cuenca de Cointzio, Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo IRD-LTHE, Francia/UNAM-CIECO México. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. México.
- Allbrook R. 1984. Physical properties of volcanic ash soils. Congreso Internacional de Suelos Volcánicos. Comunicaciones, pp:1-9. Secretariado de Publicaciones de La Universidad de La Laguna, Tenerife, Serie Informes Nº 13.
- Amador, G.A. 1997. Los recursos naturales de Atécuaro, Michoacán: uso actual y perspectivas de aprovechamiento. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.
- Bailey S. 1990. Halloysite – A critical assessment. Proceedings of the 9th International Clay Conference, Strasbourg, 1989. V.C. Farmer and Y. Tardy (Eds). *Sci. Géol. Mém.*, 85, pp. 89-98, Strasbourg.
- Baver L., Gardner W. 1973. Física de Suelos. México. DF. Uteha. Ed. 1973. p.299- 398.
- Bedolla C., Cabrera A., Prat C., Medina L. 2006. Dinámica de la erosión en una cárcava en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán, México. Facultad de Biología, U.M.S.N.H., IRD-LTHE, France/UNAM-CIEco.
- Bedolla C. 2007. Dinámica de la erosión en una cárcava de la microcuenca de Atécuaro, Michoacán. M. C. en conservación y manejo de recursos naturales, Tesis, UMSNH, Michoacán, México, Morelia, 86 pp.
- Beekman F. 1987. Soil strength and forest operations. Department of Forest Technique and Forest Products. Wageningen, The Netherlands: Agricultural University, 1987. 168 p.
- Birkeland W. 1984. Soils and Geomorphology. Oxford University Press, 372 p.
- Blake G., Hartage K. 1986. Particle density. In: Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Second ed. Agronomy Series no. 9, ASA, SSSA, Madison, Wis., USA, p. 377 – 382.
- Buckman H., Brady N. 1985. Naturaleza y propiedades de los suelos. UTEHA. México. 590 pp.
- Buytaert W., De Bièvre B., Deckers J., Dercon G. 2000. Influence of land use on the hydrological properties of volcanic soils: the case of catchments providing water to Andean cities. Land-Water Linkages in Rural Watersheds Electronic Workshop 18 September – 27 October 2000, case study 29. FAO, Rome, Italy.
- Cabrera A. 2000. Desarrollo integral de la cuenca de Atécuaro. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.
- Cavazos T., Rodríguez O. 1992. Manual de prácticas de Física de Suelos. Trillas. México. 19-25 p.

- Carter M. 1993. Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers. 1993.
- Collinet J. 1992. Organizaciones superficiales e interacciones de las conductividades hidráulicas en suelos de zonas áridas y semi-húmedas. Instituto de ecología - Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération. ORSTOM - Centro de estudios mexicanos y centro americanos. CEMCA, 1992. p. 331-337.
- Cotler H. 2003. Características y manejo de suelos en ecosistemas de montaña. En: O. Sánchez, O. Monroy, E. Vega, E. Peters, y C. Donovarro (comps.). Conservación de ecosistemas templados de Montaña en México. Instituto nacional de Ecología. 306 p.
- Cotler H. 2004. El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Primera edición: diciembre de 2004. Pp: 267.
- Covalada S., Gallardo J., Garcia F., Prat C., Bravo M., Kirchmann H. 2007. Carbon distribution in soil particle-size fractions along an altitudinal gradient in the transmexican volcanic belt. In: O solo, a paisagem e o uso da terra (Ed.: solo, S. P. d. C. d.s), UTAD, Vila Real, Portugal, 4-6/07/07.
- Dahlgren R., Shoji S., Nanzyo M. 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soil. In: Shoji S., Nanzyo M. and Dahlgren R.A. Volcanic Ash Soils: Genesis, properties and utilization. Elsevier Science.
- Day P. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. In: Methos of soil analysis Part 1. Black C. American Society of Agronomy, Inc. Publisher Madison.
- Dixon J., Weed S. 1989. Minerals in Soil Environments, SSSA Madison, Wisconsin, USA, 2nd Edition.
- Doran J., Parkin T. 1994. Defining and assessing soil quality. Pp: 3 – 21 en: Doran, J. W., D. C. Coleman, D. C., Bezdicsek y B. A. Stewart (eds). Defining and assessing soil quality for sustainable environment. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison. Wisconsin.
- Domenico P., Schwartz F. 1990. Physical and Hydrogeology. © 1990 by Wiley & Sons, Inc.
- Egawa T. 1977. Properties of soils derived from volcanic ash. Pp. 11-64. In: Y. Ishizuka y C. A. Black (ed.). Soils derived from volcanic ash in Japan. Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y Trigo (CYMMYT). México, DF.
- Ellies A., Vyhmeister E. 1981. Algunos aspectos hídricos del horizonte superficial de tres tipos de suelos del sur de Chile. Agro Sur. 9(2): 94-100.
- Engelman R., LeRoy P. 1993. Sustaining water: population and the future of renewable water supplies. Population action international, Washington, D. C., 56 pp.
- FAO, 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. Boletín de suelos de la FAO 79. Editores: Francis Sazón y Richard Barber Consultores de la FAO Servicio de Manejo de las Tierras y de la Nutrición de Plantas. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN Roma, 2005.
- FAO Land and Water Development Division, 2000. Land-water linkages in rural watersheds. FAO Land and Water Bulletin 9. 18 september – 27 october, 2000.

