# UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

AREA AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE**

# "FLUJOS LATERALES DE AGUA EN DOS SUELOS TÍPICOS DE UN BOSQUE PRIMARIO DE MONTAÑA EN LA RESERVA BIOLÓGICA SAN FRANCISCO, EN EL SUR DEL ECUADOR"

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente

Autor*: Luis Balcázar Ordóñez*

Director*: Ing. Carlos Valarezo M., M. Sc.*

Loja-Ecuador

ING. CARLOS VALAREZO M., M. SC.,

INVESTIGADOR DEL ÁREA AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLE DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

CERTIFICA:

Que el presente trabajo de investigación “Flujos Laterales del Agua en Dos Suelos Típicos de un Bosque Primario de Montaña en la Reserva Biológica San Francisco, en el Sur del Ecuador”, previo a la obtención del título de Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, ha sido dirigido y prolijamente revisado, por lo que se autoriza su presentación.

Loja, octubre de 2010

Ing. Carlos Valarezo M., M. Sc.
DIRECTOR DE TESIS

Loja, 7 de octubre de 2010

**Certificación**

Los miembros del tribunal calificador de la tesis “FLUJOS LATERALES DE AGUA EN DOS SUELOS TÍPICOS DE UN BOSQUE PRIMARIO DE MONTAÑA EN LA RESERVA BIOLÓGICA SAN FRANCISCO, EN EL SUR DEL ECUADOR”, de autoría del señor Luis Eduardo Balcázar egresado de la carrera de ingeniería en manejo y conservación del medio ambiente, certifican haber calificado la tesis el día miércoles 6 de octubre del presente año.

Ing. Aníbal González M. Sc.
**PRESIDENTE**

Dr. Nikolay Aguirre Ph.D
**VOCAL**

Ing. Raquel Hernández
**VOCAL**

## *Autoría*

Las conceptualizaciones, resultados, interpretaciones y conclusiones son de propiedad y responsabilidad del autor

*Luis Balcázar*

## Dedicatoria

A Dios por guiarme por el buen camino, a Miriam y Valentina, a mis padres Esmeralda y Amilcar, a mi hermana Gina y su familia, al resto de mis familiares, en especial a mis abuelitos Julia, Amada, Miguel y Elías † que está en el Cielo.

A todos mis amigos, en especial a Los Insurex y los inolvidables Chepos

A todos mis compañeros, en especial a Gabriel, Ximena, Henry, Natalia, Lucho, Johana, Marlon [2], Gabi, Suco L, Yony M, Mamisho, Yadira, Diego, Carlos, Rosa, Alex, Chiquis, y Willrodsem por su amistad y los grandes momentos compartidos en la Universidad.

# Agradecimientos

A la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Loja, a la Fundación Alemana para la investigación, Al grupo de Investigación del Profesor Bernard Huwe especialmente al Doctor Folkert Bauer por compartir sus conocimientos en la investigación y por la amistad brindada, un reconocimiento especial al Ing. Carlos Valarezo por tomar con responsabilidad la dirección de esta Tesis. A todos los que forman parte de la Estación Científica San Francisco. A las personas que me ayudaron en la fase de campo: Tito Ramírez, Fabián Tamayo, Franz Pucha, Johana Saritama, Lenin Salinas y Fidel Iñiguez, a todos ellos les recalco mi más sincero agradecimiento.

**ÍNDICES DE CONTENIDOS**


**SUMMARY** ..... **14**

**RESUMEN** ..... **15**

**1 INTRODUCCIÓN** ..... **17**

**2 REVISIÓN DE LITERATURA** ..... **19**

2.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA ($K_{SAT}$) ..... 19
2.1.1. Métodos de medición de la $K_{sat}$ ..... 20
2.1.1.1 Métodos de campo ..... 20
▪ El Amoozemeter ..... 21
2.1.1.2 Métodos de laboratorio ..... 21
2.2. PROCEDIMIENTOS PARA ESTUDIAR LA DINÁMICA DEL AGUA EN LOS SUELOS . 21
2.3. PROCESOS DE ESCURRIMIENTO DEL AGUA EN LOS BOSQUES DE MONTAÑA ..... 22
2.3.1. Flujo superficial ..... 23
2.3.2. Flujo subsuperficial ..... 24
▪ Flujo a través de la matriz, (c) ..... 24
▪ Flujo por macroporos, (d) ..... 24
▪ Canales paralelos a la pendiente (tubos o pipes), (e) ..... 24
▪ Capas de suelo con alta permeabilidad, (f) ..... 25
▪ Flujo de retorno, (g) ..... 25
▪ Percolación profunda “DP”, (h) ..... 25
2.4. POTENCIAL DEL AGUA DEL SUELO ..... 25
2.4.1. Componentes del potencial total del agua en el suelo ( $\psi t$) ..... 26
2.4.1.1 Potencial de presión ..... 26
2.4.1.2 El potencial osmótico ($\psi o$) ..... 27
2.4.1.3 EL potencial hidráulico ($\psi h$) ..... 27
2.5. UNIDADES DEL POTENCIAL DE AGUA ..... 27
2.6. CURVA DE RETENCIÓN DEL AGUA DEL SUELO O CURVA PF ..... 28
2.7. SUELOS TÍPICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO ..... 30
2.7.1. Suelos Cambisoles (CM) ..... 30

2.7.2. Gleysoles (GL) ..... 30
2.8. MODELO HYDRUS 2D ..... 31
2.9. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN DE R PARA ANÁLISIS DE DATOS Y GRÁFICOS ..... 32
2.9.1. Random Fields ..... 33

**3 MATERIALES Y MÉTODOS ..... 34**

3.1. ÁREA DE ESTUDIO ..... 34
3.1.1. Cobertura Vegetal ..... 34
3.1.2. Clima ..... 35
3.1.3. Geología ..... 36
3.1.4. Suelos ..... 36
3.2. MATERIALES ..... 36
3.2.1. Materiales de campo ..... 36
3.2.2. Materiales de laboratorio ..... 37
3.2.3. Materiales de oficina ..... 37
3.3. MÉTODOS ..... 37
3.3.1. Determinación de la conductividad hidráulica saturada ..... 38
3.3.1.1 Cálculo de la $K_{sat}$ ..... 40
3.3.1.2 Modelo de la variabilidad espacial de la $K_{sat}$ ..... 42
3.3.2. Caracterización de los Flujos laterales ..... 43
3.3.2.1 Trabajo de laboratorio ..... 44
3.3.3.1.1. Procesamiento de las imágenes ..... 44
3.3.3.1.2. Determinación de la curva de retención del agua ..... 45
3.3.3.1.3. Análisis de textura y pF 4,2 ..... 47
3.3.3. Parámetros físicos del suelo. ..... 47
3.3.4. Modelo en Hydrus-2D ..... 48

**4 RESULTADOS ..... 49**

4.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LOS SUELOS DE LA MICROCUENCA MC3 ..... 49
4.1.1. Características físicas y Conductividad hidráulica de los Cambisoles ..... 50
4.1.1.1 Crestas ..... 50
Características físicas de los suelos de las crestas ..... 50

Conductividad hidráulica de los suelos de las crestas ..... 52
4.1.2. Valles ..... 52
Características físicas de los suelos de los flancos de los valles ..... 52
Conductividad hidráulica de los flancos de los valles ..... 53
4.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DE LOS GLEYSOLES: PLATAFORMA ..... 54
4.2.1. Características físicas ..... 54
4.2.2. Conductividad hidráulica ..... 56
4.3. VARIABILIDAD DE LA $K_{SAT}$ ..... 56
4.4. RUTAS PREFERENCIALES DEL AGUA EN LOS EXPERIMENTOS A ESCALA DE PARCELA (EEP) DE LOS GLEYSOLES (PLATAFORMA) DE LA MC3. ..... 57
4.4.1. Modelamiento de los flujos de agua de la MC3 ..... 61
4.4.1.1 Curva pF y parámetros de Mualem Van-Genuchten ..... 63
4.4.1.2 Características físicas del suelo de un perfil representativo de la Plataforma (Gleysol) ..... 65
4.5. COMPARACIÓN DE LOS SUELOS ESTUDIADOS ..... 68
4.5.1. Comparacion de la Conductividad hidraulica saturada de los suelos de MC2 y MC3 ..... 68
4.5.2. Comparación de las rutas preferenciales del agua en EEP de los Cambisoles de la MC1 y MC2 y Gleysoles de la MC3. ..... 71
4.5.3. Comparación de los flujos de agua entre Cambisoles (MC1 y MC2) y Gleysoles (MC3) ..... 72
4.5.4. Modelaje del flujo de agua en Hydrus 2D para la microcuenca MC2 ..... 73

**5 DISCUSIÓN ..... 75**

**6 CONCLUSIONES ..... 78**

**7 RECOMENDACIONES ..... 79**

**8 BIBLIOGRAFÍA ..... 80**

**ANEXOS ..... 86**

**ÍNDICE FIGURAS**

Figura 1. Procesos de escurrimiento en pendientes de montaña Scherrer (1997), modificado por Schmocker-Fackel (2004) ..... 23

Figura 2. Curvas de retención de agua para suelos arcillo limoso y franco arenoso medidos en θv (%.-Vol.) relacionados a diferentes valores de presión (pF). CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, AA = agua aprovechable, VA = volumen de agua aprovechable (Valarezo et al., 1998) ..... 29

Figura 3. Área del Bosque San Francisco y microcuencas de estudio: Microcuencas MC1, MC2 y MC3, (fuente: Wilcke, 2004). ..... 35

Figura 4. Promedio y desviación estándar de las profundidades de las mediciones de la Conductividad Hidráulica Saturada. ..... 38

Figura 5. Componentes del Amoozemeter y medición de la $K_{sat}$ en el campo, donde D es la distancia entre el fondo del hoyo y el nivel de referencia, h1 es la presión inversa a d, H es la carga hidráulica. ..... 39

Figura 6. Esquema de una sección transversal de un hoyo, siendo H y r la carga hidráulica y el radio respectivamente y s la distancia entre el fondo del hoyo y una capa impermeable del suelo. ..... 41

Figura 7. Irrigación del colorante Brilliant Blue en una de las parcelas. Se muestra la irrigación del marcador con un irrigador lineal estático, la línea de irrigación y el área de excavación. ..... 44

Figura 8. Secuencia de la edición de las imágenes. A) Foto sin editar dentro del marco metálico y las tablas de colores. B) Corrección por la distorsión

del lente de la cámara. C) Perspectiva de los colores. D) Imagen en colores binarios (NN-BB).....45

Figura 9. Esquema de los dos métodos utilizados para la succión del agua en las muestras de suelo, A) presión de la columna de agua en placas semiporosas, y B) cámara a presión (Huwe, 1998) .....46

Figura 10. Ajuste del modelo en Hydrus 2D, en la interfaz de pre-procesamiento..48

Figura 11. Conductividad hidráulica saturada y tendencia de los valores medios en relación a la profundidad para los tres sitios de experimentación, A) Valles, B) Crestas y C) Plataforma.....49

Figura 12. Perfiles donde se observa capas impermeables en los Gleysoles de la Plataforma a 2000 m snm. .....56

Figura 13. Randomización de la $K_{sat}$ para el modelo implementado en la plataforma para el horizonte A (izquierda) y B (derecha).....57

Figura 14. Perfil de un suelo a 2200 m snm. marcado con el Brilliant Blue después de 14 horas de la irrigación .....58

Figura 15. Perfiles de seis calicatas (M1-M6) a > 2000 m snm. en la Plataforma...59

Figura 16. Imágenes BB-NN (NN = pixeles marcados por el colorante y BB = pixeles de otro color), se muestra la secuencia de las imágenes cada 20 cm. .....60

Figura 17. Canales y tubos del suelo A) Raíces vivas, B) Materia orgánica de raíces muertas a 60-80 cm de profundidad, C) Tubos parales a la superficie, D) Huecos. .....61

Figura 18. Velocidad [$cm.h^{-1}$] del flujo de agua y la precipitación [$mm.h^{-1}$] para un escenario de 11560 horas. A) escurrimiento del agua modelado después

de 14 horas de haber cesado la irrigación. B) después de 24 horas. C) después de 72 horas. ..... 62

Figura 19. Flujos de agua a 70 cm de profundidad por la presencia de raíces ..... 63

Figura 20. Curvas de pF para los horizontes O, A, B. ..... 64

Figura 21. Diagramas de caja para (M1) a 2000 m snm. A) textura y B) densidad aparente. ..... 67

Figura 22. Valores $\log K_{sat}$ de las microcuencas MC2 y MC3 ..... 70

Figura 23. Flujo vertical del agua en un Cambisol de la MC1 (Viñan, 2009) ..... 71

Figura 24. Flujos verticales del agua en un Cambisol con características esqueléticas en la MC2 (Bogner et al., 2008) ..... 72

Figura 25. Flujo vertical y lateral modelados en Hydrus 2D, A) Gleysol, pendiente = 12 % y B) Cambisol, pendiente = 77 % ..... 73

Figura 26. Modelo generado para la microcuenca Quebrada Dos (MC2) ..... 74

**ÍNDICE DE CUADROS**

Cuadro 1. Rango para la Interpretación de la conductividad hidráulica saturada en distintas escalas de medición (SSDS, 1993).....20

Cuadro 2. Valores de la presión de la columna de agua [cm] y los valores correspondientes a pF y el tiempo transcurrido para la medición en placas semiporosas.....46

Cuadro 3. Características físicas y conductividad hidráulica saturada de las crestas de los Cambisoles.....50

Cuadro 4. Características físicas y conductividad hidráulica de los flancos de los valles de los Cambisoles.....52

Cuadro 5. Características físicas y conductividad hidráulica de los Gleysoles de la Plataforma.....54

Cuadro 6. Parámetros de van-Genuchten Mualem para un suelo representativo de la Plataforma.....63

Cuadro 7. Características físicas de un suelo de la Plataforma a 2000 m snm. .....66

Cuadro 8. Descripción estadística de $\log K_{sat}$ para la microcuenca (MC2) y microcuenca (MC3).....69

## SUMMARY

This Investigation was developed in the Forest of the San Francisco Scientific Stations (ECSF) found in the Eastern Andes of southern Ecuador, in the micro-hollow "Quebrada Tres (MC3" in the same way as the studies of Quebrada One and Two (MC1 and MC2) carried out by other investigators. The hydraulic conductivity (Ksat) measured 70 points of the MC3 with the Amoozemeter (constant-head permeameter) in the ridge of moderate (mountain shoulders) and ravine or flanks of the valleys with Cambisols, and raised earth platforms for the Gleysols. In addition, preferential water flows were observed in the six experiments at plot level (EEP) in the Gleysols, using a Brilliant Blue FCF tracer. In inch EEP attest pit was opened and very 20 centimeters, 10 test pit profiles were opened. Photographs were taken and in one of them the profile was characterized, unaltered and altered samples were collected for laboratory analysis. The photographs were edited and images in binary colors were obtained (NN-BB). With the analyses of the physical properties of the soil, a model in Hydrus 2D was carried out; in addition, in Random-Fields using R program the scaling factors of the Ksat were obtained and space variability of the saturated hydraulic conductivity was determined.

The results indicated that the Ksat is greater in the flanks of valleys and diminish with depth. However, in the ridge and the platforms the Ksat varies with the depth, which can be attributed to the physical properties of the Cambisols of the ridge and soil channels of the Gleysols. The sequence of images NN-BB demonstrated superficial lateral flow in the interface of the organic horizon and 10 cm of the mineral ground. The flows modeled in Hydrus 2D were adjusted to the observed flows in the experiments with the Brilliant Blue. The Ksat reading of micro-hollows MC2 and MC3 were different according to the soil type, but the depth is prerequisite to reduce this when there are heterogeneous soils on gentle slopes. Finally, the preferential flows respond to the structure, texture, bulk density and the presence of impermeable layers and content of stone and roots.

## RESUMEN

La investigación se desarrolló en el Bosque de la Estación Científica San Francisco (ECSF) ubicada en los Andes Orientales del sur del Ecuador, en la microcuenca Quebrada Tres (MC3), comparativamente con los estudios de las Quebradas Uno y Dos (MC1 y MC2) realizados por otros investigadores. Se midió la conductividad hidráulica saturada ($K_{sat}$) en 70 puntos de la MC3 con el amoozemeter (permeámetro de carga constante) en las crestas (hombros de montaña) y valles o flancos de los valles para los Cambisoles, y plataforma para los Gleysoles. Además se observaron los flujos preferenciales del agua en seis experimentos a escala de parcela (EEP) en los Gleysoles, utilizando el marcador Brilliant Blue FCF. En cada EEP se abrió una calicata y secuencialmente cada 20 cm se abrieron 10 perfiles, se tomaron fotografías en cada perfil y en uno de ellos se caracterizó el suelo, se colectaron muestras inalteradas y alteradas para los análisis de laboratorio. Las fotografías se editaron y se obtuvieron imágenes en colores binarios (NN-BB). Con los análisis de las propiedades físicas del suelo se implementó un modelo en Hydrus 2D; además, en Random-Fields del programa R se obtuvieron los factores de escala de la $K_{sat}$ y se determinó la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada.

Los resultados indicaron que la $K_{sat}$ es mayor en los flancos de los valles y disminuye con la profundidad, en cambio en las crestas y la plataforma la $K_{sat}$ varía con la profundidad, lo cual se atribuye a las propiedades físicas de los Cambisoles de las Crestas y los canales del suelo de los Gleysoles. La secuencia de las imágenes NN-BB evidenció que existe un flujo lateral subsuperficial en el interfaz del horizonte orgánico y -10 cm del suelo mineral. Los flujos modelados en Hydrus 2D se ajustaron a los flujos observados en los experimentos con el Brilliant Blue. La $K_{sat}$ de las microcuencas MC2 y MC3, fue distinta según el tipo de suelo, sin que la profundidad sea prerequisito para que disminuya ésta cuando se tiene suelos heterogéneos en pendientes ligeras. Finalmente, los flujos preferenciales responden

a la estructura, la textura, la densidad aparente, a la presencia de capas impermeables y al contenido de piedras y raíces.

# 1 INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales de montaña regulan el ciclo hidrológico en las áreas altas, reduciendo el peligro de inundación en las áreas bajas y valles, a menudo densamente pobladas (Goller et al., 2005). Adicionalmente, los bosques inalterados de montaña constituyen fuentes constantes y seguras de agua para la población local. Para evaluar el estado y conservación de los bosques, los investigadores modernos ponen énfasis en partir de estudios hidrológicos para predecir los cambios en los ambientes perturbados y no perturbados de los ecosistemas de montaña. Los suelos actúan como filtros y pueden atrapar contaminantes en la matriz del suelo reduciendo la contaminación del agua subterránea (Kim et al., 2004). Sin embargo el flujo preferencial del agua y los canales del suelo pueden conducir los contaminantes rápidamente hacia las aguas subterráneas (Flury et al., 1994). La ocurrencia de interflujos rápidos es un fenómeno frecuente en las laderas escarpadas de los bosques (Casper, 2002), lo cual principalmente se atribuye al alto contenido de macroporos en los suelos de tales tipos de captaciones (Buttle y McDonald, 2000). Bogner et al. (2008), en un Cambisol con características esqueléticas visualizó flujos verticales del agua en una área del bosque primario de la reserva San francisco.

Como complemento a los estudios de Bogner et al. (2008) y Bauer et al. (en preparación) se ejecutó el proyecto de Investigación “Flujos Laterales del Agua en dos Suelos Típicos de un Bosque Primario de Montaña en la Reserva Biológica San Francisco, en el Sur del Ecuador” como base para desarrollar modelos de escurrimiento de cuencas de alta montaña. La investigación es parte del proyecto “B 2.2 Física de Suelos e Hidrología de Pendientes”, que lo ejecutan la Universidad de Bayreuth, Alemania y la Universidad Nacional de Loja, donde se desarrolla la unidad 816 auspiciada por la Fundación Alemana para la

Investigación (DFG) para el estudio de la “Biodiversidad y Manejo Sustentable de la Megadiversidad en Ecosistemas de Montaña en el Sur del Ecuador”.

El objetivo de la investigación fue determinar los flujos laterales en dos tipos de suelos en un bosque primario de la reserva biológica San Francisco, como base para caracterizar la dinámica del agua en microcuencas de montañas tropicales.

Los objetivos específicos fueron:

- Determinar la conductividad hidráulica saturada ($K_{sat}$) y las características físicas de los suelos Cambisoles y Gleysoles a distintas profundidades
- Establecer la ruta preferencial del agua en cada tipo de suelo y su relación cuantitativa con las condiciones físicas.
- Comparar los flujos de agua en los suelos seleccionados.

Los estudios de campo se desarrollaron en el periodo febrero de 2008 a marzo de 2009.

# 2 REVISIÓN DE LITERATURA

## 2.1. Conductividad hidráulica saturada ($k_{sat}$)

La conductividad hidráulica ($K_{sat}$) es la habilidad del suelo saturado para permitir el paso de agua a través de sí. Es una función de las características intrínsecas de la matriz del suelo y de las propiedades del fluido contenido en dicho suelo. También se la define como el factor de proporcionalidad de la Ley de Darcy (Forsythe, 1975). La $K_{sat}$ puede también proveer información indirecta en cuanto a la estructura y estabilidad del suelo, así como, correlacionarse con sus propiedades físicas. (Bastos y Oliveira, 2003)

Darcy, quien observó que la cantidad de agua [$L^3$] que fluye a través de una muestra de arena por unidad de tiempo [T], en otras palabras la cantidad de flujo o la descarga, era proporcional a la diferencia de las cargas de fluido (Ah) en las superficies de entrada y salida de la muestra, es decir la pérdida de carga Ah = $h_1$ - $h_2$ es inversamente proporcional a la longitud de la muestra de arena o trayectoria del flujo. Esta proporcionalidad puede expresarse matemáticamente como:

$$Q = K\frac{Ah}{L}A \qquad (1)$$

Donde:

Q = La cantidad de flujo a través de la muestra [$L^3.T^{-1}$]

Ah = Pérdida de carga [L]

L = Longitud de la muestra [L]

A = Superficie de la sección transversal del tubo [$L^2$]

K = Constante de proporcionalidad, que depende de la naturaleza de la matriz del suelo, textura, estructura, contenido de piedras y raíces y del fluido [$L.T^{-1}$]

Para calificar la conductividad hidráulica saturada ($K_{sat}$) se utiliza la clasificación de la Soil Survey Division Staff (SSDS) de los EEUU.

Cuadro 1. Rango para la Interpretación de la conductividad hidráulica saturada en distintas escalas de medición (SSDS, 1993)

| Clase | Rango de valores (Ksat) | | |
|---|---|---|---|
| | um.s-1 | mm. h-1 | m.día-1 |
| Muy alta | >100 | >360 | >864 |
| Alta | 10 - 100 | 36 - 360 | 86.4 - 864 |
| Moderadamente alta | 1 - 10 | 3.6 - 36 | 8.64 - 86.4 |
| Moderadamente baja | 0.1 - 1 | 0.36 - 3.6 | 0.864 - 8.64 |
| Baja | 0.01 - 0.1 | 0.036 - 0.36 | 0.0864 - 0.864 |
| Muy baja | <0.01 | <0.036 | <0.0864 |

um: microsimen

### 2.1.1. Métodos de medición de la $K_{sat}$

Existen un sinnúmero de metodologías para determinar la conductividad hidráulica saturada. La $K_{sat}$ se puede medir en el campo como en el laboratorio, en el campo puede ser sobre o bajo la tabla de agua.

#### 2.1.1.1 Métodos de campo

Existen algunos permeámetros como: permeámetro de Guelph (método de dos cargas hidráulicas, Philip-Dunne (método automatizado), Amoozemeter (carga hidráulica constante) entre otros.

- **El Amoozemeter**

El Amoozemeter es un equipo que permite medir *in situ* la conductividad hidráulica saturada del suelo [$mm.h^{-1}$, $cm.h^{-1}$]. Consta de dos reservorios de agua, uno de almacenamiento (4 litros) y otro de medida graduado en milímetros, y, de cuatro tubos de 50 cm de presión (carga constante) que conectados entre sí suman una tensión inversa a la producida por la presión de agua que disipa en el hoyo de la medición hasta 200 cm de profundidad. El primer tubo de carga constante tiene un pequeño tubo ajustable (entrada de aire) para presiones menores a 50 cm. Para mayores profundidades por ejemplo 120 cm [tubo 2 + tubo 3 + 20 cm del tubo ajustable].

Teniendo en cuenta las condiciones topográficas del terreno, el amoozemeter es el instrumento que facilita la medición de la $K_{sat}$ en el campo. El peso y el tamaño son adecuados para la transportación en un ecosistema montañoso.

#### 2.1.1.2 Métodos de laboratorio

Entre los métodos más conocidos están los de carga constante para suelos de alta permeabilidad como arenas y gravas, los permeámetros de carga variable para determinar suelos de baja permeabilidad tales como limos y arcillas.

## 2.2. Procedimientos Para Estudiar la Dinámica del Agua en los Suelos

Para comprender la dinámica del agua en los Bosques de Montaña se emplean equipos de campo simples y sofisticados, herramientas de computación, y sustancias químicas contaminantes y no contaminantes que permiten dar seguimiento al agua. Por ejemplo el Brilliant Blue FCF, es un marcador de suelo no contaminante de buena visibilidad y no es absorbido rápidamente por los suelos (Flury y Fluhler, 1994; Ohrstrom et al., 2003; Kim et al., 2004).

La entrada de agua en los bosques tropicales de montaña procede de la precipitación vertical, horizontal y de neblina (Bendix et al., 2004). Una parte del agua se evapora mientras llueve, otra se intercepta en la vegetación donde puede tomar varios rumbos: evaporarse, precipitarse bajo el dosel; o producir un flujo a través del tallo (Fleischbein et al., 2006), el agua restante impacta directamente en la superficie del suelo. Una vez que el agua llega al suelo se puede escurrir sobre la superficie, infiltrarse hacia capas subyacentes (Bruijnzeel, 1990; Bonell 1988) y/o producir perdidas por evaporación (Bruijnzeel, 2000) y evapotranspiración.

Para cuantificar los procesos de escurrimiento del agua se hacen mediciones directas de las variables del agua y el suelo, por ejemplo la conductividad hidráulica saturada ($K_{sat}$), la tensión y la humedad. En base a la conductividad hidráulica se estiman otras variables no conocidas a través de modelos matemáticos de simulación hidrológica.

## 2.3. Procesos de escurrimiento del agua en los bosques de montaña

Los bosques tropicales de montaña regulan el ciclo hidrológico en las áreas altas, reduciendo el peligro de inundación en las áreas bajas y valles, a menudo densamente pobladas. Adicionalmente, los bosques inalterados de montaña constituyen fuentes constantes y seguras de agua para la población local Daugherty (1973); Stadtmüller (1987); Goller et al. (2005).

En la (Figura 1) se muestra un modelo de escurrimiento de Scherrer (1997) modificado por Schmocker-Fackel (2004) para los procesos de escurrimiento del agua en vertientes de los bosques de montaña.

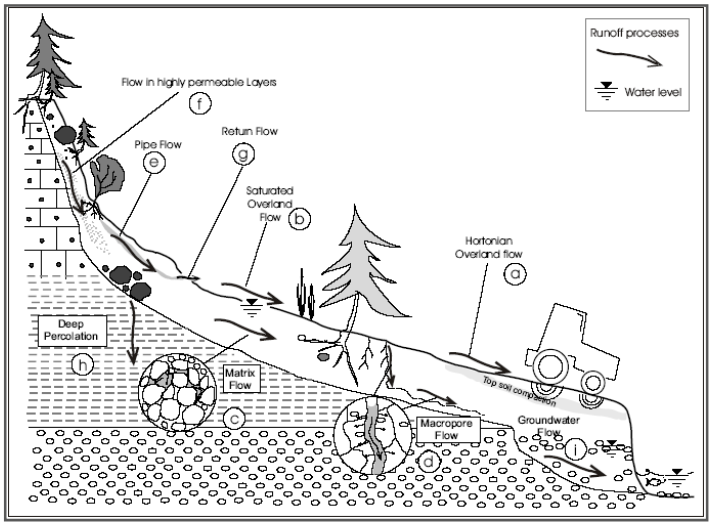



Figura 1. Procesos de escurrimiento en pendientes de montaña Scherrer (1997), modificado por Schmocker-Fackel (2004)

El escurrimiento del agua en el suelo está determinado por los flujos: superficial y subsuperficial. El escurrimiento del agua depende de las características del suelo como la macroporosidad, permeabilidad de la matriz del suelo, topografía y vegetación, (Schmocker-Fackel, 2004)

### 2.3.1. Flujo superficial

**Flujo hortoniano sobre la superficie "HOF", (a)**

También llamado exceso de infiltración sobre la superficie, ocurre si la intensidad de precipitación excede la capacidad de infiltración o en el caso de impermeabilidad o baja permeabilidad del suelo (Horton, 1933) citado por (Schmocker-Fackel, 2004).

**Flujo sobre la superficie saturada "SOF", (b)**

Después de que el suelo ha sido saturado la infiltración ya no es posible y la precipitación posterior produce un flujo sobre la superficie (Kirkby & Chorly, 1967); citado por (Schmocker-Fackel, 2004).

### 2.3.2. Flujo subsuperficial

El agua que infiltra dentro del suelo de cualquier manera es almacenado o transportado como **flujo lateral** o **vertical**, los procesos de los flujos se distinguen por:

- **Flujo a través de la matriz, (c)**

Es el flujo del agua a través de micro y meso poros del suelo, conducidos por fuerzas capilares y diferencias de cargas de potencial.

- **Flujo por macroporos, (d)**

Es un flujo vertical conducido por fuerzas de gravitación como estructuras características en los suelos como huecos hechos por lombrices, canales de raíces y grietas

- **Canales paralelos a la pendiente (tubos o pipes), (e)**

Permiten un flujo lateral en el suelo, hechos por madrigueras de animales, canales de raíces muertas y erosión del subsuelo. Un flujo rápido y efectivo en tubos o sobre capas impermeables es llamado flujo de tormenta subsuperficial SSF (Schmocker-Fackel, 2004)

- **Capas de suelo con alta permeabilidad, (f)**

También, capas geológicas subterráneas sobre capas con reducida permeabilidad que permiten un flujo lateral. Con el tiempo la permeabilidad de las capas pueden incrementar con la erosión del material fino del suelo.

- **Flujo de retorno, (g)**

Es un flujo subterráneo que emerge hacia la superficie del suelo (Dunne y Black, 1970b) citado por (Schmocker-Fackel, 2004).

- **Percolación profunda "DP", (h)**

Se define cuando el agua percola a través del suelo hacia las capas geológicas y la contribución pausada hacia **aguas subterráneas (i)**

## 2.4. Potencial del Agua del Suelo

El agua del suelo siempre se encuentra en movimiento gracias a la variación de su potencial o energía, y es más importante *que la cantidad misma del agua en el suelo*. La matriz del suelo condiciona como se mueve el agua y como las raíces acceden a ella. Las partículas de la matriz del suelo retienen naturalmente el agua en su superficie, en sus capilares o poros. Cuando el suelo se encuentra saturado el agua se aloja en los macroporos, el agua puede fluir libremente y las raíces pueden obtenerla fácilmente. Cuando el suelo se seca, el agua que queda en el suelo está retenida con mayor fuerza en los capilares de menor tamaño.

Los potenciales más importantes son: a) las fuerzas derivadas de la interacción del agua con las partículas sólidas del suelo o potencial mátrico, b) las fuerzas de interacción agua-molécula en solución o potencial osmótico, y c) las fuerzas del campo gravitatorio o potencial gravitacional (Muñoz y Rodríguez, 2002)

### 2.4.1. Componentes del potencial total del agua en el suelo ( $\psi_t$)

El potencial total del agua del suelo, es la suma de todas las fuerzas que interactúan en el agua (Valarezo et al., 1998)

$$\psi_t = \psi_g + \psi_m + \psi_o \qquad (3)$$

Donde:

$\psi_t$ = Potencial total

$\psi_g$ = Potencial gravitacional

$\psi_{\mathrm{m}}$ = Potencial mátrico

$\psi_o$ = Potencial osmótico

#### 2.4.1.1 Potencial de presión

Para simplificar, el potencial de presión incluye los dos casos: el **potencial mátrico** (que se da en *condiciones de no saturación* y que corresponde a una tensión o presión negativa) y el **potencial hidrostático** o **de presión** propiamente (que se da en *condiciones de saturación*) que depende de la altura de la columna de agua que gravita sobre el punto produciendo una presión positiva (**potencial gravitacional)** En ambos casos, la manera más corriente de expresar este potencial de presión es unidades de presión o altura de agua.

El **potencial mátrico** se lo considera negativo, dado a que se opone a las fuerzas gravitacionales. El potencial de presión también llamado succión de agua *h* y describe como succión de presión:

$$h = |-\psi_m| \qquad (4)$$

Otra alternativa para describir el potencial matricial es el *valor del pF*. Esto es, el logaritmo de base diez de la succión de agua en unidades energía/peso (Valarezo et al., 1998)

$$pF = log_{10}|-\psi_m| = log_{10}(h) \qquad (5)$$

#### 2.4.1.2 El potencial osmótico ($\psi_o$)

Este componente es debido al efecto que los solutos tienen sobre la energía de las moléculas de agua. Expresado como energía por unidad de volumen, potencial osmótico es:

$$\Phi = -mRT \qquad (6)$$

Donde

*m* = Molalidad de la solución

*R* = Constante general de los gases

*T* = Temperatura absoluta en grados Kelvin.

#### 2.4.1.3 EL potencial hidráulico ($\psi_h$)

Es la combinación de los potenciales de presión mátrico y gravitacional, que se utilizada en el estudio del flujo del agua, por cuanto, constituye el potencial que actúa como fuerza motora (Valarezo et al., 1998).

## 2.5. Unidades del potencial de agua

Según la definición de potencial las unidades son de [energía/masa], es decir, en el sistema MKSA: J/kg. Sin embargo, debido a que la densidad del agua es la unidad, es más corriente usar unidades de [energía/volumen], que numéricamente

son las mismas que las anteriores (excepto por el factor mil, ya que $m^3 \approx 10^3$ kg). La ventaja de operar con $J/m^3 = N/m^2 = Pa$ es que son unidades de presión, conceptualmente más cómodas de emplear.

Otras veces se utilizan unidades de energía/peso que equivalen a una longitud (altura de la columna de gua). En estas unidades se tiene que 1 bar = $10^5$ Pa = 10 m de columna de agua (1000 cm $H_2O$) ≈ 76 cm Hg (Muñoz y Rodríguez, 2002).

## 2.6. Curva de retención del agua del suelo o curva pF

La pendiente de la curva de retención del agua del suelo, que es el **cambio del potencial mátrico**, por unidad de cambio del contenido de agua, se la conoce como capacidad diferencial del agua *C* (Valarezo et al., 1998). También se la conoce como curva característica del suelo o pF (potencial de agua libre). Matemáticamente la curva pF representa la relación entre la carga de presión negativa [hPa] y el contenido de humedad del suelo [%.-Vol.]

$$C = \frac{\delta\psi}{\delta\theta} \qquad (2)$$

El trabajo necesario para extraer el agua del suelo será numéricamente igual, con signo negativo al **potencial del agua del suelo**. Cada suelo se caracteriza por tener una relación diferente entre el contenido de agua y el trabajo necesario para extraer un pequeño incremento de agua. Es decir que cuando el potencial de presión cambia también varía en el contenido de humedad del suelo.

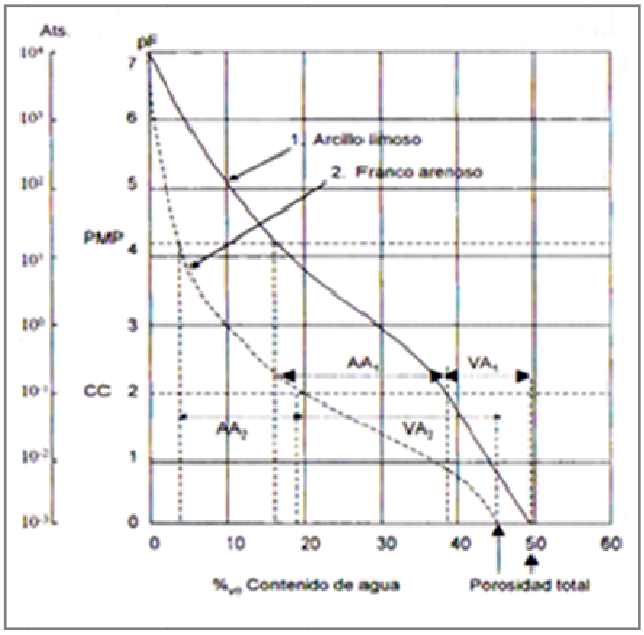



Figura 2. Curvas de retención de agua para suelos arcillo limoso y franco arenoso medidos en θv (%.-Vol.) relacionados a diferentes valores de presión (pF). CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, AA = agua aprovechable, VA = volumen de agua aprovechable (Valarezo et al., 1998)

Después de someter una muestra de suelo a cierta carga de presión (succión), se puede determinar al momento del equilibrio el contenido de humedad. Aplicando diferentes cargas de presión, paso a paso, se obtiene una curva (Figura 2) que relaciona la carga de presión (h) frente al contenido de humedad ($\theta_v$). El rango de cargas de presión varía desde 0 para condiciones de saturación, a $10^{-7}$ para suelo seco a la estufa (Valarezo et al., 1998).

## 2.7. Suelos Típicos del Área de estudio

### 2.7.1. Suelos Cambisoles (CM)

Proviene del latín *cambiare*, que significa cambiar. Son suelos con bajo a insipiente formación subsuperficial, con poco desarrollo de horizontes, evidente transformación del material parental desde la formación estructural y principalmente la coloración marrón, incremento en el porcentaje de arcilla.

Los Cambisoles son caracterizados por un bajo efecto del clima en el material parental y por la ausencia de cantidades apreciables de arcilla iluvial, materia orgánica y compuestos de aluminio o hierro. Se encuentran en todos los climas, en tierras bajas y de montaña; en un amplio rango de vegetación. Los Cambisoles de alta montaña son los mejores para bosques forestales. En los trópicos húmedos son comúnmente pobres en nutrientes (IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007)

El perfil de los Cambisoles se caracteriza por meteorización ligera a moderada del material parental y por ausencia de cantidades apreciables de arcilla iluvial, materia orgánica y compuestos de Al y/o Fe.

### 2.7.2. Gleysoles (GL)

Los Gleysoles son suelos de humedales que, a menos que sean drenados, están saturados con agua freática por períodos suficientemente largos para desarrollar un característico *patrón de color* gléyico (IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007). Este patrón está esencialmente hecho de colores rojizos, parduzcos o amarillentos en la cara de los agregados y/o en la capa o capas superficiales del suelo, en combinación con colores grisáceos-azulados en el interior de agregados y/o más profundo en el suelo. Nombres comunes para muchos Gleysoles son: *gley* y *suelos de prados (meadow)* (antigua Unión Soviética); *Gleyzems* (Federación Rusa); *Gleye* (Alemania); *Gleissolos* (Brasil); y *gsuelos con agua freática*

*(groundwater soils)*. Muchos de los Gleysoles de la WRB correlacionan con los subórdenes ácuicos de la Taxonomía de Suelos norteamericana (*Acualfes*, *Acuentes*, *Acueptes*, *Acuoles*, etc).

El perfil presenta evidencia de procesos de reducción con segregación de compuestos de Fe dentro de 50 cm de la superficie del suelo (IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007).

## 2.8. Modelo Hydrus 2D

Es un programa numérico que resuelve la ecuación de Richards (Ecuación 7) para flujos de agua y la ecuación de convección y dispersión de calor y transporte de solutos (Šimůnek et al., 1999). La ecuación de flujo incorpora también un término sumidero para tomar en cuenta el agua absorbida por las raíces de las plantas.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[K\left(K_{ij}^{A}\frac{\partial h}{\partial x_i} + K_{iz}^{A}\right)\right] - S \qquad (7)$$

Donde:

θ = Contenido volumétrico de agua

*h* = Presión matricial

*S* = Volumen de agua absorbida por las raíces de las plantas por unidad de tiempo

*xi* = Coordenada espacial

*t* = Tiempo

*K* = Función de la conductividad hidráulica no saturada.

Hydrus 2D puede ser usado para analizar el movimiento del agua y solutos en medios porosos no saturados, parcialmente saturados o completamente saturados. Este programa incluye un algoritmo de optimización Marquardt-Levenberg el cual permite que varios parámetros no conocidos sean estimados desde observaciones del flujo de agua (Modelación inversa).

La unidad de programación principal de Hydrus 2D, *Graphical User Interface* (GUI), define el ambiente computacional del sistema. Este módulo principal controla la ejecución del programa y determina cuales otros módulos opcionales son necesarios para aplicaciones particulares. El módulo contiene un manejador de proyectos y las unidades de pre-proceso y post-proceso. La unidad de pre-proceso incluye especificaciones de todos los parámetros necesarios para ejecutar Hydrus 2D, como códigos, generador de mallas elementales para dominios bidimensionales y un subprograma (Rosetta) para la generación de las propiedades hidráulicas del suelo desde datos de textura y densidad del suelo. La unidad de post-proceso consiste de simples gráficos *x,* y (*scatterplot*) para la presentación gráfica de las propiedades hidráulicas del suelo (contenido de agua, conductividad hidráulica, capacidad hidráulica, flujo de solutos, etc.); así como, la distribución del tiempo versus variables particulares (drenaje libre, potencial de las raíces en la obtención del agua, conductividad, etc.) Esta unidad incluye también opciones para presentar resultados de una simulación por medio de contornos de mapas, mapas espectrales y vectores de velocidad; y/o animaciones usando mapas de contorno y espectrales (Šimůnek et al., 2006).

## 2.9. Entorno de programación de R para Análisis de Datos y Gráficos

R es un lenguaje de programación (distribuido bajo GNU, licencia libre) que posibilita el almacenamiento, manipulación, análisis y gráficos de datos. R puede definirse como una nueva implementación del lenguaje S desarrollado por AT&T. Además, R es muy utilizado como un programa estadístico, en el cual se han implementado técnicas estadísticas clásicas como modernas incluidas en el

entorno base de R y otras se acompañan en forma de bibliotecas o paquetes "packages" (Venables, 1992). El editor Tinn-R guarda y ejecuta los comandos que se emplean en R, los guarda como un guion o "script" para ser utilizados posteriormente. La implementación de Tinn-R en R es opcional. (Kuhnert y Venables, 2005)

### 2.9.1. Random Fields

Random Fields es un paquete de R. La aplicación de éste es muy usada para simular los procesos naturales como las propiedades que varían espacialmente a escala de metros o centímetros como la permeabilidad por ejemplo. Además es común el uso de Random Fields en la generación de gráficos de computación, especialmente los que simulan las superficies naturales como el agua y el suelo. También, permite modelar campos de variabilidad, incluyendo procesos anisotrópicos. Además algoritmos para condiciones de simulación. Incluye herramientas para el análisis espacial de datos: variogramas empíricos, Kriging, etc.

# 3 MATERIALES Y MÉTODOS

## 3.1. Área de Estudio

La investigación se realizó en la microcuenca Quebrada Tres (MC3) como complemento de los estudios de Bauer et al. (en preparación), y en comparación con los de Bogner et al. (2008) y Zeilinger et al. (2008) de la microcuenca Dos (MC2) y Viñan (2009) de la microcuenca Uno (MC1) en el bosque de la Estación Científica San Francisco (ECSF), ubicado a 30 km en la vía Loja-Zamora en el Sur del Ecuador (4° 00'S y 79° 05'W). La microcuenca de estudio está entre 1900 y 2200 m snm. con 13 ha de extensión (Figura 13).

### 3.1.1. Cobertura Vegetal

La cubierta vegetal del área de estudio se describe como "Bosque Siempreverde Montano" Balslev y Øllgaard (2001). De Acuerdo a la clasificación de Bruijnzeel et al. (2000) corresponde a un Bosque Montano Bajo. En función de la posición del terreno, el rango de altitud y sobre la base de las características estructurales del bosque Paulsch (2002) dividió el área de estudio en bosque de garganta y bosque de lomo.

Las familias de los árboles más importantes del área son Lauraceae, Rubiaceae, Melastomataceae y Euphorbiaceae. El bosque de árboles más altos y más rico en especies se encuentra en las pendientes menos pronunciadas y en las gargantas, en donde el dosel alcanza 25 m con algunos árboles emergentes que llegan hasta 5 m. La flora de piso está dominada por helecho y hierbas grandes (Paulsch, 2002).