- FAO-ISRIC-SICS, 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports 84. FAO. Rome.
- Fieldes M., Claridge C. 1975. Allophane. En: J.E. Gieseking (Editor), Soil Components. Springer-Verlag, Heidelberg, Vol. 2, pp. 351-393.
- Fitzpatrick E. 1990. Micromorfología de suelos. Department of soil science, University of Aberden, United Kingdom. Compañía editorial continental S. A. de C. V. México. 1990. Publicada por Chapman and Hall Ltd.
- García A. Morales A. 1986. Caracterización de algunos suelos cultivados con aguacate y su estado nutricional, en la zona de Nepantla, Estado de México. Tesis de licenciatura. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Zaragoza, UNAM. 5125 p.
- García E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Copen Instituto de Geografía. UNAM, México.
- Gee G., Bauder J. 1986. Análisis del tamaño de las partículas. In Klute, A. (Ed). Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Segunda Edición. Agronomy 9. ASA y SSSA. Madison, Wisconsin USA. 383 – 411 ps.
- González J., Cabrera A., Ayala J. 2006. Flujo, calidad de agua y uso potencial de los manantiales de la microcuenca Atécuaro, Morelia, Michoacán, México. Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo BIOLÓGICAS No. 8, pp. 31-46, 2006.
- Grandjean E., Cabidoche Y., Robert M., Tessier. 1984. Effect of allophane hydric behavior on that of some guadulopean andosols. Congreso Internacional de Suelos Volcánicos. Comunicaciones, pp:24-42. Secretariado de Publicaciones de La Universidad de La Laguna, Tenerife, Serie Informes N° 13.
- Hamblin, A.P. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. Advances in agronomy. 38:95–158.
- Hernández D., 1989. Algunos aspectos de la degradación física de los suelos en el Municipio de Salamanca, Gto. México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. 54 p.
- Hillel D. 1988. Environmental Soil Physics., Academic Press.
- Horton R. 1933. The role the infiltration in the hydrological cycle. Trans. American Geophys. Union, 14: 446-460.
- Kemper W., Rosenau R. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A., ed., "Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods", Monograph No. 9. Am. Soc. Agron., Madison, WI.
- Kern J., Jonson M. 1993. Conservation tillage impacts on national and atmospheric carbon levels. Soil Science Society of America Journal 57: 200 – 210.
- Klute A. 1986. Water retention: Laboratory methods. P. 635 – 662. In Klute, A. (Ed). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Second ed. Agronomy Series no. 9, ASA, SSSA, Madison, Wis., USA, p. 332 – 340.

- Klute A., Dirksen C. 1986. Conductividad hidráulica en suelos saturados. Método de Flujo Constante. In: Klute, A. (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Segunda Edición. Agronomy 9. ASA y SSSA. Madison, Wisconsin USA. 694 – 700 ps.
- Lal R., Shukla M. 2004. *Principles of Soil Physics*. The Ohio State University Columbus, Ohio, U.S.A. Marcel Dekker Inc., 2004.
- Lal R., Stewart B. 1994. *Soil Processes and water quality*, *Advances in soil science*. Lewis publishers, Boca Raton, FL, 398 pp.
- Lin H. 2002. *Hydropedology: Bridging Disciplines, Scales, and Data*. Dep. of Crop and Soil Sciences. The Pennsylvania State University, University Park. V02-0026.
- Liniger H., Weingartner R. 1998. Montañas y recursos hídricos. *Unasyva*, 49 (4), 39-46.
- Lizcano A., Herrera M., Santamarina J. 2006. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2).
- Marshall T., Holmes J. 1988. *Soil physics*. 2nd ed. Reading: Cambridge University Press, 374p.
- Mas Porras, J. 1997. Presupuesto para la elaboración del programa de manejo forestal de tipo persistente para los bosques del ejido de Atécuaro, Morelia, México.
- Mason B. 1992. *Preparation of soil sampling protocols: sampling techniques and strategies*. US EPA, EPA/600/R-92/128. 169 pp.
- Metting F. 1993. *Soil microbial ecology: Applications in agricultural and environmental management*. Ed. 1993. Marcel Dekker, New York.
- Moosegar A., Warrick A. 1986. Hydraulic conductivity of saturated soil: field method. En: *Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods*, *Agronomy Monograph*, No 9, 735-768. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 677.
- Moreno D. 1978. Clasificación de pH de suelo, contenido de sales y nutrientes asimilables. INIA, SARH. México.
- Núñez C. 1991. Diagnóstico y evaluación de los suelos salino-sódicos de una zona templada en Chalco, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, U.N.A.M. México. 78 p.
- Parfitt R., Saigusa M. Coiwe J. 1984. Allophane and halloysite formation in volcanic ash bed under different moisture conditions. *Soil Science*, Vol. 138, No. 5, pp. 360-364.
- Parfitt R. 1990. Allophane in New Zealand – A Review. *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 28, pp. 343-360.
- Ping, C. L., S. Shoji y T. Ito. 1988. Properties and classification of three volcanic ash-derived pedons from Allutian Islands and Alaska Peninsula, Alaska. *Soil, Sci. Soc. Am. J.* 52: 455-462.
- Ping C., Shoji S., Ito T., Takahashi T., Moore J. 1989. Characteristics and classification of volcanic ash-derived soils in Alaska. *Soil, Sci.* 148: 8-28.
- Pla I. 1992. La erodabilidad de los Andisoles en Latinoamérica. *Suelos Ecuatoriales*, Vol. 22 (1): 33-43.