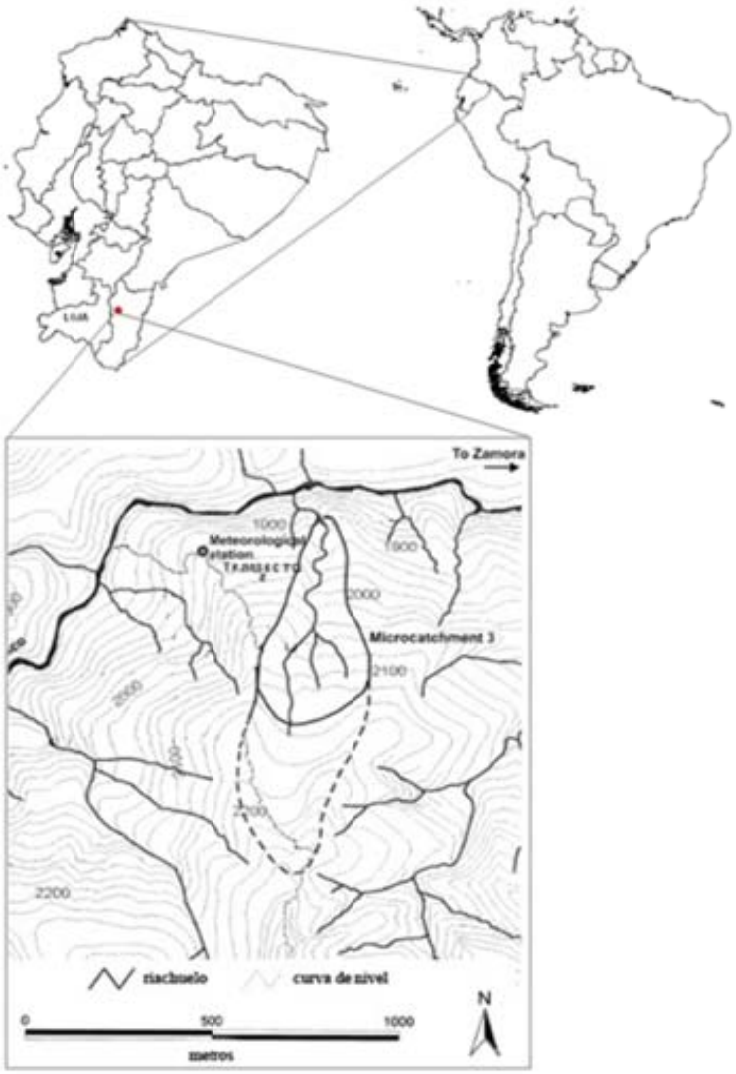



Figura 3. Área del Bosque San Francisco y microcuencas de estudio: Microcuencas MC1, MC2 y MC3, (fuente: Wilcke, 2004).

### 3.1.2. Clima

El clima de la zona del Bosque San Francisco, según la Clasificación de Koeppen (1985) es mesotérmico húmedo. Este clima es propio de la región interandina, la variabilidad de la temperatura anual fluctúa entre los 12 y 18°C, la humedad relativa entre el 70 y 95 %. El promedio anual de precipitación sobrepasa los 2200 mm, medidos entre 1998 al 2005. En inviernos fuertes

ocasionalmente llegan hasta los 4000 mm Rollenbeck (2002). La lluvia se hace presente durante todo el año, con periodos lluviosos que van desde marzo a agosto y periodos menos lluviosos especialmente entre octubre y febrero. El paisaje tiene un aspecto boscoso y cubierto de un verdor permanente.

### 3.1.3. Geología

El material parental de los suelos está constituido por intercapas de filitas, cuarcitas y meta-areniscas del paleozoico (la “Unidad Chiguinda” de la “Serie Zamora” (Hungerbühler, 1997).

### 3.1.4. Suelos

La mayoría de los suelos son franco-esqueléticos, con elevado contenido de mica Yasin (2001) y se han desarrollado en sedimentos superficiales resultantes de derrumbes y posiblemente de flujos periglaciales. El espesor de la capa orgánica fluctúa entre 2 y 43 cm, con un promedio de 16 cm (Wilcke et al., 2001). Según la clasificación de la IUSS Grupo de Trabajo WRB (2007) los suelos de la MC3 pertenecen a los ordenes: Cambisoles y cubren el 60 % de la superficie y los Gleysoles el 40 %. Según la USDA-NRCS (1998) pertenecen a los Inceptisoles, subgrupos: Humic Dystrudepts, Oxiaquic Eutrudepts, Histic Humaquepts; y a Entisoles: Oxyaquic Udipsamments. A la primera clasificación se hará referencia en este trabajo.

## 3.2. Materiales

### 3.2.1. Materiales de campo

Los materiales y equipos utilizados en el campo fueron: Amosímetro (Amoozemeter), 2 bombas hidráulicas (una de 3 Hp) y eléctrica (de 12 V/CA), irrigador lineal estático de seis boquillas, 6 baterías (12 V), cámara digital (Nicon

coolpix 4500), marco metálico de 100 x 100 cm, tabla de colores (RGB y escala de grises), marcador Brilliant Blue FCF, GPS, altímetro, brújula, cilindros de 100 $cm^3$, barrenos cilíndricos de 6 y 10 cm Ø, barreno acanalado 5 cm Ø, carpa plástica de 2 x 2 x 2 m, tanque plástico de 200 litros, tanques de 8 litros, nivel.

### 3.2.2. Materiales de laboratorio

En el laboratorio, los materiales utilizados fueron: Cámaras plásticas con placas semiporosas, cámaras a presión, estufa calibrada a 45 y 105°C, balanza digital, tamiz de 2 mm, tabla de colores munsell, cilindros de 100 $cm^3$, fuentes para cilindros, fundas y marcadores.

### 3.2.3. Materiales de oficina

En el análisis y modelaje de los datos se utilizaron los softwares: Hydrus 2D v. 2.05 desarrollado por "Ground Water Modeling Center Colorado School of Mines", Rosetta Lite v. 1.0, PTLense (Niemann, 2008), HALCON (MVTec Software GmbH 2005), Adobe Photoshop CS2, Office 2007, R v. 2.9.1 y Tinn-R v. 2.2.0.2

## 3.3. Métodos

Para estudiar la dinámica del agua en la microcuenca Quebrada Tres, a nivel de pedón se hicieron 182 mediciones de la conductividad hidráulica del suelo ($K_{sat}$) con un permeámetro de carga hidráulica constante (PCC) y se observaron los flujos preferenciales del agua en 6 experimentos a escala de parcela (EEP).

Los experimentos se hicieron entre febrero de 2008 y marzo de 2009, en intervalos irregulares de tiempo. Además, se tiene datos del clima local de una estación meteorológica ubicada entre las microcuencas MC2 y MC3 a 1950 m snm. (ver Figura 1).

### 3.3.1. Determinación de la conductividad hidráulica saturada

Para las mediciones de la $K_{sat}$ [$mm.h^{-1}$] se utilizó el Amoozemeter (Amoozegar, 1989) un PCC (ver Figura. 5), en hoyos de 6 y 10 cm de diámetro y a profundidades de 15-30, 30-60 y 60-90 cm**, nombrados arbitrariamente como A, B y BC** respetivamente, aunque esto no significa que se trate de horizontes debido a la variabilidad de la profundidad del suelo. En la plataforma la secuencia del perfil es A, E y B.

En los 29 sitios de las crestas se hicieron 77 mediciones de la $K_{sat}$, en 20 sitios de los valles 49 mediciones y en 21 sitios de la plataforma 56 mediciones a una profundidad promedio de A = 23±5, B = 43±9 y C = 64±1 cm (Figura. 4).

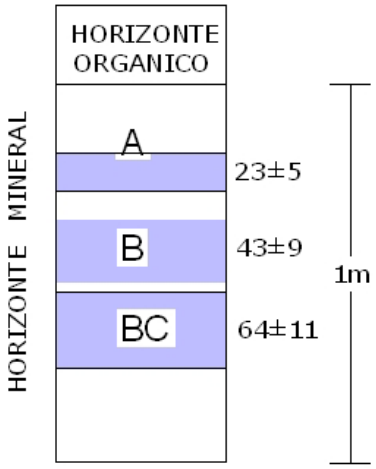



Figura 4. Promedio y desviación estándar de las profundidades de las mediciones de la Conductividad Hidráulica Saturada.

Para los experimentos con el PCC se clasificó el área de estudio de acuerdo a la topografía en: crestas, valles y plataforma. Se nombró como Crestas a la parte alta de las laderas con 15-45 % de pendiente, la parte baja como Valles (≈ 100 %); y, Plataforma a la parte alta de la microcuenca con pendiente menor al 12 %. Los pasos fueron los siguientes:

Primero se tomó una muestra del perfil del suelo con una barreno acanalado, se midió la profundidad y el espesor de cada horizonte y se decidió las profundidades de los hoyos para la medición de la $K_{sat}$, Luego se sacó el mantillo o capa orgánica, se preparó un área de 50 $cm^2$ en el suelo mineral y se perforó con un barreno cilíndrico (Ø = 6 o 10 cm) a la profundidad deseada (ver Figura 4). En una hoja de campo (Anexo 1) se realiza la siguiente operación [profundidad del hoyo más la distancia entre el suelo y el nivel de referencia del amosímetro (d) menos la altura de agua en el hoyo (H), el residuo de esta operación (h1) se gradúa en el primer tubo de carga constante (tubo ajustable de aire), en donde h1 corresponde a d], (Figura 5). De esta manera la presión producida por la manguera de agua en el hoyo queda equilibrada por los tubos de carga contante del amosímetro. Se abre la válvula de agua y se mide el gasto del nivel de agua.

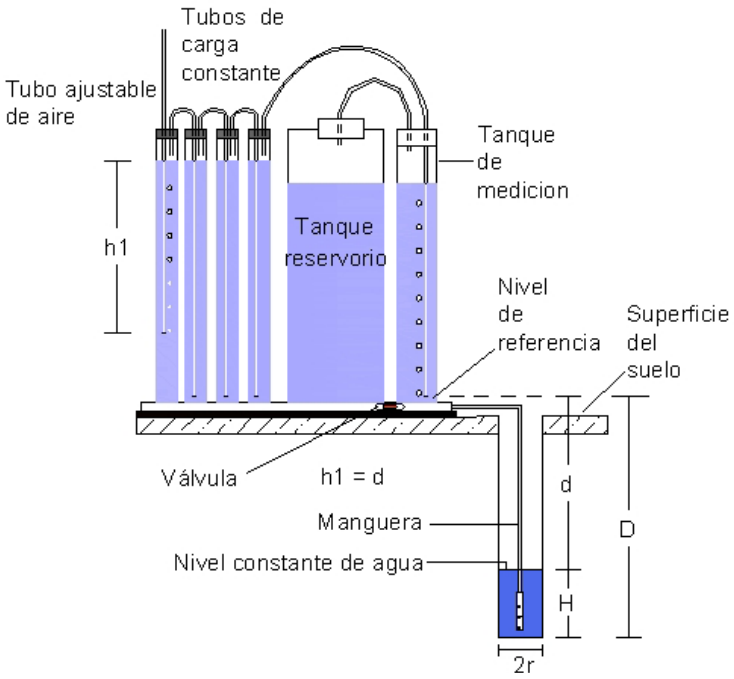



Figura 5. Componentes del Amoozemeter y medición de la $K_{sat}$ en el campo, donde D es la distancia entre el fondo del hoyo y el nivel de referencia, h1 es la presión inversa a d, H es la carga hidráulica.

En cada punto se tomaron en consideración la textura, la humedad, el contenido de piedras y raíces, el color y la consistencia del suelo utilizando la norma alemana DIN y FAO para caracterización de suelos.

Para empezar a medir la $K_{sat}$, el nivel de agua en el hoyo debe llegar hasta el nivel deseado, para verificar la altura del agua en el hoyo se utilizó una regla y un tubo graduado en forma de pipeta.

Para flujos rápidos se utilizó los dos tanques a la vez y se midió la $K_{sat}$ en relación al tiempo (1 min). Cuando se trata de flujos lentos es útil medir únicamente con el tanque de medición en relación al gasto de agua en el tubo milimetrado (1 cm o mm) aunque esto puede llevar mucho tiempo cuando el suelo es poco permeable.

#### 3.3.1.1 Cálculo de la $K_{sat}$

Una ecuación recomendada para calcular la $K_{sat}$ es la solución Glover o "Glover solution", cuando la distancia entre el fondo del hueco y alguna capa impermeable (s en la Figura 6) es ≥ 2H. La *Glover solution* tiene un número de ventajas sobre otros modelos. a) El único parámetro desconocido es la $K_{sat}$. b) es independiente de la textura y estructura del suelo, además no se necesita estimar la textura y estructura para obtener un coeficiente (un factor constante) para determinar la $K_{sat}$. c) Se requiere solamente de una medida teniendo en cuenta el nivel constante de agua en el hoyo. Además puede ser fácilmente evaluado, es independiente del agua y el radio del hoyo (H y r, respectivamente) y del caudal (Q) (Amoozegar, 1989).

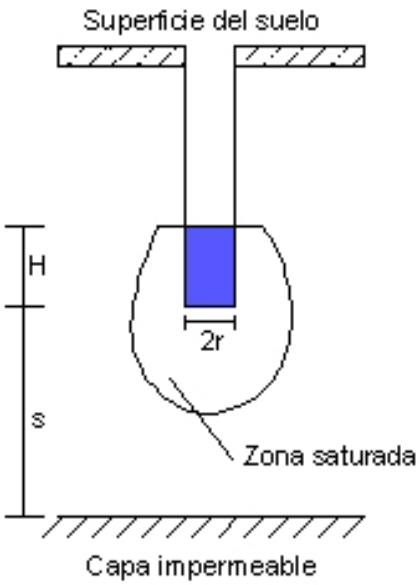



Figura 6. Esquema de una sección transversal de un hoyo, siendo H y r la carga hidráulica y el radio respectivamente y s la distancia entre el fondo del hoyo y una capa impermeable del suelo.

Debido a que la medición de la $K_{sat}$ del suelo se hace directamente desde la carga hidráulica (H) hacia las paredes del hoyo cilíndrico en el suelo (Figuras 5 y 6), y no en muestras de suelo como lo hizo Darcy, es necesario hacer las transformaciones de la ecuación 7 en 8.

La "*Glover solution"* está dada por

$$K_{sat} = AQ \qquad (8)$$

Siendo

Q, el caudal de agua que ingresa al suelo

$$A = \left\{sinh^{-1}(H/r) - [(\mathrm{r/H})^2 + 1]^{1/2} + r/H\right\}/(2\pi H^2) \qquad (9)$$

Donde:

Sinh-1 = función del seno hiperbólico inverso

r = radio del hoyo

H = carga hidráulica o nivel constante del agua en el hoyo

En una hoja de cálculo de Excel se ingresó la función de las ecuaciones 8 y 9, el gasto de agua en el reservorio, el tiempo de medición y se obtuvo la $K_{sat}$. Los resultados se analizaron estadísticamente en el programa R 2.9.1 (R Development Core Team, 2009).

#### 3.3.1.2 Modelo de la variabilidad espacial de la $K_{sat}$

Para estudiar la variabilidad de la conductividad hidráulica se hizo un guion "script" utilizando el paquete "RandomFields" del programa R 2.9.1 que genera campos de variabilidad o factores de escala para la $K_{sat}$ (αk), presión (αh) similar a (Miller-Miller, 1956). Los factores se ingresan en el archivo Domain del programa Hydrus 2D para multiplicar con los valores promedios de la conductividad medidos en el campo.

También se hizo un filtro para los valores log-normales ($\log K_{sat}$) del guion. El filtro permite ingresar únicamente valores calculados dentro del margen con ±5 %

Para la desviación estándar (log-normal), se tiene;

$$Sd = \sqrt{(e^{2\bar{x}+\mathrm{sd}^2})\,(e^{\mathrm{sd}^2} - 1)} \qquad (11)$$

Para la media (log-normal), se tiene;

$$\bar{x} = \sqrt{e^{\bar{x}+\frac{\mathrm{sd}^2}{2}}} \qquad (12)$$

Para la varianza (log-normal) se tiene;

$$Var = (sd)^2 \qquad (13)$$

Para la mediana (log-normal) se tiene;

$$Med = e^{\bar{x}} \qquad 14)$$

### 3.3.2. Caracterización de los Flujos laterales

Para observar los flujos preferenciales del agua en la Microcuenca Tres (MC3) se realizaron seis EEP utilizando el marcador Brillan Blue FCF (Neveon Hilton Davis Inc., Cincinati, OH) a una concentración de 10 g/l.

Después de elegir el lugar de experimentación se colocó una carpa plástica de 2 x 2 x 2 m para impedir que el agua de lluvia diluya el marcador. Se irriga 2 kg de Brilliant Blue disuelto en 200 litros de agua con un irrigador lineal de seis boquillas . Después de 15 horas de la irrigación se hizo una calicata a 2 metros de distancia bajo la pendiente paralela al irrigador, cada 20 centímetros se hicieron diez perfiles hasta llegar a la línea de irrigación (Figura 7)

Cada perfil se fotografió dentro de un marco metálico de 1 m x 1 m rodeado de dos tablas de colores (RGB y escala de grises) para posteriores correcciones (ver Figura 8 A). En uno de los perfiles se caracterizó el suelo y se tomaron muestras de suelo inalteradas en cilindros de 100 $cm^3$ y 200 g de suelo en fundas plásticas para los análisis de laboratorio.

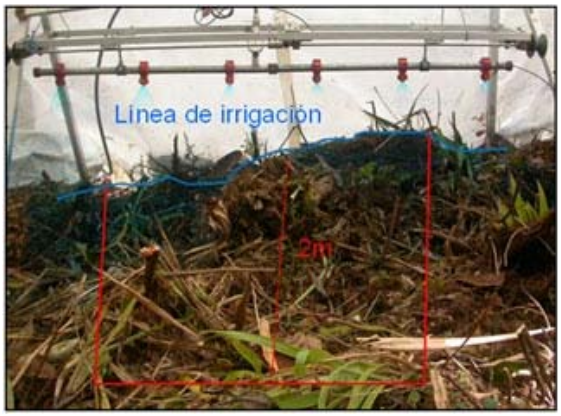



Figura 7. Irrigación del colorante Brilliant Blue en una de las parcelas. Se muestra la irrigación del marcador con un irrigador lineal estático, la línea de irrigación y el área de excavación.

### 3.3.2.1 Trabajo de laboratorio

#### 3.3.3.1.1. Procesamiento de las imágenes

El proceso para obtener las imágenes binarias fue: primero se corrigió la distorsión del lente de la cámara en el programa PTLense (Figura 8 A). HALCON corrigió la perspectiva de los colores de RGB en colores binarios negro-blanco (NN-BB). En el Photoshop se borran o se añaden manualmente los pixeles que no fueron detectados por HALCON (Figura 8 D).

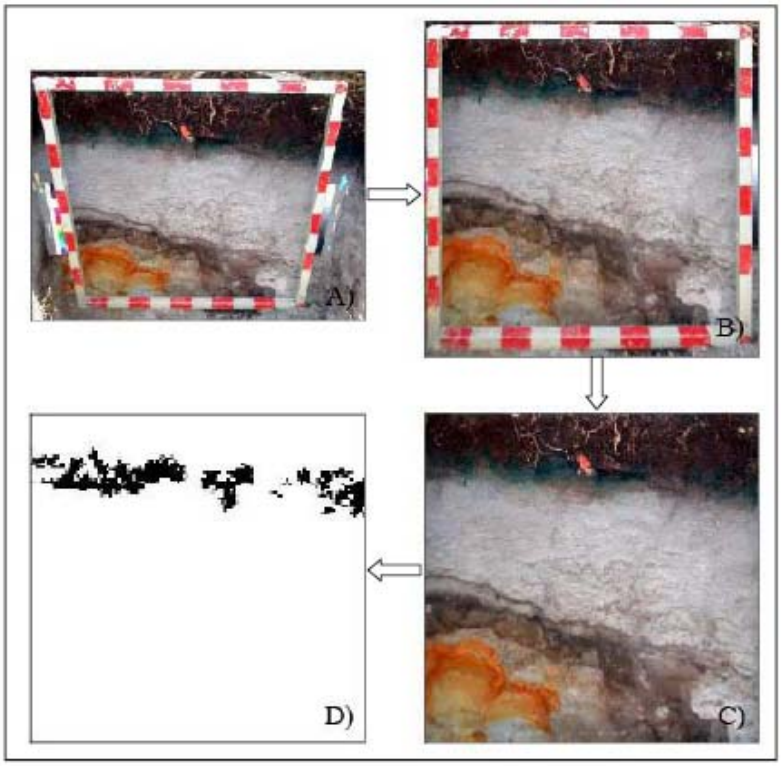



Figura 8. Secuencia de la edición de las imágenes. A) Foto sin editar dentro del marco metálico y las tablas de colores. B) Corrección por la distorsión del lente de la cámara. C) Perspectiva de los colores. D) Imagen en colores binarios (NN-BB).

#### 3.3.3.1.2. Determinación de la curva de retención del agua

Con las muestras de suelo inalteradas en cilindros de 100 $cm^3$ se determinó el cambio de humedad a diferentes grados de presión: pF 0,0 (grado de saturación del suelo), pF 0,5, pF 1,0, pF 1,5, y pF 2,0 (capacidad de campo) en varios rangos de tiempo (Cuadro 2) en cámaras con placas cerámicas semiporosas por columnas de agua (ver Figura 9 A) en el Laboratorio de la ECSF y el contenido de humedad a pF 4,2 se midió en cámaras de presión (ver Figura 9 B).

Cuadro 2. Valores de la presión de la columna de agua [cm] y los valores correspondientes a pF y el tiempo transcurrido para la medición en placas semiporosas.

| Valor pF | Columna de H2O cm | Tiempo días |
|---|---|---|
| 0.0 | 0.00 | |
| 0.5 | 3.20 | 2-3 |
| 1.0 | 10.0 | 4-5 |
| 1.5 | 31.6 | 7-8 |
| 2.0 | 100 | 14-15 |
| 4.2 | 15849 | |

Las muestras de suelo y las placas semiporosas fueron saturadas por cuatro días con agua desgasificada. Después de la saturación se sometieron las muestras de suelo a diferentes cargas de presión y se pesaron por tres días para obtener un valor promedio (Cuadro 2). El tiempo estimado de la medición para el conjunto de las muestras (en el rango de pF 0,0 a 2,2) fue de 30 días aproximadamente y de siete días para pF 4,2.

Figura 9. Esquema de los dos métodos utilizados para la succión del agua en las muestras de suelo, A) presión de la columna de agua en placas semiporosas, y B) cámara a presión (Huwe, 1998)

Con los valores del contenido de humedad del suelo saturado, capacidad de campo y punto de marchitez permanente que corresponden a los valores pF 0,0; 2,0 y 4,2 se graficó la curva de retención de agua.

De manera indirecta el subprograma Rosetta Lite de Hydrus 2D obtiene los parámetros de Mualem van Genuchten: θr, θs [$cm^3/cm^3$], α [1/cm], n [-] y $K_{sat}$ [cm/día], a partir de los valores de humedad: pF = 2 y pF = 4,2, densidad y textura.

#### 3.3.3.1.3. Análisis de textura y pF 4,2

Se necesitaron 50 g de suelo para la estimación de humedad a pF 4,2 en cámaras a presión y el análisis de textura por el método del hidrómetro o de Bouyucus. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Físicas de Suelos de la Universidad de Bayreuth-Alemania.

### 3.3.3. Parámetros físicos del suelo.

El contenido de agua del suelo se expresó en unidades de masa [M] como lo señala (Valarezo et al., 1998).

$$\theta_m = (PMH - PMS)/PMS \qquad (11)$$

Donde, $\theta_m$ es el contenido de humedad en términos de masa, *PMH* es el peso de la muestra en húmedo a capacidad de campo y *PMS* el peso de muestra seca

También se determinó el contenido de agua en términos de volumen ($\theta_v$) la densidad aparente (Da) y la porosidad total (PT).

Para obtener el contenido de humedad en términos de volumen, se dispuso de la densidad aparente (Da)

$$\theta_v = \theta_m . Da \qquad (12)$$

Donde, para este caso la densidad aparente es:

$$Da = \frac{PMS\ 105°C}{V} \qquad (13)$$

### 3.3.4. Modelo en Hydrus-2D

En la información geométrica en la interfaz gráfica de Hydrus se seleccionó las dimensiones de malla (*x* y *z*), la pendiente (α) y la unidad de información geométrica (cm) para este modelo (Figura 10).

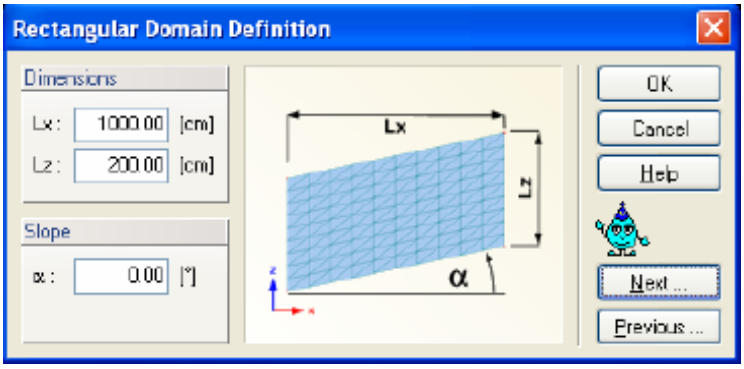



Figura 10. Ajuste del modelo en Hydrus 2D, en la interfaz de pre-procesamiento.

En la malla del modelo o perfil del suelo se entraron tres materiales heterogéneos (horizonte orgánico, horizontes A y B). Hydrus 2D implementa Marquardt-Levenberg un parámetro de estimación inversa de las propiedades hidráulicas del suelo (Hopmans et al., 2002) y transporte de solutos (Šimůnek et al., 2002).

En el pre proceso del modelo Hydrus 2D se ingresa los parámetros hidráulicos: clase textural (%), contenido de agua ($cm^3$/ $cm^3$) y densidad ($gr/cm^3$) en el subprograma Rosetta Lite v.1.0 Los parámetros Mualem van-Genuchten (θr ($cm^3/cm^3$), θs ($cm^3/cm^3$), α (1/cm), n(log10), $K_{sat}$ (cm/h), K (cm/h) y L) son calculados a partir de los parámetros hidráulicos del suelo. El modelo de Mualem van-Genuchten (1980) es uno de los dos modelos para calcular el contenido del agua y la conductividad hidráulica, a diferencia de Brooks y Corey (1966), van-Genuchten combina con el modelo estadístico de la distribución de poros de Mualem. Los resultados de la randomización de la $K_{sat}$ se ingresó en Hydrus 2D por medio del archivo domain.dat de los archivos del programa Hydrus.

# 4 RESULTADOS

## 4.1. Conductividad hidráulica de los suelos de la microcuenca MC3

La $K_{sat}$ para los tres sitios fue distinta. En los valles fue mayor que en las crestas y plataforma (Figura 11). Así mismo en los valles la $K_{sat}$ disminuyo con profundidad. Al contrario, en las crestas y plataforma la conductividad fue variable con la profundidad.

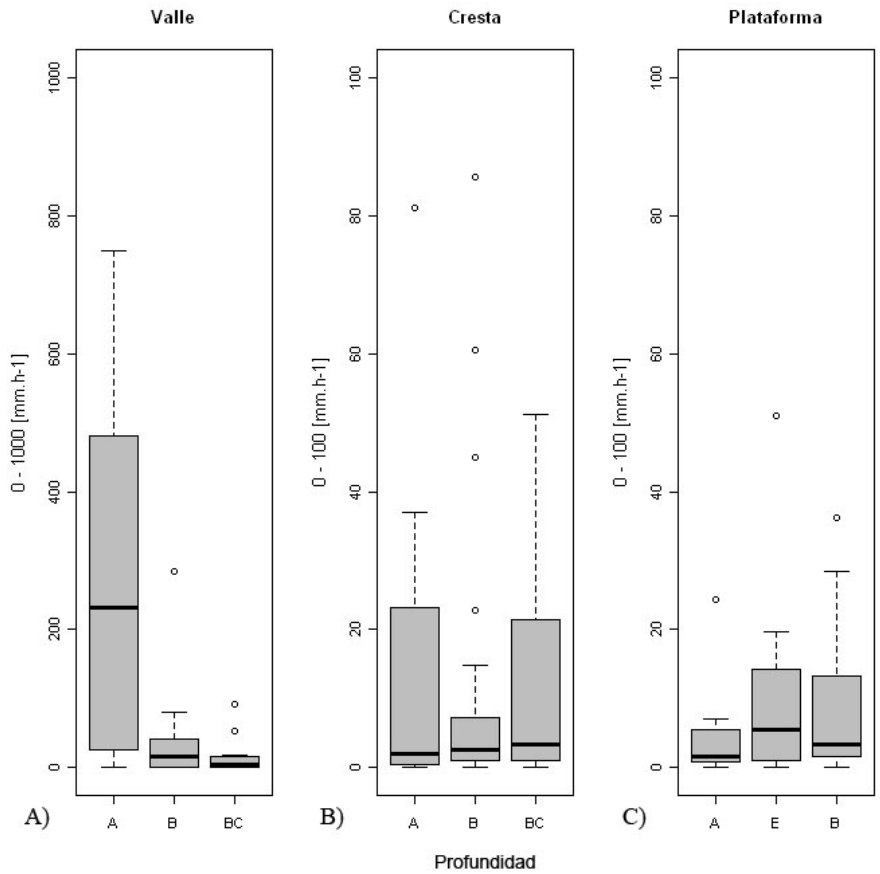



Figura 11. Conductividad hidráulica saturada y tendencia de los valores medios en relación a la profundidad para los tres sitios de experimentación, A) Valles, B) Crestas y C) Plataforma.

En la Plataforma se encontró con frecuencia un horizonte E variable en la posición del perfil, encontrándose bajo un horizonte Ah o sobre un horizonte A. Además, se encontró algunos horizontes cementados a 20 y 30 cm que corresponde al horizonte A (ver Figura 12).

### 4.1.1. Características físicas y Conductividad hidráulica de los Cambisoles

Los Cambisoles comprenden las crestas y valles de la MC3 y cubren el 60 % de la superficie entre 1900 y 2000 m snm. Cabe mencionar que las características físicas descritas en este apartado para las Crestas, los Valles y la Plataforma resultan de las **observaciones de campo** que se tuvieron de los hoyos de los experimentos de la $K_{sat}$

#### 4.1.1.1 Crestas

**Características físicas de los suelos de las crestas**

En el cuadro 3 se presenta un resumen de los valores promedio de $K_{sat}$ y la profundidad a la que fue medida y las propiedades físicas observadas en el perfil de los suelos de las crestas.

Cuadro 3. Características físicas y conductividad hidráulica saturada de las crestas de los Cambisoles

| Sitio | N | H | Color** | Tex* | Piedras* | Raices* | Humedad** | Consistencia** | Prfd Promedio | Ksat |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | % | % | – | – | cm | mm.h-1 |
| cresta | 29 | A | gris oscuro | FA | poco | común | húmedo | suave | 23±6 | 117,7 |
| | 29 | B | amarillo claro | FY | sin piedras | sin raices | poco húmedo | suave | 44±10 | 18,1 |
| | 19 | BC | amarillo oscuro | FA | sin piedras | sin raices | poco húmedo | friable | 64±11 | 31,4 |

* FAO. 2006. Guia para descripcion de suelos ** DIN: Instituto de Normalización Aleman
FA = Franco arenoso, FY = Franco Arcilloso, FA = Franco arenoso

- ***Color***

El color para el primer horizonte es gris oscuro, los horizontes subyacentes fueron amarillo claro y amarillo oscuro. El cambio de color es una característica de los suelos Cambisoles.

- ***Textura***

En los flancos de los Valles la textura es variable en el perfil; franco-arenoso hasta los 23 cm, franco-arcilloso hasta 44 cm y, a mayor profundidad franco arenoso.

- ***Contenido de piedras***

No se encontró piedras con frecuencia, y las pocas observadas se registraron hasta 25 cm de profundidad. Las piedras observadas tuvieron diámetros de 0,5 hasta 4 y 8 cm.

- ***Contenido de raíces***

Se observaron raíces en poca cantidad en los primeros 23 cm de profundidad, en el resto del perfil no se encontraron raíces.

- ***Humedad***

La humedad del suelo disminuyó con la profundidad, la superficie del suelo (-10 cm) se registró más húmedo que el resto del perfil, las precipitaciones frecuentes mantienen húmedo el suelo superficial.

- ***Consistencia***

El suelo de las crestas permanece suave en el perfil, en los primeros 10 cm es bien suave que el resto, hasta los 46 cm es suave, y a mayor profundidad es friable.

**Conductividad hidráulica de los suelos de las crestas**

Los valores promedio de conductividad hidráulica para el perfil fueron los siguientes: horizonte A = 117,68 $mm.h^{-1}$ clasificada por la SSDS (ver Cuadro 1) como “alta”, horizonte B = 18,04 $mm.h^{-1}$, “baja” y para BC = 31,38 $mm.h^{-1}$. “moderadamente bajo”.

### 4.1.2. Valles

**Características físicas de los suelos de los flancos de los valles**

La secuencia del perfil en los suelos de los valles fue A, B y BC, en el Cuadro 4 se presentan características físicas del suelo y los valores de conductividad hidráulica saturada.

- ***Color***

El color cambia en el perfil desde gris oscuro en los primeros 25 cm en el horizonte A pasando a amarillo claro en el horizonte B a 46 cm, hasta amarillo-rojizo en el horizonte BC a 60-79 cm de profundidad.

Cuadro 4. Características físicas y conductividad hidráulica de los flancos de los valles de los Cambisoles.

| Sitio | N | H | Color** | Tex* | Piedras* | Raices* | Humedad** | Consistencia** | Prfd Promedio | Ksat Promedio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | % | % | – | – | cm | mm.h-1 |
| valles | 20 | A | gris oscuro | FA | medio | medio | muy húmedo | suave | 25±7 | 386,4 |
| | 17 | B | amarillo claro | F | medio | medio | poco húmedo | suave | 46±14 | 38,6 |
| | 12 | BC | amarillo rojizo | Y | sin piedras | poco | poco húmedo | duro | 63±16 | 16,8 |

* FAO. 2006. Guia para descripcion de suelos ** DIN: Instituto de Normalización Aleman
FA = Franco arenoso, F = Franco, Y = Arcilloso

- ***Textura***

La fracción de tierra fina para el horizonte A fue clasificado como franco arenoso, los horizontes subyacentes fueron: franco y arcilloso para B y BC, respectivamente.

- ***Contenido de piedras***

Las piedras se hicieron presentes hasta los 46 cm de profundidad en los horizontes A y B.

- ***Contenido de raíces***

Las raíces aparecieron en todo el perfil con mayor representación en la superficie del suelo.

- ***Humedad***

La humedad del suelo disminuyó con la profundidad, presenciándose mayor humedad a 10 centímetros de profundidad. En algunos casos se observó un suelo totalmente saturado.

- ***Consistencia***

La consistencia en los primeros 46 cm es suave, incluso en los primeros 10 cm es más suelto que el resto del perfil, a 63 cm de profundidad es dura.

**Conductividad hidráulica de los flancos de los valles**

El valor promedio de $K_{sat}$ para el horizonte A fue de 386,4 $mm.h^{-1}$, clasificada a como “muy alta”; para el horizonte B de 38,6 $mm.h^{-1}$, “alta” y BC de 16,8 $mm.h^{-1}$, “moderadamente alto” (Cuadro 4). Aquí la Ksat sigue el patrón y disminuye con la profundidad.

## 4.2. Características físicas y conductividad hidráulica saturada de los Gleysoles: Plataforma

Los Gleysoles se encuentran en la parte alta de la microcuenca (> 2000 m snm.) y cubren aproximadamente el 40 % de la superficie de la misma.

### 4.2.1. Características físicas

En la plataforma, el desarrollo del perfil para el horizonte orgánico Oi, Oe, Oa y para el suelo mineral el orden Ah/A, E y B se observó con mayor frecuencia, siendo también E, B y BC en menor frecuencia. En el Cuadro 5 se presentan las propiedades físicas y la $K_{sat}$ de los suelos Gleysoles encontrados en la Plataforma.

Cuadro 5. Características físicas y conductividad hidráulica de los Gleysoles de la Plataforma

| Sitio | N | H | Color munsell | Tex* | Piedras* | Raices* | Humedad** | Consistencia** | Prfd Promedio | Ksat |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | % | % | – | – | cm | mm.h-1 |
| Plataforma | 21 | A | café oscuro | FA | poco | poco | húmedo | moderado | 23±8 | 8,8 |
| | 20 | E | gris bien claro | A | sin piedras | sin raices | húmedo | suave | 47±14 | 19,8 |
| | 15 | B | amarillo rojizo | FA | sin piedras | sin raices | poco húmedo | moderado | 66±14 | 8,9 |

* FAO. 2006. Guia para descripcion de suelos ** DIN: Instituto de Normalización Aleman
FA = Franco arenoso, A = Arenoso, FA = Franco arenoso

#### *Color*

El color para el primer horizonte varía entre gris oscuro y café oscuro, el horizonte subyacente lleva el “patrón gléyico” de color rojizo, pardusco o amarillento. Se observó un horizonte gris bien claro o álbico (E) que suprayace a un horizonte A y/o B, o en cualquier otra posición (ver Figura 13).

***Textura***

La textura es franco arenosa para los horizontes A y B, para el horizonte E que subyace al horizonte A fue más arenosa.

***Contenido de piedras***

Las piedras se encontraron aisladas y en poca cantidad en el horizonte A, en los horizontes siguientes no se encontraron piedras.

***Contenido de raíces***

Pocas raíces fueron observadas en el primer horizonte, en los siguientes horizontes no se encontraron raíces.

***Humedad***

El suelo se encontró húmedo hasta 47 cm en el horizonte B, a mayor profundidad se redujo la humedad.

***Consistencia***

La consistencia para los horizontes A y B fue moderado, observándose en algunos lados un encostramiento en la superficie del suelo. El horizonte E fue de consistencia suave.

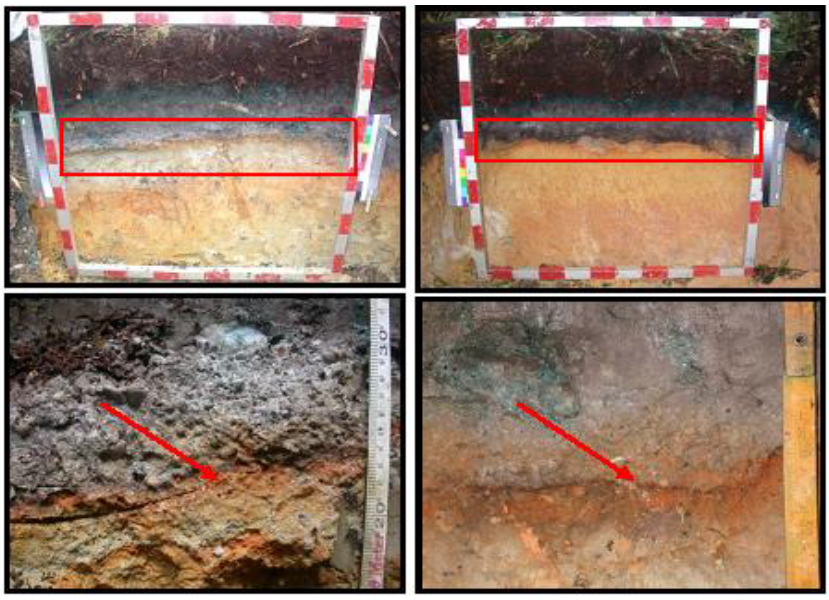


Figura 12. Perfiles donde se observa capas impermeables en los Gleysoles de la Plataforma a 2000 m snm.

### 4.2.2. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica para todo el perfil fue clasificada como "moderadamente alta", a pesar de ello fue variable con la profundidad, en el horizonte A (23 cm de profundidad) fue de 8,8 $mm.h^{-1}$, para el horizonte E (a 47 cm de profundidad) fue de 19,8 $mm.h^{-1}$ y disminuyó a 8,9 $mm.h^{-1}$ en el horizonte B.

Cabe señalar que las mediciones de la $K_{sat}$ con el Amoozemeter fueron realizadas entre 17 y 31 cm de profundidad (en el horizonte A) debido a que la relación entre la profundidad del hoyo y su radio debe ser ($H/r \geq 5$), por ejemplo para el diámetro de 6 cm, H = 15 cm (Amoozegar, 1989).

## 4.3. Variabilidad de la $K_{sat}$

El modelamiento en *RandomFields* dio como resultado los factores de escala de Ksat (implementados en el modelo Hydrus 2D a través del archivo de dominio,

DOMAIN.DAT) y además las imágenes que se muestran en la (Figura 13) en la cual se muestra los resultados de la aleatorización de los valores de la Ksat para un área de 4000 $cm^2$. En el horizonte A (Figura 13 A) muestra mayor aleatorización que el horizonte B (Figura 13 B).

La dispersión de los pixeles de color amarillo indica mayor contraste de los valores. Las mediciones de campo de la $K_{sat}$ en la plataforma de la MC3 (ver Figura 26) también mostraron mayor dispersión entre los valores.

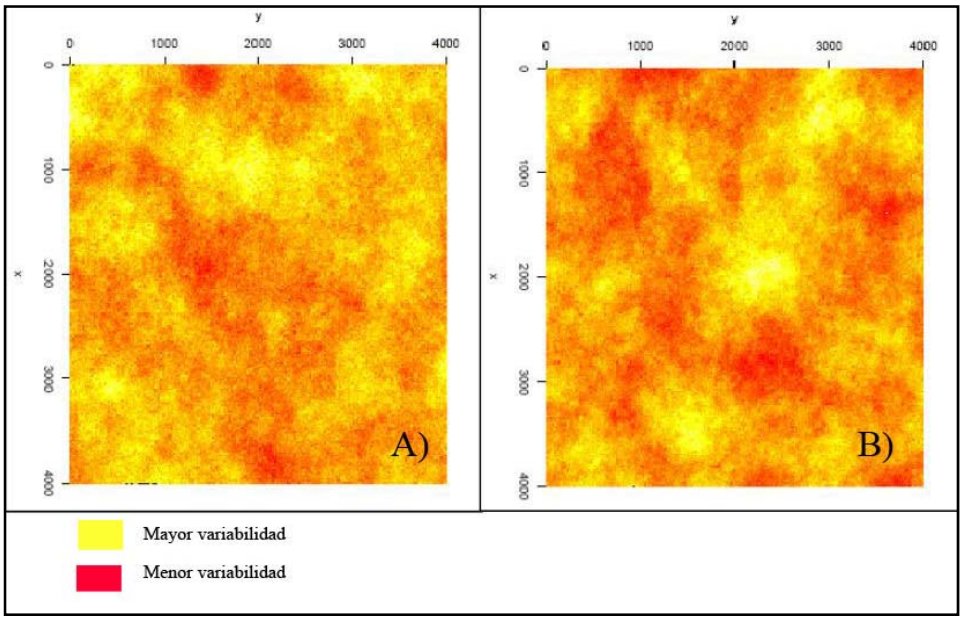



Figura 13. Randomización de la $K_{sat}$ para el modelo implementado en la plataforma para el horizonte A (izquierda) y B (derecha)

### 4.4. Rutas preferenciales del agua en los experimentos a escala de parcela (EEP) de los Gleysoles (Plataforma) de la MC3.

En las calicatas (EEP) de la Plataforma entre 2000 y 2200 m snm. se encontraron suelos parecidos a los observados en las barrenaciones de los hoyos

de medición de la $K_{sat}$. En este caso se observó un horizonte E que subyace a un horizonte O y suprayace a los horizontes A y B. Para este perfil el colorante marcó mayormente la superficie del horizonte E hasta 5 cm de profundidad (Figura 14).