- Pla I. 2003. Física de Suelos e Hidrología en América Latina. Departamento de Medio Ambiente y Ciencia del Suelo, Universidad de Lleida. Lleida (España). En: Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo Compendio de los trabajos presentados en la VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. Tema: Hidrología de Suelos La Serena, Chile, 2–14 de Noviembre de 2003
- Rab M. 1992. Impact of timber harvesting and compaction with reference to residual log harvesting in East Gippsly, Victoria- A review. Native Forest Research. Department of Conservation and Environment, Victoria, Australia, 18p, VSP Technical Report Nº13.
- Ramírez R., Tabeada M., Gil R. 2006. Efectos a largo plazo de la labranza convencional y la siembra directa sobre las propiedades físicas de un argiudol típico de la pampa ondulada argentina. Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín, ene./jun. 2006, vol.59, no.1, p.3237-3256. ISSN 0304-2847.
- Rao S. 1995. Mechanistic approach to the shear strength behavior of allophonic soils. Engineering Geology, No. 40, pp. 215-221.
- REVOLSO (Alternative Agriculture for a Sustainable Rehabilitation of Deteriorated Volcanic Soils in Mexico and Chile 2002-2006)¹, programa SEMARNAT-CONACYT (Degradación y restauración de suelos con enfoques participativos en la cuenca de Cointzio, Michoacán)². El impacto de las lluvias sobre los suelos de tipo Andosoles (polvillo) cultivados bajo tratamientos agronómicos diferentes en la cuenca alta de Cointzio. ¹ Prat Christian, IRD-LTHE/UNAM CIEco; ² Medina Orozco Lenin, UMSNH, Bravo Espinosa Miguel, INIFAP Uruapan.
- Rodríguez A., Arbelo J., Guerra J., Mora J. 2002. Erosión hídrica en Andosoles de las islas canarias. EDAFOLOGIA, Vol. 9 (1), pp. 23-30, 2002.
- Rose C. An introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds. Cambridge University Press. 2004.
- Sánchez P. 1976. Properties and management of soils in the tropics. John Wiley and Sons, 618 pp.
- Schafer R., Bailey A., Johnson C., Raper R. 1989. A rationale for modeling soil compaction behavior: An engineering mechanics approach. ASAE Paper Nº 89-1097, St. Joseph, MI,
- Scott H. 2000. Soil Physics, Agricultural and Environmental Applications. 2000 Iowa State University Press. pp 441.
- SEMARNAT-INEGI. Estadísticas del medio ambiente, México 1997/Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección del ambiente 1995-1996 [en línea] http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas_ambientales/compendio/02medio_ambiente/suelos.shtml . Consultado Dic 17, 2004.
- Secretaría de Programación y Presupuesto, 1985. Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán., Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México, D. F., junio de 1985.
- Shoji S., Ito T., Saigusa M., Yamada I. 1985. Properties of nonallophanic Andosols from Japan. Soil Sci. 148: 264-267.
- Shoji S., Nanzyo M., Dahlgren R. 1993. Volcanic Ash Soils: Genesis, properties and utilization. Dev. Soil Sci. 21. Elsevier, Amsterdam The Netherlands.
- Singh B. 1996. "Why does halloysite roll ? A new model". Clays and Clay Minerals, Vol. 44, No. 2, pp. 191-196.

- Smith G. Ruhe R. 1955. How water shaped the face of the land. In: The Yearbook of Agriculture, 1955. Washington DC: US Dept. of Agriculture. p. 120.
- Sposito G. 1984. The surface chemistry of soils. Oxford University Press.
- Tamhane R., Motiramani D., Bali P.. 1978. Suelos: su química y fertilidad en zonas tropicales. Diana. México. 483 pp.
- Trejo M. 1998. Índices de contaminación por metales pesados en suelos de cultivo del Estado de Guanajuato. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. 67 p.
- Van Olphen, H. 1971. "Amorphous clay materials". Science, Vol.171, pp. 90-91.
- Vyhmeister E. 1980. Algunos aspectos hídricos del horizonte superficial de tres tipos de suelos del sur de Chile. Tesis Ing. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 43 p.
- Wada K. 1987. Minerals formed and mineral formation from volcanic ash by weathering. Chemical Geology, Vol. 60, pp. 17-28.
- Wada K. 1990. Minerals and mineral formation in soils derived from volcanic ash in the tropics. Proceedings of the 9th International Clay Conference, Strasbourg, 1989. V.C. Farmer and Y. Tardy (Eds). Sci. Géol. Mém., Vol. 85, pp. 69-78, Strasbourg.
- Walkley A., Black I. 1935 An Examination of the Method for Determining Soil Organic Matter, and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. Soil Science 37: 2938.
- Ward A., Trimble S. 2004. Environmental Hidrology. Lewis Publishers. 2a edicion. 2004. 475 pag.
- Warkentin B., Maeda T. 1980. Physical and mechanical characteristics of Andisols. In: "Soils with variable charge" (B.K.G. Theng Ed.) N.Z. Soc. of Soil Science. Lower Hutt, New Zealand: 281-301.
- Warrick A. 2002. Soil Physics companion. © 2002 by CRC Presss LLC.
- Wayne D. 1982. Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud. Ed. Limusa México. Pp. 479.
- Wesley L. 1977. Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. Geotechnique, Vol. 27, No. 2, pp. 125-136.