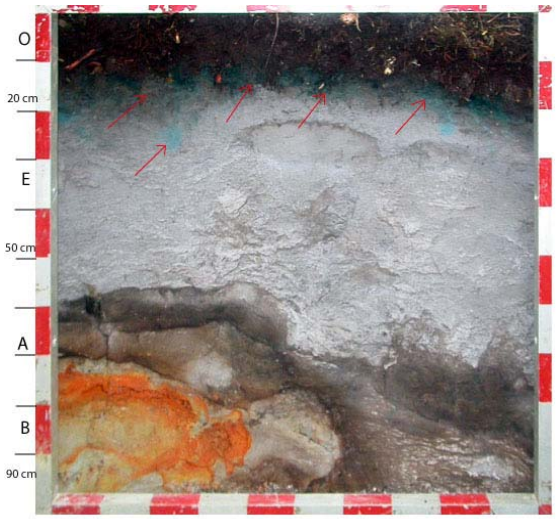



Figura 14. Perfil de un suelo a 2200 m snm. marcado con el Brilliant Blue después de 14 horas de la irrigación

En la Figura 15 se muestra los perfiles de las seis calicatas excavadas en la plataforma de la microcuenca Quebrada Tres. Las imágenes muestran que el agua recorrió la superficie del suelo produciendo un flujo lateral. El colorante marcó mayormente el interfaz de los horizontes orgánico (horizonte Oa) y los primeros 10 cm del suelo mineral. Con alguna excepción el agua percoló a mayor profundidad -a través de canales del suelo- (ver Figura 17). El suelo expresó una respuesta rápida a la simulación de lluvia (irrigación del Brilliant Blue a 2,0 $mm.min^{-1}$)

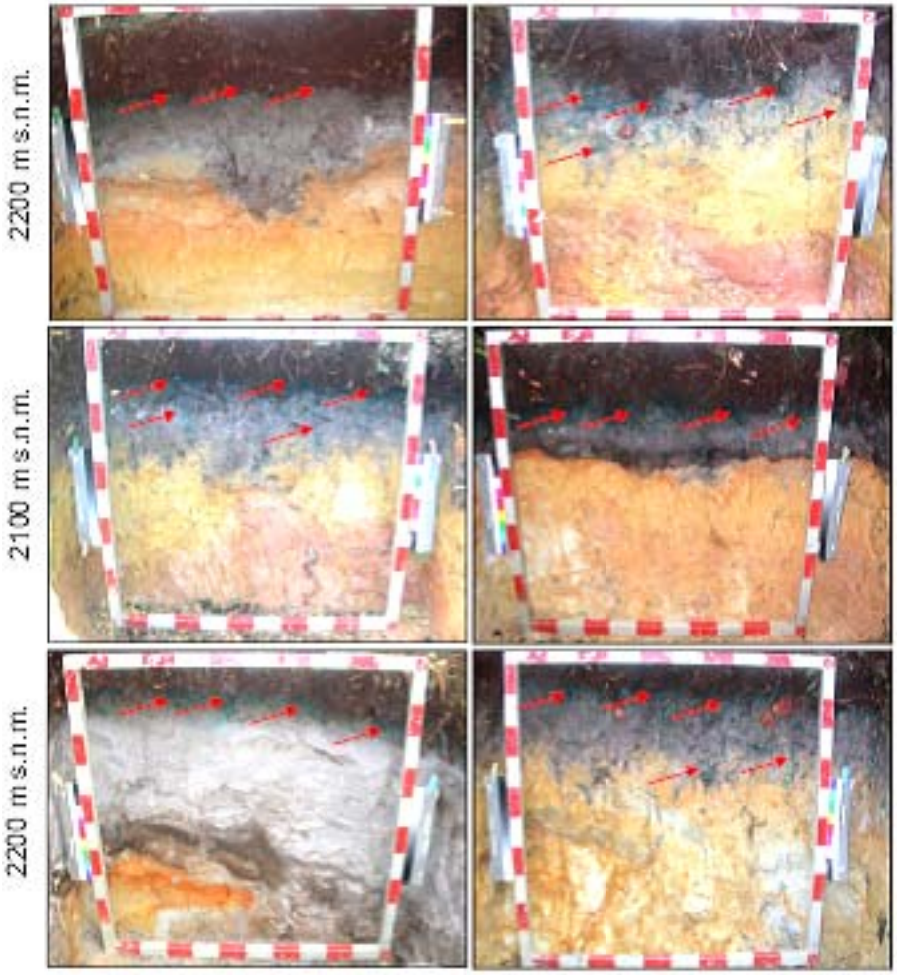



Figura 15. Perfiles de seis calicatas (M1-M6) a > 2000 m snm. en la Plataforma.

La secuencia de las imágenes BBNN se resume en la (Figura 15) se representa 3 de las 10 imágenes de los perfiles. Las imágenes para este caso corresponde a un perfil con presencia de un horizonte E que suprayace a un horizonte A y B. (Figura 13 y 15).

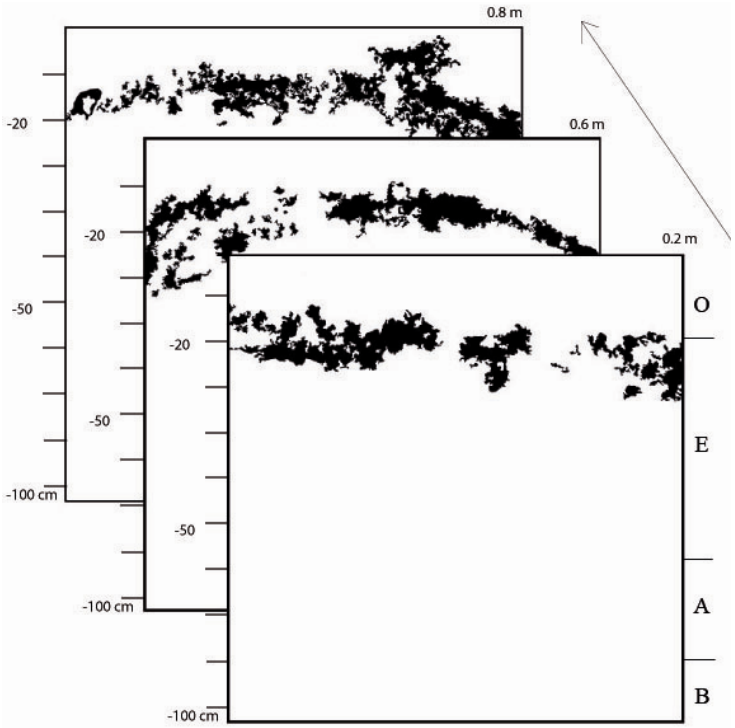



Figura 16. Imágenes BB-NN (NN = pixeles marcados por el colorante y BB = pixeles de otro color), se muestra la secuencia de las imágenes cada 20 cm.

La (Figura 17) evidencia los canales del suelo por donde el agua fluye más rápidamente. Las raíces vivas y muertas son importantes, dejan marcado el suelo con tubos o *pipes* que en algunos casos comunican la superficie del suelo con el subsuelo. Además, se observó algunos restos de materia orgánica de raíces muertas sin conexión a la superficie. Los restos de materia orgánica se encontraron frecuentemente a 60-80 cm de profundidad, donde no se observaron raíces vivas (con una excepción a 70 cm de profundidad).

Figura 17. Canales y tubos del suelo A) Raíces vivas, B) Materia orgánica de raíces muertas a 60-80 cm de profundidad, C) Tubos parales a la superficie, D) Huecos.

### 4.4.1. Modelamiento de los flujos de agua de la MC3

Teniendo en cuenta la similitud de los resultados de los EEP – el flujo lateral subsuperficial entre los horizontes Oa y A- (ver Figura 14), se hizo un único modelo que represente las condiciones del suelo de la plataforma para un segmento lateral de 12 % de pendiente, similar a los sitios donde se ubicaron las parcelas de experimentación.

En la (Figura 18) las flechas señalan el flujo lateral del agua modelado en Hydrus 2D. Una vez que inicia el proceso de precipitación en la modelación, el agua escurre sobre el suelo mineral y en la base de la capa orgánica, durante las primeras 14 horas iniciado el modelo, la velocidad a la que fluye el agua es alta (60-80 $cm.h^{-1}$), después de 72 horas la velocidad disminuye entre 0 y 20 $cm.h^{-1}$. Durante todo el tiempo de modelación el flujo prevalece lateral.

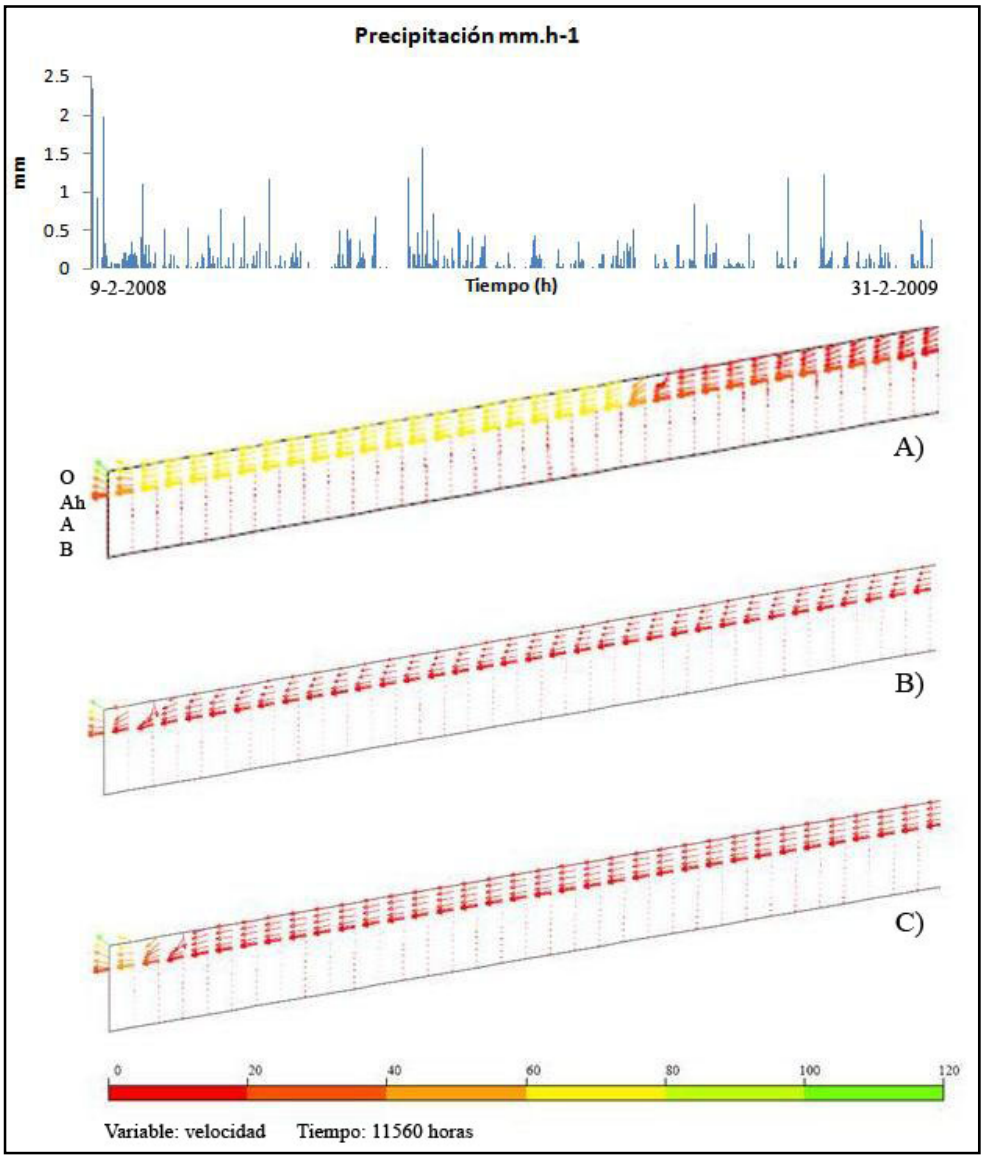



Figura 18. Velocidad [cm.h$^{-1}$] del flujo de agua y la precipitación [mm.h$^{-1}$] para un escenario de 11560 horas. A) escurrimiento del agua modelado después de 14 horas de haber cesado la irrigación. B) después de 24 horas. C) después de 72 horas.

Las raíces que se encuentran a mayor profundidad sirven como “bypass” para que el agua llegue, hasta 30-50 cm de profundidad (Figura 19).Las raíces vivas que llegan a esta profundidad son escasas. Si bien la predominancia de las raíces está en la capa superficial, hay unas pocas que llegan a mayor profundidad y conducen el agua a mayores profundidades.

Figura 19. Flujos de agua a 70 cm de profundidad por la presencia de raíces

#### 4.4.1.1 Curva pF y parámetros de Mualem Van-Genuchten

Los parámetros de van-Genuchten Mualem calculados en el programa Rosetta Lite se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros de van-Genuchten Mualem para un suelo representativo de la Plataforma.

| H | $\Theta_r$ | $\Theta_s$ | α<br>$cm^{-1}$ | n | Ksat<br>$mm.h^{-1}$ | l |
|---|---|---|---|---|---|---|
| O | 0.039 | 0.385 | 0.017 | 1.468 | 4210.00 | 0.5* |
| A | 0.000 | 0.549 | 0.007 | 1.412 | 21.25 | 0.5* |
| B | 0.000 | 0.311 | 0.005 | 1.229 | 60.00 | 0.5* |

* Muelan (1976) recomienda un valor 0.5 para la tortuosidad del parametro l

Los términos $\theta_r$ y $\theta_s$ son el contenido de agua residual y saturado, respectivamente, α y n son los parámetros empíricos de la forma de la curva pF y $K_{sat}$ es la conductividad hidráulica saturada.

La disminución de los valores de alpha (α) con la profundidad indica que el suelo retiene mayor cantidad de agua con la profundidad, característica de los Gleysoles. El menor valor de n forma una curva sinusoidal.

Con los parámetros de Mualem Van-Genuchten se dibujó la curva característica del suelo o potencial de agua libre, pF (Figura 20).

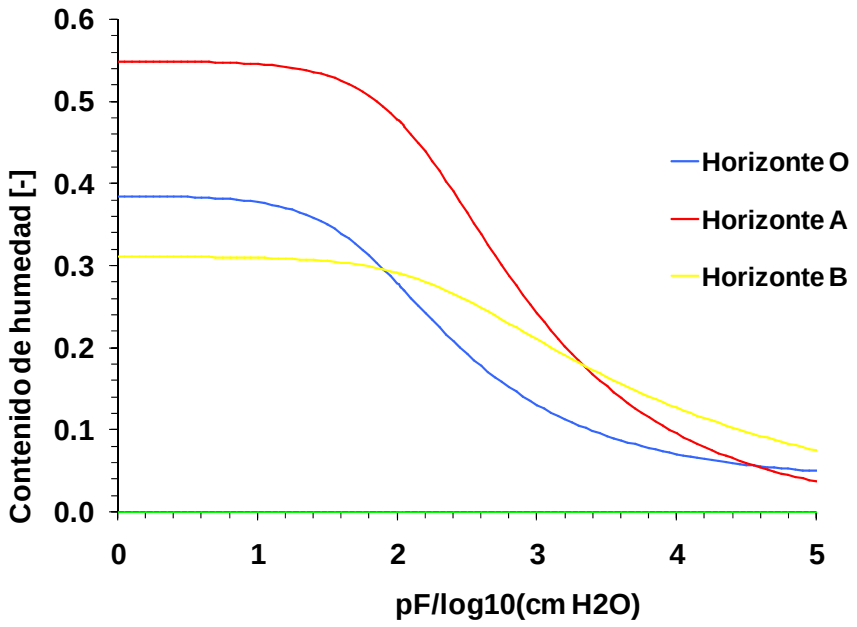



Figura 20. Curvas de pF para los horizontes O, A, B.

Cuando el suelo deja de tener aportes de lluvia, el agua residual es nula en los horizontes minerales, no siendo así para la capa orgánica, donde queda retenida parte de la humedad. Por otro lado, la conductividad hidráulica es mayor en la capa orgánica. La $K_{sat}$ en el horizonte A presentó un menor valor con

respecto del horizonte B tal como fue medido en los suelos de la Plataforma. El valor de la $K_{sat}$ para A fue considerado como “moderadamente bajo” y para B “moderadamente alto”.

Cuando el suelo se satura (pF 0,0) el horizonte A retiene mayor cantidad de agua (hasta 55 %.-Vol.) disminuyendo a 5 %.-Vol. a ~15000 hPa (pF 4,2). El horizonte B retiene menor cantidad de humedad (30 %.-Vol.) que permanece constante con los cambios de presión hasta capacidad de campo (100 hPa o pF 2,0) lo que indica que la mayor cantidad de microporos se encuentran en el horizonte B, y la mayor $K_{sat}$ se debe a los canales de drenaje o tubos y por la estructura angular del suelo.

#### 4.4.1.2 Características físicas del suelo de un perfil representativo de la Plataforma (Gleysol)

Debido a la homogeneidad de los flujos laterales del agua en los suelos y la representación de un solo modelo en Hydrus 2D para la plataforma, es preciso presentar los análisis de Laboratorio de una calicata representativa (Cuadro 7), en este caso la calicata M1 a 2000 m snm.

***Color***

El color para el horizonte A fue castaño oscuro a castaño gris, para el horizonte B fue amarillento. En otros perfiles a mayor profundidad el color se vuelve amarillo rojizo moteado por la poca aireación.

***Estructura***

En la superficie del suelo no se observó una estructura definida, pero se observaron granos macizos. Además, se observó una estructura masiva con una consistencia fuerte en la base del horizonte A -formada por una capa

impermeable- de color más oscura y más densa, correspondiendo aparentemente a un horizonte plácico (pan de hierro) de 1 y 25 mm de espesor.

Cuadro 7. Características físicas de un suelo de la Plataforma a 2000 m snm.

| M1 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | Prfd. | Estructura | Color munsell | | Arena | Limo | Arcilla | clase |
| | (cm) | | Húmedo | Seco | (%) | (%) | (%) | textural |
| O | 30-35 | – | – | – | – | – | – | – |
| Ah | 5,0-10 | Granular | 7.5YR3/1 castaño oscuro | 2.5Y5/1 gris amarillento | 53.79 | 37.01 | 9.20 | FA |
| A | 19-32 | Subnangular | 7.5YR5/1 castaño gris | 2.5Y7/1 gris oscuro | 54.93 | 37.56 | 7.51 | FA |
| B | >55 | angular blocosa | 10YR7/6 amarillento | 10YR8/6 amarillo anaranjado | 22.46 | 37.28 | 40.26 | Y |
| H | pF 2 | pF 4.2 | Densidad | Porosidad | Agua apro. | Cap. Airea | Piedras | Raíces |
| | Vol.-(%) | Vol.-(%) | (g/cm3) | (Vol.-%) | (Vol.-%) | (Vol.-%) | (Vol.-%) | u/dm$^2$ |
| Ah | 50.10 | 7.23±3.3 | 0.98 | 57.92±4.8 | 42.82±2.9 | 7.87±2.4 | 20 | 15-20 |
| A | 27.00 | 4.92±0.8 | 1.74 | 29.12±2.0 | 22.04±0.8 | 2.15±1.0 | 30 | 2-4 |
| B | 56.30 | 31.82±15.4 | 1.10 | 56.92±7.4 | 24.46±10.8 | 1.80±2.8 | 0 | 0 |

FA = Franco arenoso, Y = Arcilloso

### *Densidad y Textura*

La densidad aparente del horizonte A es variable, (Figura 21 B) se observa el bajo valor de densidad en la superficie del suelo (horizonte Ah) por donde la mayor parte del agua fluye lateralmente, el alto valor en el horizonte A cual puede deberse al encostramiento del suelo superficial en ciertos lugares del perfil. A pesar de ello, la mediana del horizonte A es menor que el horizonte B, esto se debe a la presencia de poros y raíces en la capa superficial del suelo.

Los análisis de textura muestran que los porcentajes de arena sobresalen en el primer horizonte, esto puede deberse a las frecuentes lluvias promueven la migración lavan del material fino de los primeros centímetros del suelo mineral.

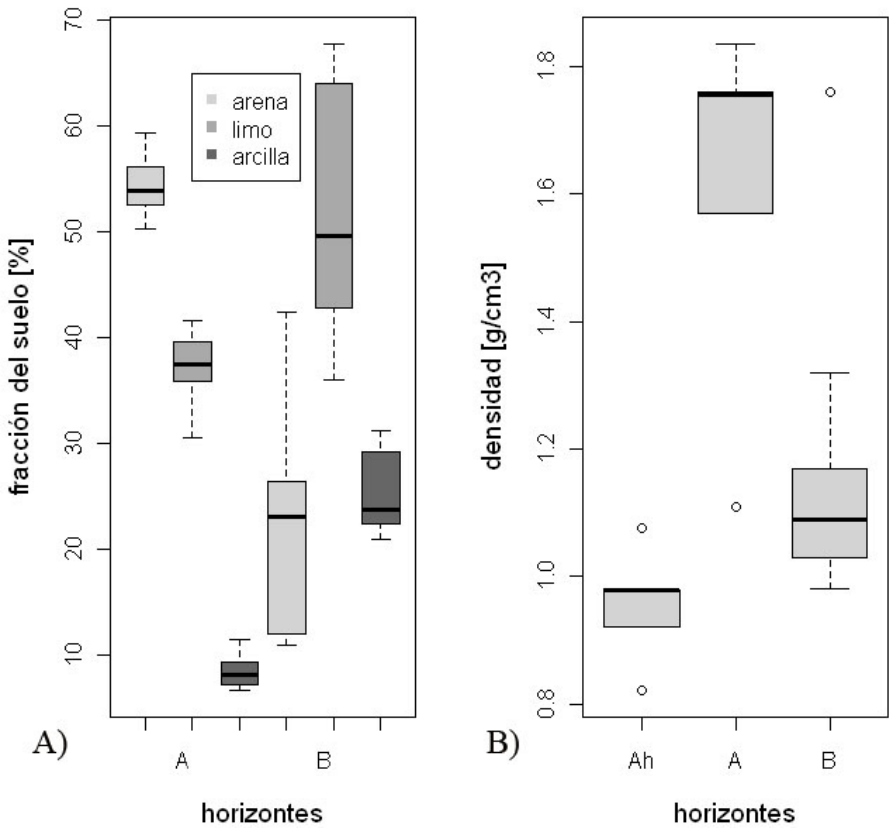



Figura 21. Diagramas de caja para (M1) a 2000 m snm. A) textura y B) densidad aparente.

***Porosidad y capacidad de aireación***

La porosidad en el horizonte A –a pesar de tener una textura gruesa- tiene un valor considerablemente alto, debiéndose a que imaginarse por mayor presencia de raíces (15-20 u/dm$^2$) que se observaron en la capa superficial del suelo.

La capacidad de aireación es baja para todo el perfil, y disminuye con la profundidad. El espacio poroso drenable en la superficie del suelo mineral es ayudado por las raíces y la presencia de piedras (20 Vol.-%).

La disminución de la capacidad de aireación se refleja en las manchas de colores amarillo rojizos según aumenta la profundidad.

***Piedras y raíces***

El mayor volumen de piedras se observó a 30 cm (30 Vol.-%) y disminuyó con la profundidad. Las piedras cercanas entre sí interactuaron para promover un flujo lateral, las piedras aisladas no tuvieron un aporte significativo. Las raíces, al igual que las piedras disminuyeron con la profundidad, la mayor cantidad de raíces se encontró en la capa orgánica, por lo antes ya mencionado por Wilcke et al. (2002) sobre la disponibilidad de agua y nutrientes.

***pF 2,0, pF 4,2 y Agua aprovechable***

El volumen de agua del suelo entre capacidad de campo (pF 2) y punto de marchitez (pF 4,2) es la región del *agua aprovechable* y se encuentra en un mayor porcentaje en el horizonte B. El valor bajo de alpha en el horizonte B (ver cuadro 6), corrobora el alargamiento de la curva, que significa, que el suelo está reteniendo el agua con más fuerza en los microporos del suelo.

## 4.5. Comparación de los suelos estudiados

### 4.5.1. Comparacion de la Conductividad hidraulica saturada de los suelos de MC2 y MC3

Para comparar la conductividad hidráulica saturada en las dos microcuencas se transformó los valores en logaritmos (ver anexo 2). La topografía y la profundidad son factores determinantes de la conductividad del agua en el suelo, donde interactúan otros factores como la estructura, textura y densidad aparente del suelo (ver Figura 22); además, del contenido de piedras y raíces. La $K_{sat}$ en la MC2 independientemente de la topografía disminuye con la profundidad. En los flancos de los valles de la MC3 (con pendientes entre 50 y 100 %) los patrones de $K_{sat}$ siguen la tendencia de disminuir con la profundidad. En las crestas con propiedades cambicas la $K_{sat}$ es mayor con la profundidad. En los suelos de la

plataforma entre a 47 cm de profundidad la $K_{sat}$ aumenta con la profundidad, lo cual se atribuye a la textura arenosa. Como ya se mencionó antes, el bajo valor de $K_{sat}$ en la capa superficial de los Gleysoles de la plataforma se debe al encostramiento por la falta de remoción natural.

En el cuadro 8 se presentan los valores totales transformados $logk_{sat}$ para las microcuencas MC2 y MC3.

Cuadro 8. Descripción estadística de $logK_{sat}$ para la microcuenca (MC2) y microcuenca (MC3)

| | | | | | | LogKsat [mm.h-1] | | | | | % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | H | Min. | 1er Qu. | Med. | Prom. | 3er Qu. | Max. | NA's | Desv. Est. | CV |
| | 19 | A | -3.22 | -0.21 | 1.28 | 0.93 | 2.40 | 4.69 | | 2.23 | 240 |
| MC2 | 17 | B | -3.22 | -1.69 | 0.40 | 0.01 | 1.70 | 4.47 | 2 | 2.29 | 37213 |
| | 21 | C | -3.22 | -1.05 | -0.03 | 0.58 | 2.12 | 4.49 | 4 | 2.26 | 388 |
| | 70 | A | -4.61 | 0.07 | 1.75 | 2.07 | 4.65 | 7.62 | | 2.91 | 140 |
| MC3 | 66 | B | -3.51 | 0.03 | 1.17 | 1.33 | 2.81 | 5.65 | 4 | 2.15 | 162 |
| | 46 | C | -2.30 | 0.01 | 1.21 | 1.33 | 2.81 | 5.77 | 24 | 1.95 | 146 |

Los valores $logK_{sat}$ para ambas captaciones disminuyen con la profundidad. En la MC3 existe un mayor escurrimiento del flujo superficial, por lo que se entiende que en esta captación los caudales sean intermitentes en épocas menos lluviosas.

Los valores $logK_{sat}$ para cada sitio de las dos microcuencas (ver Figura 22). Se aprecia que los valores medios de $logk_{sat}$ difieren en las crestas, en la MC3 la $K_{sat}$ aumenta con la profundidad, en la MC2 la $K_{sat}$ es mayor en C con relación al horizonte B, esto puede ser atribuido a las características del suelo Cambisol, recordando que los Cambisoles cubren el área de las crestas y valles de la MC3 y lo mismo para la MC2.

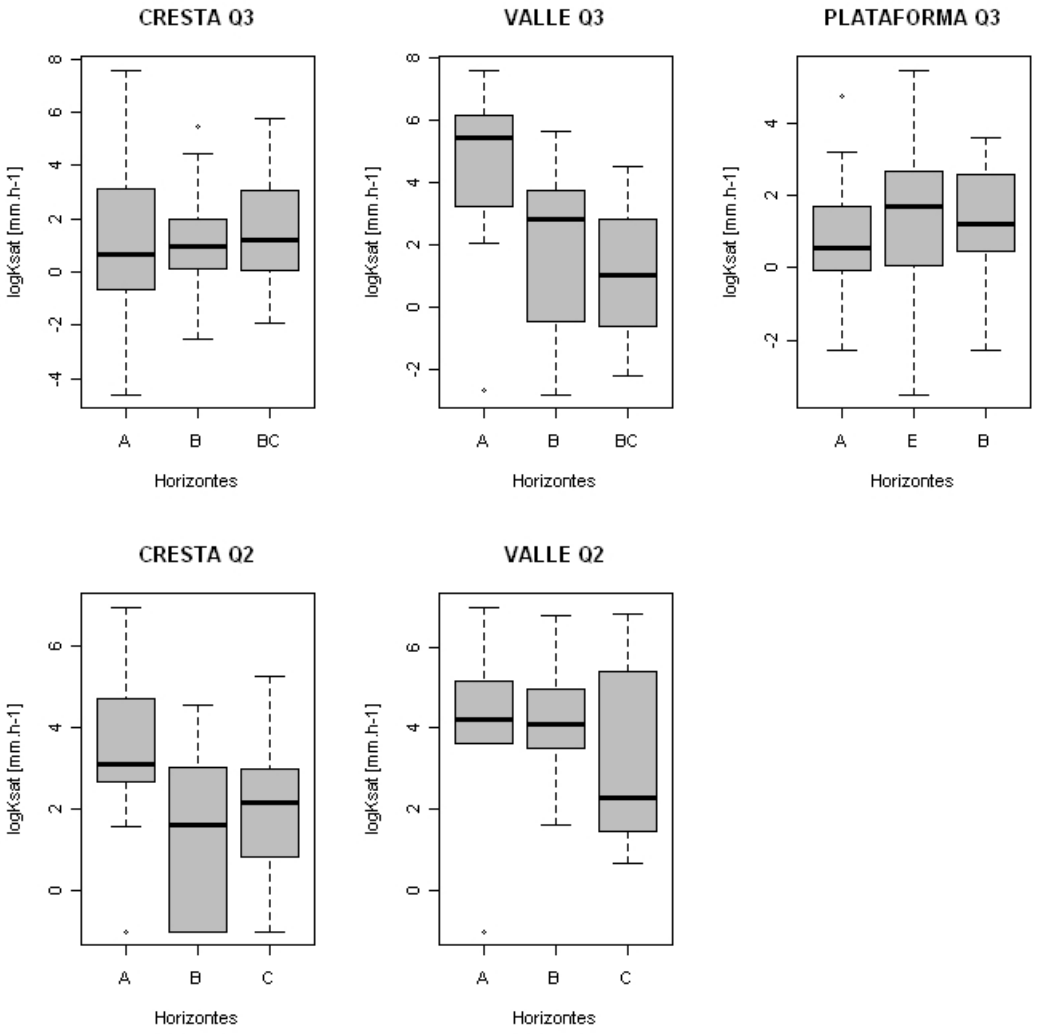



Figura 22. Valores $logK_{sat}$ de las microcuencas MC2 y MC3

En los flancos de los valles, el patrón de la conductividad hidráulica -disminuir con la profundidad- se dio para las dos microcuencas, por las razones que ya se discutieron anteriormente, como la pendiente del terreno por ejemplo.

### 4.5.2. Comparación de las rutas preferenciales del agua en EEP de los Cambisoles de la MC1 y MC2 y Gleysoles de la MC3.

En los Cambisoles de la MC3 no se hicieron EEP, razón por la cual se tomaron los estudios de los Cambisoles de la MC1 Viñan (2009) y de la MC2 de Bauer et al. (en preparación), Bogner et al. (2008) y Zeilinger et al. (2008).

En un remanente de bosque de la microcuenca MC1 a 1930 m snm. y con 77 % de pendiente, Viñan (2008) observó un flujo vertical. El modelo preparado para un periodo de 60 días continuos de precipitación y con la misma metodología que se hicieron los experimentos en la MC3 observó un flujo vertical (ver Figura 23). En este Cambisol encontró gran cantidad de piedras (90 Vol.-%.) y raíces grandes que condujeron el agua verticalmente.

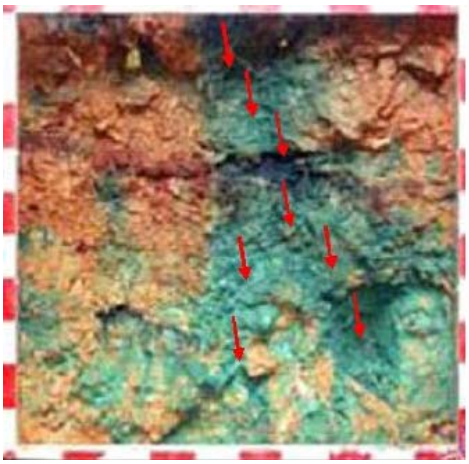


Figura 23. Flujo vertical del agua en un Cambisol de la MC1 (Viñan, 2009)

En otro Cambisol con propiedades esqueléticas se encontró en un bosque primario de la MC2 Bogner et al. (2008), aquí observaron flujos verticales, donde concluyeron que las piedras crean caminos preferenciales del agua, a eso se añade la heterogeneidad de de la distribución de humedad en el suelo y las distribución de las raíces en parte del perfil (Figura 24).

Figura 24. Flujos verticales del agua en un Cambisol con características esqueléticas en la MC2 (Bogner et al., 2008)

### 4.5.3. Comparación de los flujos de agua entre Cambisoles (MC1 y MC2) y Gleysoles (MC3)

Los flujos modelados con Hydrus 2D para los suelos Cambisoles (MC1 y MC2), indicaron que predominan los flujos verticales (Figura 25 A). En cambio, en los Gleysoles de la MC3 predominan los flujos laterales entre la interfaz del horizonte orgánico y a -10 cm del suelo mineral (Figura 25 B)

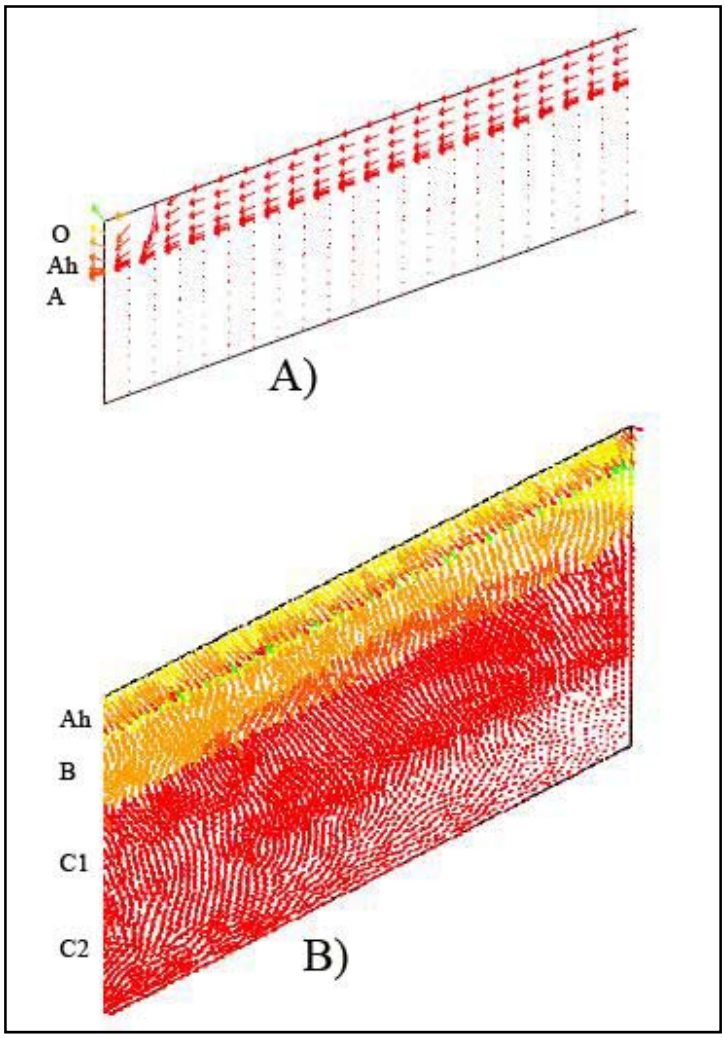



Figura 25. Flujo vertical y lateral modelados en Hydrus 2D, A) Gleysol, pendiente = 12 % y B) Cambisol, pendiente = 77 %

### 4.5.4. Modelaje del flujo de agua en Hydrus 2D para la microcuenca MC2

Para un tiempo similar al Modelo de la MC3 (11560 horas) ha sido elaborado un modelo en Hydrus 2D en una cresta de Montaña de la MC2 con pendiente mayor a 100 % (Bauer en preparación). La (Figura 26) muestra un flujo a través de la capa orgánica, el agua ingresa al suelo mineral y fluye lateralmente.

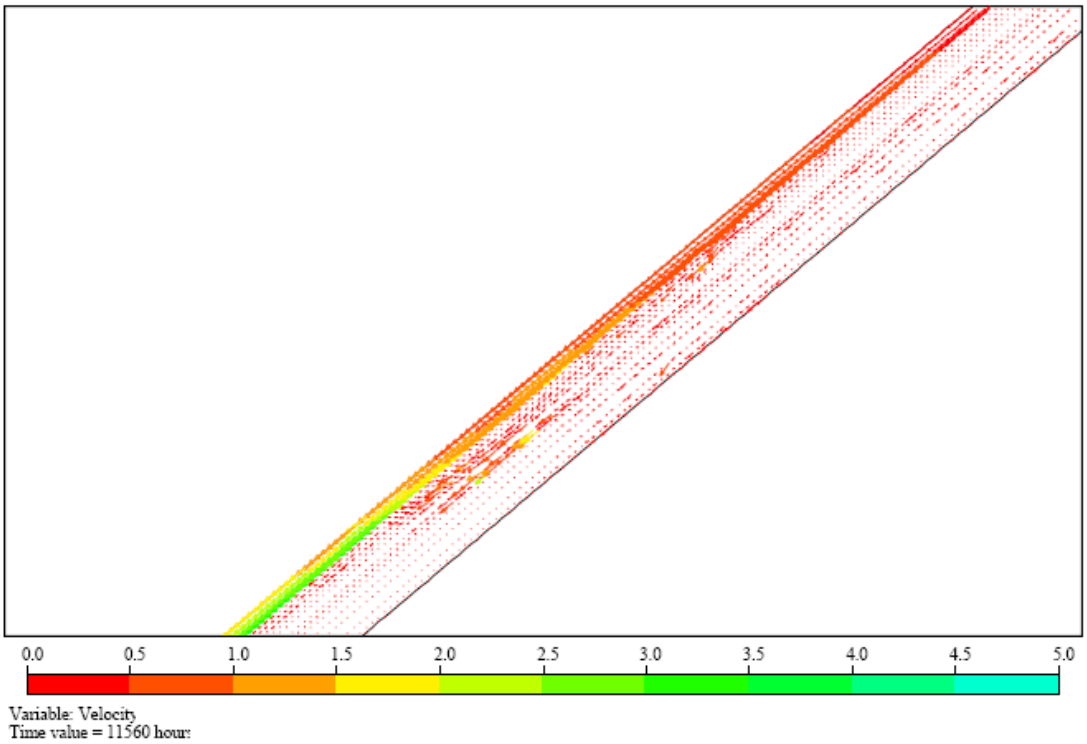



Figura 26. Modelo generado para la microcuenca Quebrada Dos (MC2)

La conductividad hidráulica aclara este acontecimiento; así, la $k_{sat}$ es mayor en el horizonte superior de los suelos de la MC2 (ver Cuadro 8 y Figura 26).

# 5 DISCUSIÓN

Los valores de la conductividad hidráulica del suelo varían con la topografía, en los valles fue mayor que en las crestas y la plataforma. Zeilinger et al. (2008) también observó que la $K_{sat}$ varia con la pendiente, en las crestas, con baja pendiente la $K_{sat}$ es menor y aumenta en los valles, normalmente con pendientes altas. En los flancos de los valles la conductividad disminuyó con la profundidad, Fleischbein et al. (2005) observó que la $K_{sat}$ disminuye con el incremento de la profundidad, lo cual también fue observado por Schellekens (2000) en un bosque lluvioso de Puerto Rico. La clara disminución de la $K_{sat}$ del suelo con la profundidad es comúnmente considerada como un pre-requisito adicional para que ocurra el interflujo (Casper, 2002). En las crestas y la plataforma la Ksat fue variable con la profundidad, en las crestas aumento progresivamente a mayor profundidad, mientras que la plataforma aumentó en el horizonte B. Markwardt (2005) encontró valores altos de conductividad hidráulica en un horizonte B de un horizonte Cámbico. El incremento de la conductividad en el horizonte E en los Gleysoles de la plataforma puede deberse a la textura arenosa (~70 % de arena).

Elsenbeer (2001) estudió los flujos preferenciales del agua en los suelos del área de San Francisco, en el cual demostró que los suelos se caracterizan por presentar respuestas rápidas a los eventos de lluvia. La $K_{sat}$ alta de la capa orgánica y la baja $K_{sat}$ del suelo mineral, probablemente resulte un estancamiento del agua en la parte superior del suelo mineral, con el consiguiente flujo lateral en la capa orgánica o cerca de la superficie del suelo mineral. Los experimentos de campo con el Brilliant Blue FCF en los Gleysoles de la plataforma mostraron un flujo lateral subsuperficial. El agua ingresó verticalmente la capa orgánica y se produjo un flujo lateral en el interfaz del suelo orgánico y mineral, excluyendo así el flujo sobre la superficie del suelo orgánico o flujo hortoniano. Goller et al. (2005) mediante la relación de isótopos estables de oxígeno observaron la ocurrencia de

flujo lateral durante los aguaceros que cayeron en el suelo pre-saturado en el área de las microcuencas MC1, MC2 y MC3. Adicionalmente Goller et al. (2005) con los resultados encontrados sugieren que las trayectorias de flujo de agua en éste ecosistema, en condiciones de humedad normales, están dominadas por la dirección vertical a través del perfil de suelo hacia los canales de evacuación, interrumpidas por cambios de flujo de corta duración a través de trayectorias laterales, principalmente en las capas orgánicas, durante los eventos de lluvia intensos (aguaceros). En el modelo Hydrus 2D Šimůnek et al. (1999), se modeló los flujos de agua para una serie temporal de 11000 horas con datos de lluvia (resolución = 5 minutos) de una estación climática cerca del área de estudio, se demostró que en condiciones lluvia (intensidad y frecuencia variable) el flujo de agua es lateral subsuperficial entre el horizonte orgánico y el horizonte mineral, tal como se observó en las 6 calicatas a 2000 m snm.

Las raíces de las plantas se encontraron mayormente en la capa orgánica. En el horizonte A también se observaron (15-20 u/dm$^2$), éstas pueden estar acelerando la $K_{sat}$ y por ende producen el flujo lateral a través del horizonte A. Wilcke et al. (2002) anuncia que la predominancia de raíces en la superficie de suelos de los bosques tropicales se debe a una elevada concentración de nutrientes para las plantas en el horizonte orgánico, alrededor de 30 - 713 t.ha$^{-1}$. En 5 de las 6 calicatas se encontraron raíces muertas entre 60-80 cm de profundidad y no tienen conexión con la superficie del suelo y por lo tanto no conducen el agua a mayor profundidad, con esto se presume que la cobertura vegetal antes fue diferente, con condiciones climáticas diferentes. Las raíces vivas se encuentran en mayor concentración hasta 30 cm de profundidad.

La densidad del suelo es un factor que influyó en la conductividad del agua, en suelos densos y con menor volumen de poros, la $K_{sat}$ fue baja. En 3 de las 6 calicatas se encontraron capas impermeables de alta densidad a 30 cm de profundidad. Estas capas permitieron el flujo lateral sobre el suelo suprayacente. También se encontraron capas endurecidas a 60 cm de profundidad, donde no

tuvieron efecto alguno. La estructura granular de la superficie del horizonte A conducen el agua a través de la matriz del suelo, el cambio de estructura y por ende la formación de macroporos. Kim et al. (2004) en suelos boscosos de Korea realizó experimentos con el Brilliant Blue y demostró que los macroporos del suelo a lo largo del perfil conducen el agua a mayores profundidades. Los macroporos en la capa superficial y las raíces de las plantas inducen a un flujo preferencial.

Las piedras que se encontraron aisladas no tuvieron efecto en la conducción del agua, cuando se encontró capas de piedras se observó que éstas forman caminos preferenciales para el agua. Bogner et al (2008) y Viñan (2009) encontraron suelos Cambisoles con propiedades esqueléticas, con piedras que cubren el 90 %.-Vol., en estos suelos los flujos fueron verticales.

Cuando se comparó los resultados de la microcuenca MC2 y MC1 Bogner et al. (2008), Bauer et al (en preparación), Zeilinger et al. (2008) y Viñan (2009) con los de la microcuenca MC3, se observó que la conductividad hidráulica es mayor en el horizonte A de la microcuenca MC3, demostrando así que esta microcuenca tiene una respuesta rápida a los eventos de lluvia, observado también por Goller et al. (2005). (Wainwright y Parsons, 2002), observaron coeficientes extremadamente altos de escorrentía, de hasta 1760 % en MC3 y 1070 % en MC1 y MC2, calculados a partir de las mediciones del nivel de agua con una resolución horaria, esto demuestra que la microcuenca MC3 en época menos lluviosos sus caudales son intermitentes, observaciones que fueron vistas en el campo.

# 6 CONCLUSIONES

- Las características físicas de los Cambisoles y Gleysoles difieren con la profundidad y por lo tanto influyen en la conductividad hidráulica saturada ($K_{sat}$).

- La pendiente del terreno es otro factor que influyó en la conductividad hidráulica, la energía del agua, en las áreas de mayor inclinación producen canales de rápida evacuación y por lo tanto influyen en la $K_{sat}$.

- El patrón de disminución de la $K_{sat}$ con la profundidad ocurrió únicamente en los flancos de los valles. En las crestas y plataforma la $K_{sat}$ fue variable con la profundidad.

- En los Gleysoles, las capas impermeables, la densidad aparente y la textura contribuyen para que se produzca el flujo lateral subsuperficial en el interfaz de la capa orgánica y el suelo mineral.

- La comparación de los flujos del agua entre los Cambisoles (MC2) y Gleysoles (MC3) en correspondencia con sus características físicas, indican que para que ocurra el flujo vertical en los Cambisoles fue necesaria la presencia de piedras y raíces; en tanto que se produzca el flujo lateral en los Gleysoles fue necesario la presencia de capas impermeables, así como la variación de densidad aparente en el perfil.

# 7 RECOMENDACIONES

- La utilización del Amoozemeter para la medición de la $K_{sat}$, se lo recomienda por ser un equipo de alta eficiencia en el tiempo de muestreo. Así mismo, el peso ligero y tamaño adecuado hace fácil el transporte en un bosque denso de Montaña.

- Para tener en cuenta la variabilidad espacial de la $K_{sat}$, en la modelación de los flujos de agua, es adecuado el uso de herramientas de computación. El paquete Random-Fields del programa R fue muy útil para la aleatorización de los valores de $K_{sat}$ en base a los experimentos de campo.

- Se recomienda el uso del marcador de suelo Brilliant Blue FCF para posteriores investigaciones en los suelos de los bosques tropicales de Montaña. La baja toxicidad y la buena visibilidad que produce en los suelos lo hace eficaz.