Bibliografía de Internet

<http://www.fao.org/landandwater/watershed.htm>

<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.htm>

<http://www.unex.es/edafo/SEL1Andosoles.htm>

<http://revolso.isvo06.org/>

<http://www.desire-project.eu/>

ANEXOS

Anexo 1. Características de cada perfil y sus horizontes, tomado del Proyecto REVOLSO Degradación y restauración de suelos con enfoques participativos en la cuenca de Cointzio, Michoacán

Perfil La Cortina, cuenca Río Grande										
Horiz	Prof cm	Humedad campo %	Textura (%)			Clase de textura	Color			
			A	L	R		Seco		Húmedo	
65	0-10	54.32	41	53	6	Franco limoso	7.5YR 4/4	Brown	7.5YR 2.5/3	Very dark brown
66	10-30	55.14	46	47	7	Franco arenoso	7.5YR 4/4	Brown	7.5YR 2.5/3	Very dark brown
67	30-50	59.07	53	41	6	Franco arenoso	7.5YR 4/6	Strong brown	7.5YR 3/4	Dark brown
68	50-80	46.32	29	59	12	Franco limoso	7.5YR 5/6	Strong brown	5YR 3/4	Dark reddish brown
69	>80	39.14	23	62	15	Franco limoso	5YR 4/6	Yellowish red	2.5YR 3/4	Dark reddish brown

Perfil La Cortina, cuenca Río Grande (continuación)											
Horiz	Dap	pH 1:2.5	pH 1:2.5	CO	MO	Bases intercambiables				CIC	SB
		H ₂ O	KCl			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺		
	g*cm ⁻³			%	%	Cmol/Kg					%
65	0.94		4.69	5.80	10.01	2.15	0.42	0.09	0.00	14.7	18.06
66	0.98	6.0	4.95	4.87	8.39	2.28	0.42	0.06	0.05	14.6	19.24
67	0.94	6.25	5.46	2.71	4.67	3.22	0.66	0.05	0.12	14.2	28.45
68	0.98	6.55	5.64	0.90	1.56	3.25	0.70	0.03	0.02	13.4	29.69
69	1.20	6.55	5.88	0.31	0.53	3.69	1.01	0.10	0.08	6.8	71.48

Perfil La Cortina, cuenca Río Grande (continuación)					
Horiz	Alo +				
	Alo	Feo	Feo	Sio	RF
	%	%	%	%	%
65	1.03	0.30	1.18	0.11	97
66	1.15	0.36	1.33	0.56	98
67	1.07	0.49	1.31	2.12	96
68	0.43	0.51	0.69	0.23	82
69	0.17	0.37	0.36	0.18	63

Horiz: número de horizonte;
 A: arena; L: limo; R: arcilla; Dap: densidad aparente;
 CO: carbono orgánico; MO: materia orgánica;
 CIC: capacidad de intercambio catiónico;
 SB: saturación de bases; RF: retención de fosfato;
 Alo, Feo, Sio: aluminio, hierro y sílice extraídos con
 oxalato ácido.

Perfil La Ciénega, cuenca Huertitas							
Horiz		Prof	Humedad campo	Color			
		cm	%	Seco		Húmedo	
70		0-10	20.05	5YR 4/4	Yellowish red	5YR 3/4	Dark reddish brown
71		10-30	26.88	5YR 4/6	Yellowish red	5YR 3/4	Dark reddish brown
72		30-60	28.26	2.5YR 3/6	Dark red	2.5YR 3/3	Dark reddish brown
73		60-90	37.20	2.5YR 3/6	Dark red	2.5YR 3/3	Dark reddish brown

Perfil La Ciénega, cuenca Huertitas (continuación)											
Horiz	Dap	pH 1:2.5	pH 1:2.5	CO	MO	Bases intercambiables				CIC	SB
		H ₂ O	KCl			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺		
	g*cm ⁻³			%	%	Cmol/Kg					%
70	1.30	5.55	3.91	2.04	3.51	4.01	1.60	0.20	0.03	17.4	33.56
71	1.39	5.80	4.08	2.04	3.51	4.70	2.00	0.34	0.07	16.1	44.25
72	1.56	6.45	5.38	0.44	0.76	5.17	3.08	0.18	0.07	16.5	51.60
73	1.48	6.00	4.32	0.12	0.20	2.39	1.72	0.25	0.10	17.1	26.05

Horiz: número de horizonte; Dap: densidad aparente; CO: carbono orgánico; MO: materia orgánica; CIC: capacidad de intercambio catiónico; SB: saturación de bases.