- El uso del Hydrus 2D para modelar los trayectorias del agua es muy importante para corroborar las observaciones de los flujos en los experimentos a escala de parcela.

- Tomar este estudio como un modelo base para caracterizar la dinámica del agua y la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica para posteriores investigaciones que estén relacionados a la hidrología de suelos de montañas tropicales.

# 8 BIBLIOGRAFÍA

Amoozegar, A. 1989. A compact, constant-head permeameter for measuring saturated 849 hydraulic conductivity of the vadose zone. Soil Sci. Soc. Am. J. 53, pp. 1356-1361.

Balslev, H., y B. Øllgaard. 2001. Mapa de vegetación del sur de Ecuador. en: Aguirre, J; Madsen, E; Cotton,E; Balslev, H. (editores).Botánica Austroecuatoriana. Estudios sobre los recursos vegetales en las provincias de El Oro, Loja y Zamora-Chinchipe, Ediciones Abya-Yala: Quito, Ecuador, pp. 51-64.

Bauer, F; Viñan, P; Balcázar, L; Bogner, C; Zeilinger, J; Huwe, B and Valarezo, C. en prep. Flow paths in soils of steep, landslide affected and adjacent plateau sites in a montane rain forest of South Ecuador 18 p.

Bastos G; Oliveira S. 2003 Densidad de probabilidad como herramienta en la caracterización de la conductividad hidráulica saturada de los suelos. *VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. La Serena, Chile.* Disponible en http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/densidad.pdf

Bogner, C; Engelhardt, S; Zeilinger, J; Huwe, B. 2008. Visualization and Analysis of Flow Patterns and Water Flow Simulations in Disturbed and Undisturbed Tropical Soils. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, Ecological Estudies pp 402-412. Disponible en www.tropicalmountainforest.org

Bonell, M. 1998. Possible impacts of climate variability and change on tropical forest hydrology. UNESCO, Division of Water Sciences, 1 Rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15, France. p229.

Bruijnzeel, L. A. 1990. Hydrology of Moist Tropical Forest and Effects of Conversion: a State of Knowledge Review, UNESCO, Paris, and Free

University, Amsterdam, p. 224.

Bruijnzeel, L.A. 2000. An Ecohydrological perspective of mountain cloud forests. en: Gladwell, J.S. (editor). Proceedings of the Second International Colloquium on Hydrology and Water Management in the Humid Tropics, UNESCO, Paris and CATHALAC: Panama, pp. 329-359.

Buttle, J.M., y D.J. McDonald (2000): Soil macroporosity and infiltration characteristics of a forest podzol. *Hydrological Processes* **14**, 831-848.

Casper, M. 2002. Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald). Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Heft 210.

Cousin I., Nicoullaud, B., Coutadeur, C., 2003. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. INRA, Unite´ de Science du Sol-SESCPF, p 97-98.

Daugherty, H.E. 1973. The Montecristo cloud-forest of El Salvador - A chance for protection. Biological Conservation 5, p 227-230.

Dias, W; Isaias, F. 1990. Construcción y calibración de un modelo hidráulico, para visualizar el flujo del agua subterránea hacia drenes paralelos, Tesis Ing. Agrícola. Loja, Universidad Nacional de Loja, Escuela de Ingeniería agrícola. pp. 5-6.

Elsenbeer H (2001) Hydrologic flowpaths in tropical rainforest soilscapes – a review. Hydrol Proc 15:1751–1759

FAO, Guía para la descripción de suelos. 2009. Proyecto FAO-SWALIM, Nairobi, Kenya. 4ta edición Universidad de San Simón, Bolivia. p. 110.

Fleischbein, K; Wilcke, W; Goller, R; Boy, J; Valarezo, C; Zech3 y Knoblich, K.

2005. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrol. Process.* Consultado el 10 de nov. 2009 19, 1355–1371. Disponible en http://www.interscience.wiley.com

Flury, M; Fluhler, H., 1994. Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies a toxicological overview. J. Environ. Qual. 23, p 1108

García, D; Andrade, M; Regalado, C; Álvarez, j. 2008. Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica medida con el permeámetro de de Philip-Dunne. ICIA, Instituto canario de Investigaciones agrarias. SITA, Servicio de Investigacion y tecnología Agraria, España. 4 p.

Goller, R; Wilcke, W; Leng, M; Tobschall, H; Wagner K; Valarezo, C and Zech, W. 2005. Tracing water paths through small catchments under a tropical montane rain forest in south Ecuador by an oxygen isotope approach. Elsevier, Journal of hydrology. 14 p.

Huwe, B. 1998. Einführung in die Bodenphysik, Universität Bayreuth.

Jury, W; Horton, R. 2004. Soil physics. Determinación del índice de área vertical en dependencia del índice de área foliar, en un bosque de cresta andino en la reserva de Biosfera San Francisco, 6ta ed. Wiley. EEUU. p. 48

Kim, J.G; Chon, C.M; Lee J.S. 2004. Effect of structure and texture on infiltration flow pattern during flood irrigation. Springer-Verlag 2004. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. Environmental Geology 46:962–969

Kuhnert, P y Venables, W. 2005. An Introduction to R: Software for StatisticalModelling & Computing. CSIRO Mathematical and Information Sciences Cleveland, Australia pp. 28. Disponible en. Consultado en jun. 2008 http://www.sciviews.org/Tinn-R y https://www.sourceforge.net/project/tinn-r

Liess, M; Glaser, B y Bernd Huwe. 2009. Digital soil mapping in southern Ecuador.

Erdkunde. Vol. 63 · No. 4 · pp. 309–319

Ohrstrom, P; Hamed, Y; Persson; Berndtsson, R. 2003. Characterizing unsaturated solute transport by simultaneous use of dye and bromide. Journal of Hydrology. Elsevier pp 23-35

R Development Core Team. 2009. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL. Disponible en http://www.R-project.org.

Ruiz, E; Venialgo, F; Crispín; Gutierrez, A; Ingaramo, N; Briend, O. 2004. Infiltración de agua en el suelo con diferentes usos en el Departamento 9 de Julio (Chaco) Cátedra de Conservación y Manejo de Suelos – Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional del Nordeste. Disponible en http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2004/5-Agrarias/A-070.pdf

Schaap, M. 2001 Rosetta Lite DLL (Dynamically Linked Library) at the U.S. Salinity Laboratory (mschaap@ussl.ars.usda.gov)

Stadtmüller, T. 1987. Cloud Forests in the Humid Tropics. A Bibliographic Review. The United Nations University, Tokyo y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica, 81 p.

Schmocker-Fackel, P. 2004. A Method to Delineate Runoff Processes in a Catchment and its Implications for Runoff Simulations. Tesis de Dipl. Albert-Ludwigs-Universität, Germany. 197 p. Base de datos TMF. Disponible en http://www.tropicalmountainforest.org

Schellekens, J. (2000): Hydrological processes in a humid tropical rain forest: a combined experimental and modelling approach. Ph.D. thesis, Free University of Amsterdam.

Schmocker-Fackel, F. Naef, and S. Scherrer 2006. Identifying runoff processes

on the plot and catchment scale. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 3, 2063–2100. Consultado el 11 de mar. 2008. Disponible en http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/3/2063/2006/. pp 2065

Simunek, J; Sejna, M; and van Genuchten, M. Th. 1999. The Hydrus 2D Software Package for Simulating Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 2.0, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California. p. 253

Timbe, L; De Bievre, B; Feyen, J; Jacques, D. 1999. Hydraulic characterisation of hill slope soils. International Workshop of EurAgEng's Field of interested on Soil and Water, Universidad de Cuenca, Revista anales. Cuenca, Ec., pp. 446-456

Venables, W. 1992. Introducción a R. Notas sobre R: Un entorno de programación para análisis de datos y gráficos. 106 p. Disponible en http://cran.r-project.org/doc/contrib/R-intro-1.1.0-espanol.1.pdf

Valarezo, C; Iñiguez, M; Valarezo, L; Guaya, P. 1998. Condiciones Físicas de los suelos de la región Sur del Ecuador. Una Guía para proyectos de Riego, Drenaje, Manejo y Conservación de suelos. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ec., 227p.

Viñan P. 2008. Simulación del Flujo de Agua en Microcuencas del Bosque Montano de la Estación Científica San Francisco. Tesis Ing. Forestal, Loja, Ec., Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. p. 40

Wainwright, J., y A.J. Parsons (2002): The effect of temporal variations in rainfall on scaledependency in runoff coefficients. *Water Resources Research* **38**, 1271,

Wilcke, W; Yasin, S; Abramowski, U; Valarezo, C; Zech, W. 2002. Nutrient storage and turnover in organic layers under tropical montane rain forest in Ecuador. European Journal of Soil Science, pp. 15-27. disponible en http://www3.interscience.wiley.com/journal/118960969/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0

WRB (World Reference Base for Soil Resources). 2006 IUSS Working Group. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome, Italia. p.130. disponible en http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/images/resources/pdf_documents/wsrr103e.pdf

# ANEXOS

## Anexo 1. Hoja de Campo para la medición de la Conductividad Hidráulica Saturada del Suelo

**SAMPLE DATA SHEET**

Measurement No. _____ Conducted by _____

Location _____ Date _____

Weather Condition _____ Temperature _____

Horizon _____ Source of Water _____

Hole depth _____ cm

Distance between reference level and soil surface + _____ cm

Distance from the hole bottom to the reference level (D) = _____ cm

Desired water depth in hole (H) - _____ cm

Constant-head tube setting (d) = _____ cm

Measured (Actual) water level in hole

Initial _____ cm

Final _____ cm

Radius of the hole (r) _____ cm

Clock time

Start saturation _____

Steady-state reading _____

Reservoirs Used for Measurement of the Steady-State Flow Rate

Flow Measuring Reservoir Only _____ Conversion Factor (C.F.) = 20 $cm^2$

Both Flow Measuring and Main Reservoirs _____ Conversion Factor (C.F.) = 105 $cm^2$

(To obtain flow volume multiply change in water level by the appropriate C.F. from above )

| Clock Time h:min | Reservoir Reading cm | Δt min | Change in Water Level cm | Flow Volume $cm^3$ | Q $cm^3/min$ | Q $cm^3/h$ | $K_{sat}$ cm/h |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Average of last three measurements: $K_{sat}$ = _____ cm/h _____ (other units)

COMMENTS:_____

39

## Anexo 2.

### Distribución estadística de los valores de la $K_{sat}$

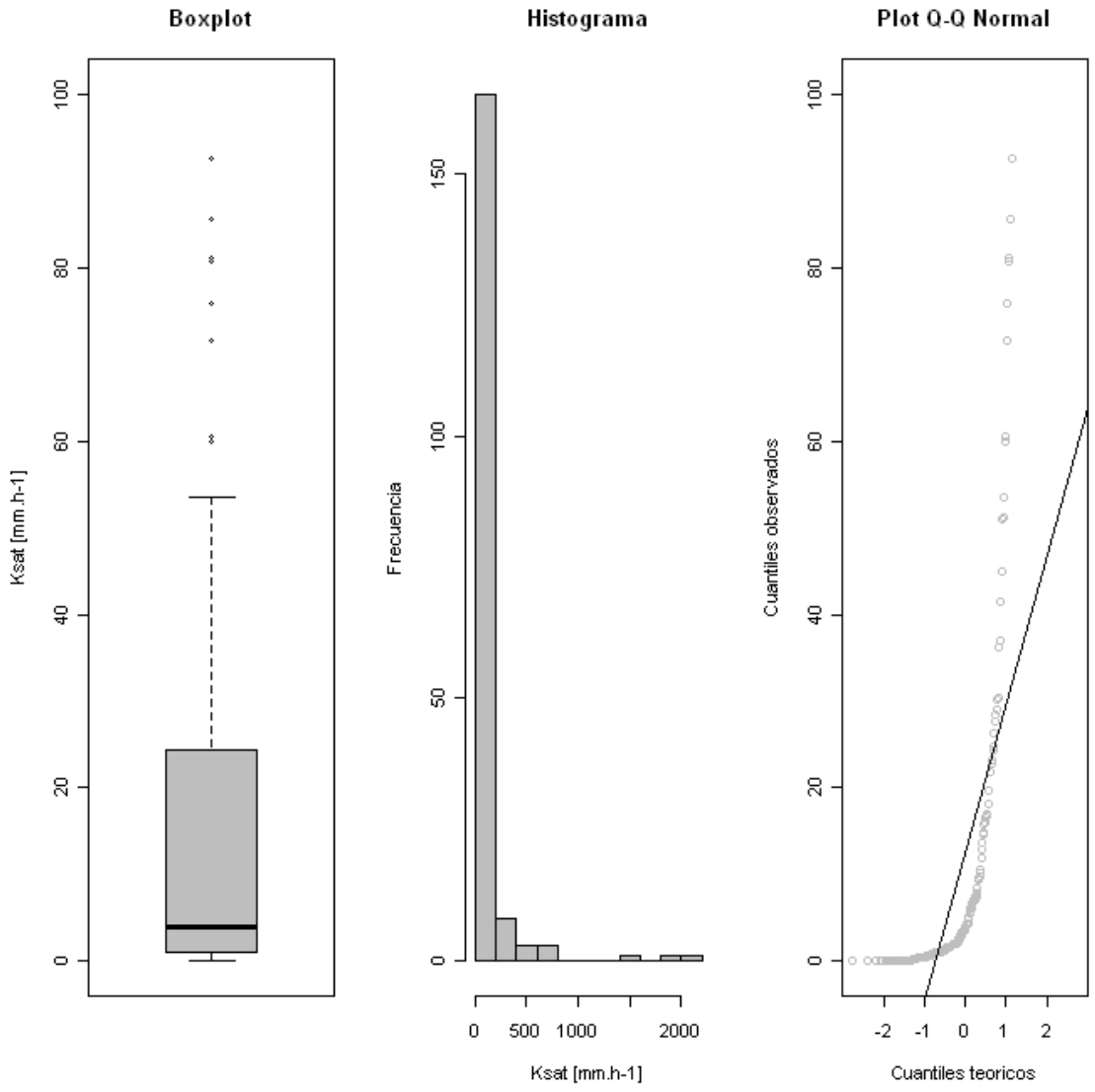
El valor de la mediana para el conjunto de valores de $K_{sat}$ es significativamente menor que el valor promedio (Cuadro 9) lo que indica que la distribución está sesgada y no sigue un patrón normal (Figura 25). Para tal efecto el test de Shapiro-Wilk fue W = 0.31 y p-valor = 0.0002 con un nivel de significación de α = 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis de que: "Los valores de $K_{sat}$ provienen de una distribución normal" y se acepta la hipótesis alterna: de que "Los valores de $K_{sat}$ medidos en el campo con el Amoozemeter no se ajusta a la distribución normal".

**Estadísticos descriptivos y prueba de Shapiro-Wilk para todo el conjunto de valores de Ksat medidos con el Amoozemeter.**

| Descipcion estadistica | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [mm.h-1] | | | | | | | % | Shapiro-Wilk | |
| N | Min. | 1er Qu. | Med. | Prom. | 3er Qu. | Max. | Desv. Est. | CV | W | p-valor |
| 182 | 0.01 | 1.03 | 3.86 | 75.99 | 24.13 | 2030.20 | 257.59 | 339.00 | 0.31 | 0.0002 |

Los valores reales de conductividad para todo el conjunto de valores (Plataforma + Valles + Crestas) medidos con el Amoozemeter muestran gran dispersión en los datos y altos coeficientes de variación, por lo que no es posible comparar los valores medios cuando existen valores atípicos.

**Anexo 2. Continuación**




**Histograma, diagrama de caja "boxplot" y Q-Q plot Normal para el conjunto de valores de $K_{sat}$ en la MC3.**

La asimetría a la derecha de la cola del histograma también se corrobora por la forma de la cura S -al pasar transversalmente por la línea de ajuste- que tiene el grafico QQ-Plot

## Anexo 2. Continuación

### Transformación de los valores de la $K_{sat}$

En el Cuadro 10 se presentan los estadísticos descriptivos de los valores $logK_{sat}$ para el conjunto de datos de la microcuenca MC3.

### Estadísticos descriptivos y prueba de Shapiro-Wilk para todo el conjunto de valores Log-normal de $K_{sat}$

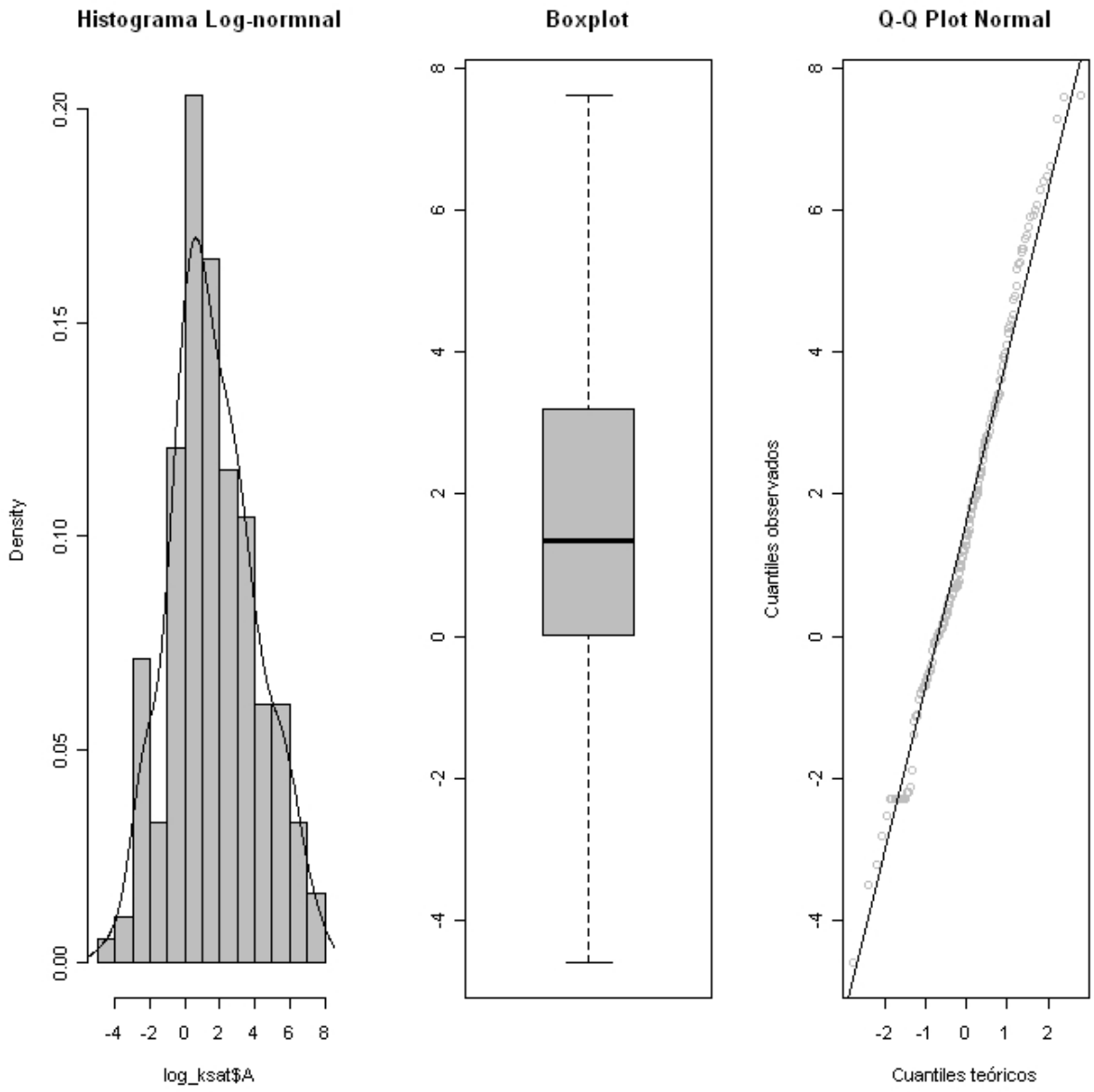
| Descripcion estadistica | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [mm.h-1] | | | | | | | % | Shapiro-Wilk | |
| N | Min. | 1st Qu. | Med. | Prom. | 3rd Qu. | Max. | Desv. Est. | CV | W | p-value |
| 182 | -0.6052 | 4.0318 | 5.3505 | 5.6174 | 7.1832 | 11.6159 | 2.44 | 45.6 | 0.988 | 0.13 |

Los valores $LogK_{sat}$: promedio y mediana son muy parecidos (Cuadro 6) lo que indica que la distribución es simétrica y sigue un patrón normal (Figura 25). El test de Shapiro-Wilk muestra un (p-valor > 0.05) con W cerca de la unidad por lo que se acepta la distribución de probabilidad Log-normal.

De antemano, por la extensa literatura científica, se sabe que la conductividad hidráulica del suelo sigue una distribución log-normal (Bastos y OLiveira, 2003). (García et al., 2008) en ensayos de campo con el permeámetro de Philip-Dunne seleccionando distintos tipos de distribuciones (normal, log-normal y exponencial) comprobó que la distribución $logK_{sat}$ o log-normal es la distribución de mayor ajuste para los valores de conductividad hidráulica medidos en el campo.

**Anexo 2. Continuación**

**Representación gráfica de los valores transformados log-normal: Histograma, Diagramas de caja y bigote ("*boxplot*") y Q-Q plot (*quantil to quantil plot*)**



**Anexo 3. Muestras de suelo para la determinación de: potencial de agua, contenido de humedad y color en húmedo y seco**

| | H | Peso campo | Peso Seco | pF0,5 | pF1 | pF1,5 | pF2 | θm | θv | Da | color humedo | color seco |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 | Ah | 284.80 | 232.00 | 285.50 | 285.20 | 282.93 | 278.77 | 0.23 | 0.25 | 1.11 | 7.5YR3/1 | 2.5Y6/1 |
| | Ah | 263.90 | 207.60 | 267.40 | 267.10 | 264.57 | 258.70 | 0.27 | 0.27 | 0.98 | 7.5YR3/1 | 2.5Y6/1 |
| | Ah | 268.10 | 209.50 | 270.70 | 270.53 | 267.70 | 262.40 | 0.28 | 0.26 | 0.92 | 7.5YR3/1 | 2.5Y5/1 |
| | Ah | 253.20 | 194.50 | 258.00 | 257.10 | 253.00 | 247.13 | 0.30 | 0.25 | 0.82 | 7.5YR3/1 | 2.5Y4/1 |
| | Ah | 278.90 | 228.60 | 280.70 | 280.57 | 279.10 | 275.47 | 0.22 | 0.24 | 1.08 | 7.5YR3/2 | 2.5Y5/1 |
| | Ah | 250.10 | 195.00 | 252.40 | 252.37 | 250.13 | 245.03 | 0.28 | 0.28 | 0.98 | 7.5YR2/2 | 2.5Y5/1 |
| | A | 322.30 | 294.80 | 320.55 | 320.30 | 320.27 | 319.90 | 0.09 | 0.17 | 1.84 | 7.5YR5/1 | 2.5Y7/1 |
| | A | 320.90 | 291.20 | 319.10 | 318.77 | 318.40 | 317.30 | 0.10 | 0.18 | 1.76 | 7.5YR5/1 | 2.5Y7/2 |
| | A | 306.50 | 276.50 | 305.65 | 305.43 | 305.20 | 304.57 | 0.11 | 0.19 | 1.76 | 7.5YR5/1 | 2.5Y7/1 |
| | A | 305.90 | 275.20 | 304.75 | 304.53 | 303.87 | 302.93 | 0.11 | 0.19 | 1.75 | 7.5YR4/1 | 2.5Y6/1 |
| | A | 306.30 | 274.40 | 304.75 | 304.30 | 303.53 | 302.20 | 0.12 | 0.18 | 1.57 | 7.5YR5/1 | 2.5Y7/1 |
| | A | 306.50 | 276.60 | 305.30 | 305.03 | 304.60 | 303.60 | 0.11 | 0.19 | 1.76 | 7.5YR6/1 | 2.5Y7/2 |
| | B1 | 299.40 | 257.30 | 301.90 | 302.03 | 301.80 | 301.00 | 0.16 | 0.22 | 1.32 | 10YR6/1 | 2.5Y8/1 |
| | B1 | 286.50 | 238.30 | 287.85 | 287.97 | 287.90 | 286.80 | 0.20 | 0.26 | 1.27 | 7.5YR7/1 | 10YR8/1 |
| | B1 | 268.90 | 197.80 | 260.35 | 260.57 | 260.60 | 259.73 | 0.36 | 0.35 | 0.98 | 5YR6/8 | 10YR8/6 |
| | B1 | 265.80 | 208.90 | 268.05 | 268.27 | 268.50 | 266.37 | 0.27 | 0.29 | 1.07 | 5YR6/9 | 7.5YR7/4 |
| | B1 | 285.10 | 231.10 | 287.45 | 287.47 | 287.50 | 286.50 | 0.23 | 0.27 | 1.16 | 10YR7/4 | 10YR8/3 |
| | B1 | 285.70 | 237.80 | 288.30 | 288.33 | 288.30 | 286.70 | 0.20 | 0.24 | 1.17 | 7.5YR6/4 | 10YR8/2 |
| | B1 | 268.80 | 215.20 | 271.40 | 271.43 | 271.20 | 269.70 | 0.25 | 0.29 | 1.16 | 7.5YR7/8 | 10YR8/4 |
| | B2 | 271.20 | 210.30 | 274.70 | 274.67 | 273.73 | 272.60 | 0.29 | 0.29 | 0.99 | 10YR7/6 | 10YR8/3 |
| | B2 | 263.20 | 204.60 | 265.55 | 265.57 | 264.90 | 264.20 | 0.29 | 0.30 | 1.05 | 10YR7/6 | 10YR8/3 |
| | B2 | 273.20 | 213.50 | 277.65 | 277.47 | 276.80 | 275.37 | 0.28 | 0.29 | 1.02 | 2.5Y7/6 | 2.5Y8/3 |
| | B2 | 265.40 | 208.50 | 269.95 | 269.87 | 269.07 | 267.60 | 0.27 | 0.30 | 1.09 | 2.5Y8/6 | 2.5Y8/3 |
| | B2 | 275.70 | 215.90 | 279.95 | 279.77 | 279.33 | 278.03 | 0.28 | 0.29 | 1.03 | 10YR8/6 | 2.5Y8/2 |
| M2 | Ah | 284.80 | 237.30 | 287.03 | 286.27 | 284.07 | 280.47 | 0.20 | 0.25 | 1.26 | 10YR3/1 | 10YR6/1 |
| | Ah | 271.00 | 221.90 | 274.67 | 273.40 | 270.60 | 266.80 | 0.22 | 0.24 | 1.10 | 10YR3/1 | 10YR4/1 |
| | Ah | 297.10 | 256.80 | 298.70 | 298.37 | 296.47 | 294.47 | 0.16 | 0.22 | 1.39 | 7,5YR4/1 | 7,5YR6/1 |
| | Ah | 272.10 | 221.10 | 276.27 | 273.70 | 270.67 | 266.63 | 0.23 | 0.25 | 1.07 | 7,5YR2/1 | 10YR3/1 |
| | Ah | 308.20 | 276.50 | 307.53 | 307.37 | 306.73 | 305.23 | 0.11 | 0.19 | 1.66 | 10YR4/1 | 10YR5/1 |
| | A | 319.30 | 286.60 | 319.23 | 318.73 | 318.13 | 317.20 | 0.11 | 0.20 | 1.74 | 7,5YR6/1 | 7,5YR7/1 |
| | A | 303.40 | 258.10 | 304.33 | 303.90 | 302.50 | 300.07 | 0.18 | 0.25 | 1.45 | 10YR4/1 | 10RY5/1 |
| | A | 322.40 | 287.50 | 321.10 | 320.80 | 320.53 | 319.70 | 0.12 | 0.21 | 1.69 | 7,5YR4/1 | 7,5YR6/2 |
| | A | 316.90 | 288.30 | 316.57 | 316.17 | 315.20 | 313.77 | 0.10 | 0.17 | 1.74 | 7,5YR4/1 | 10YR7/2 |
| | A | 302.60 | 268.80 | 303.53 | 303.30 | 218.10 | 301.17 | 0.13 | 0.19 | 1.49 | 7,5YR4/1 | 10YR7/2 |
| | A | 304.70 | 263.80 | 304.60 | 304.47 | 304.33 | 302.77 | 0.16 | 0.23 | 1.51 | 7,5YR4/1 | 7,5YR6/1 |
| | B | 320.80 | 282.10 | 320.50 | 320.43 | 320.37 | 319.47 | 0.14 | 0.23 | 1.65 | 10YR8/8 | 10YR8/6 |
| | B | 305.90 | 265.90 | 307.23 | 307.17 | 306.87 | 305.37 | 0.15 | 0.23 | 1.51 | 2,5Y7/6 | 10YR8/6 |
| | B | 307.40 | 271.70 | 308.27 | 308.10 | 307.73 | 306.20 | 0.13 | 0.21 | 1.57 | 10YR8/8 | 10YR8/6 |
| | B | 329.80 | 303.60 | 330.50 | 330.40 | 330.03 | 329.27 | 0.09 | 0.16 | 1.89 | 7,5YR8/8 | 10YR8/3 |
| | B | 317.70 | 283.20 | 319.80 | 319.20 | 318.07 | 316.40 | 0.12 | 0.20 | 1.60 | 5YR6/8 | 7,5YR7/6 |
| | B | 307.80 | 270.20 | 309.00 | 308.47 | 307.53 | 306.20 | 0.14 | 0.22 | 1.55 | 5YR6/8 | 7,5YR7/6 |

## Anexo 3. Continuación

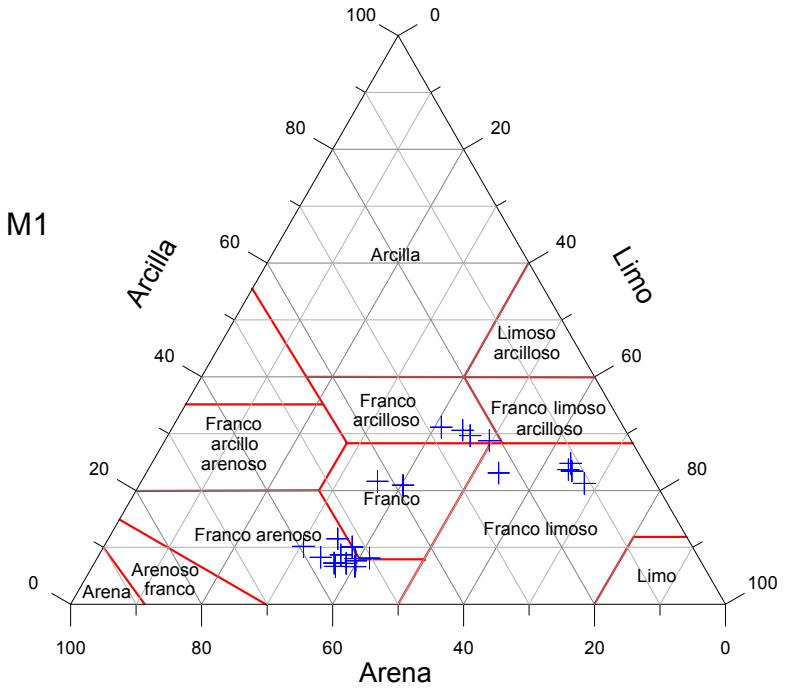
| | H | W campo | W seco | pF0,5 | pF1 | pF1,5 | pF2 | θm | θv | Da | color | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | humedo | seco |
| | Ah | 278.80 | 222.30 | 280.00 | 278.17 | 273.90 | 267.13 | 0.25 | 0.25 | 0.99 | 7,5YR3/1 | 2,5Y4/1 |
| | Ah | 260.10 | 198.60 | 260.07 | 258.97 | 253.50 | 247.00 | 0.31 | 0.26 | 0.84 | 7,5YR3/1 | 2,5Y4/1 |
| | Ah | 293.00 | 174.40 | 244.43 | 243.93 | 238.93 | 230.43 | 0.68 | 0.42 | 0.62 | 7,5YR2/2 | 2,5Y4/1 |
| | Ah | 255.10 | 191.70 | 256.40 | 255.47 | 253.43 | 243.43 | 0.33 | 0.25 | 0.76 | 10YR2/2 | 2,5Y4/1 |
| | Ah | 254.70 | 192.90 | 254.07 | 250.43 | 245.50 | 239.27 | 0.32 | 0.26 | 0.81 | 10YR2/3 | 2,5Y5/1 |
| | A | 319.80 | 284.70 | 286.97 | 320.17 | 319.53 | 318.13 | 0.12 | 0.20 | 1.65 | 7,5YR2/2 | 10YR6/2 |
| | A | 315.10 | 280.20 | 317.67 | 316.80 | 315.43 | 313.87 | 0.12 | 0.21 | 1.66 | 7,5YR3/2 | 10YR6/2 |
| | A | 336.20 | 304.30 | 336.00 | 335.40 | 334.93 | 333.23 | 0.10 | 0.20 | 1.87 | 7,5YR3/2 | 2/5Y6/1 |
| | A | 322.80 | 292.80 | 320.57 | 319.90 | 319.17 | 318.37 | 0.10 | 0.18 | 1.78 | 7,5YR5/1 | 10YR6/2 |
| | B | 204.10 | 168.40 | 306.90 | 306.80 | 306.37 | 304.27 | 0.21 | 0.12 | 0.54 | 10YR8/8 | 10YR7/6 |
| M3 | B | 293.30 | 251.30 | 297.13 | 297.07 | 296.27 | 292.97 | 0.17 | 0.23 | 1.36 | 10YR7/8 | 7,5YR7/6 |
| | B | 296.70 | 258.90 | 302.33 | 301.87 | 298.87 | 296.17 | 0.15 | 0.21 | 1.41 | 5YR6/8 | 5YR7/8 |
| | B | 303.40 | 267.50 | 307.50 | 307.20 | 306.33 | 303.90 | 0.13 | 0.20 | 1.50 | 10YR8/8 | 10YR8/6 |
| | B | 299.20 | 265.50 | 303.47 | 303.43 | 302.80 | 299.87 | 0.13 | 0.19 | 1.53 | 10YR7/8 | 10YR8/6 |
| | B | 308.60 | 273.90 | 311.70 | 311.53 | 311.00 | 308.67 | 0.13 | 0.20 | 1.59 | 10YR8/8 | 10YR8/6 |
| | B | 309.40 | 274.40 | 313.10 | 312.97 | 311.70 | 309.03 | 0.13 | 0.20 | 1.58 | 10YR7/8 | 10YR8/4 |
| | B | 306.70 | 281.40 | 312.03 | 311.57 | 310.47 | 308.13 | 0.09 | 0.15 | 1.66 | 10YR8/6 | 10YR8/3 |
| | B | 307.60 | 278.80 | 311.57 | 310.67 | 309.47 | 306.57 | 0.10 | 0.16 | 1.57 | 7,5YR6/6 | 7,5YR8/3 |
| | B | 298.10 | 270.30 | 303.50 | 302.80 | 301.10 | 298.17 | 0.10 | 0.16 | 1.59 | 7,5YR6/6 | 7,5YR8/3 |
| | B | 346.30 | 323.80 | 348.00 | 348.00 | 347.70 | 346.30 | 0.07 | 0.14 | 2.00 | 7,5YR7/6 | 7,5YR8/3 |
| | B | 301.90 | 273.40 | 308.83 | 308.33 | 307.13 | 303.80 | 0.10 | 0.17 | 1.59 | 10YR7/8 | 10YR8/6 |
| | Ah | 281.2 | 232.10 | 283.00 | 282.77 | 281.10 | 277.53 | 0.21 | 0.25 | 1.2 | 7,5YR2/3 | 10YR6/1 |
| | Ah | 264.7 | 214.80 | 270.10 | 267.57 | 264.00 | 259.07 | 0.23 | 0.22 | 1.0 | 10YR2/1 | 10YR6/1 |
| | Ah | 262.4 | 204.00 | 267.80 | 266.37 | 262.47 | 255.17 | 0.29 | 0.26 | 0.9 | 7,5YR3/1 | 2,5Y7/1 |
| | Ah | 242.6 | 181.40 | 249.10 | 246.50 | 242.23 | 234.23 | 0.34 | 0.27 | 0.8 | 2,5Y3/1 | 2,5Y7/1 |
| | Ah | 274.5 | 225.90 | 279.00 | 276.90 | 273.67 | 269.60 | 0.22 | 0.24 | 1.1 | 10YR4/1 | 2,5Y7/1 |
| | Ah | 259.9 | 207.80 | 267.70 | 265.87 | 262.30 | 256.63 | 0.25 | 0.22 | 0.9 | 10TR4/1 | 2,5Y7/1 |
| | A1 | 321.5 | 296.90 | 321.80 | 321.10 | 320.13 | 319.47 | 0.08 | 0.15 | 1.8 | 2,5Y6/1 | 10YR7/1 |
| | A1 | 341.7 | 317.30 | 342.00 | 341.30 | 341.20 | 331.83 | 0.08 | 0.15 | 2.0 | 10YR6/1 | 2,5Y7/1 |
| M4 | A1 | 339.9 | 307.70 | 332.70 | 315.17 | 331.33 | 330.87 | 0.10 | 0.21 | 2.0 | 2,5Y6/2 | 10YR7/2 |
| | A1 | 316.2 | 290.00 | 315.50 | 307.00 | 314.07 | 312.90 | 0.09 | 0.16 | 1.7 | 2,5Y7/1 | 10YR8/1 |
| | A1 | 307.2 | 282.40 | 307.70 | 247.37 | 306.07 | 304.90 | 0.09 | 0.15 | 1.7 | 2,5Y7/1 | 2,5Y8/1 |
| | A1 | 315.6 | 290.90 | 315.80 | 314.03 | 313.10 | 312.60 | 0.08 | 0.15 | 1.7 | 2,5Y7/1 | 10YR8/1 |
| | A2 | 318.7 | 280.40 | 314.80 | 247.33 | 314.13 | 313.10 | 0.14 | 0.22 | 1.6 | 7,5YR3/2 | 10YR4/2 |
| | A2 | 305.8 | 276.60 | 305.60 | 304.67 | 304.30 | 304.13 | 0.11 | 0.17 | 1.6 | 7,5YR3/3 | 10YR6/3 |
| | A2 | 317.6 | 284.40 | 316.10 | 315.37 | 315.10 | 315.03 | 0.12 | 0.20 | 1.7 | 7,5YR3/2 | 10YR5/3 |
| | A2 | 294.1 | 261.90 | 291.20 | 290.17 | 289.57 | 268.20 | 0.12 | 0.21 | 1.7 | 10YR2/2 | 7,5YR4/2 |
| | A1 | 292.1 | 262.50 | 290.00 | 288.47 | 287.70 | 285.70 | 0.11 | 0.19 | 1.6 | 7,5YR3/2 | 7,5YR3/2 |

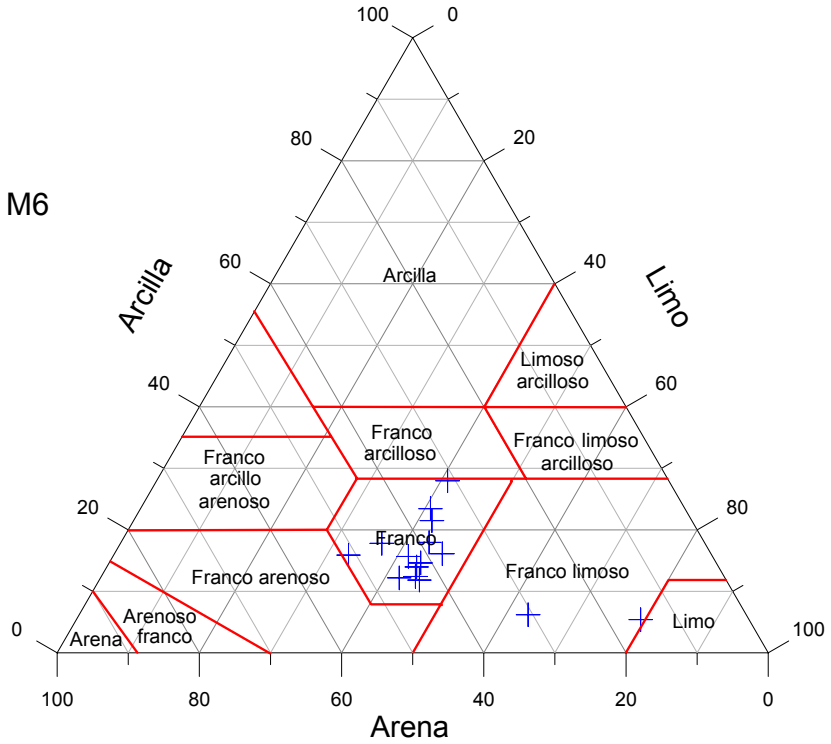
## Anexo 3. Continuación

| | H | W campo | W seco | pF0,5 | pF1 | pF1,5 | pF2 | θm | θv | Da | color humedo | color seco |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | 308.7 | 274.80 | 308.77 | 308.47 | 307.23 | 305.45 | 0.12 | 0.21 | 1.7 | 7,5YR3/1 | 7,5YR7/1 |
| | Ah | 266.0 | 214.00 | 266.70 | 266.03 | 263.13 | 256.90 | 0.24 | 0.22 | 0.9 | 7,5YR3/1 | 7,5YR6/1 |
| | A | 297.6 | 261.10 | 296.90 | 297.27 | 296.03 | 294.05 | 0.14 | 0.20 | 1.4 | 7,5YR4/1 | 7,5YR6/2 |
| | Ah | 236.9 | 185.10 | 239.27 | 236.47 | 232.83 | 227.40 | 0.28 | 0.23 | 0.8 | 10YR2/1 | 10YR6/1 |
| | AB | 301.8 | 264.80 | 302.43 | 302.07 | 300.97 | 299.25 | 0.14 | 0.21 | 1.5 | 7,5YR3/2 | 5YR7/1 |
| | A | 295.9 | 258.90 | 295.30 | 294.80 | 294.23 | 292.45 | 0.14 | 0.20 | 1.4 | 7,5YR4/1 | 7,5YR7/1 |
| | A | 268.5 | 214.00 | 268.53 | 267.47 | 265.27 | 260.50 | 0.25 | 0.25 | 1.0 | 7,5YR3/1 | 7,5YR6/1 |
| | Ah | 266.4 | 213.00 | 266.33 | 265.33 | 262.70 | 257.95 | 0.25 | 0.23 | 0.9 | 7,5YR3/1 | 7,5YR6/1 |
| | A | 280.5 | 230.60 | 279.90 | 278.90 | 275.90 | 272.45 | 0.22 | 0.24 | 1.1 | 7,5YR3/1 | 7,5YR6/1 |
| | B | 295.7 | 245.40 | 296.30 | 296.53 | 296.20 | 293.35 | 0.20 | 0.27 | 1.3 | 10YR6/8 | 10YR8/6 |
| M5 | B | 280.5 | 234.10 | 283.50 | 283.30 | 282.07 | 278.70 | 0.20 | 0.24 | 1.2 | 10YR6/8 | 10YR8/6 |
| | AB | 295.8 | 244.10 | 295.20 | 295.43 | 295.37 | 293.85 | 0.21 | 0.27 | 1.3 | 10YR7/8 | 10YR5/1 |
| | AB | 300.5 | 260.20 | 300.27 | 300.37 | 300.03 | 298.10 | 0.15 | 0.21 | 1.4 | 10YR3/1;10 | 10YR7/1 |
| | B | 297.0 | 261.50 | 297.70 | 297.67 | 297.23 | 295.90 | 0.14 | 0.22 | 1.6 | 10YR7/8 | 10YR8/3 |
| | B | 292.8 | 249.00 | 294.20 | 293.57 | 293.40 | 291.30 | 0.18 | 0.22 | 1.3 | 10YR7/8 | 10YR8/4 |
| | B | 295.7 | 250.80 | 265.97 | 296.00 | 295.90 | 293.60 | 0.18 | 0.23 | 1.3 | 10YR7/8 | 10YR8/4 |
| | B | 305.6 | 268.70 | 306.80 | 306.70 | 306.40 | 304.60 | 0.14 | 0.20 | 1.4 | 10YR7/8 | 10YR8/4 |
| | B | 296.3 | 252.10 | 295.93 | 296.10 | 296.10 | 294.65 | 0.18 | 0.23 | 1.3 | 10YR7/8 | 10YR8/3 |
| | B | 294.9 | 261.10 | 297.90 | 297.60 | 295.37 | 292.55 | 0.13 | 0.18 | 1.4 | 10YR7/6 | 10YR8/3 |
| | B | 292.1 | 262.90 | 295.00 | 294.47 | 293.83 | 291.75 | 0.11 | 0.17 | 1.5 | 2,5Y7/6 | 10YR8/2 |
| | B | 310.1 | 287.00 | 313.93 | 313.53 | 312.37 | 310.35 | 0.08 | 0.14 | 1.7 | 2,5Y7/3 | 7,5YR8/1 |
| | A | 289.1 | 240.90 | 289.30 | 287.80 | 285.20 | 281.45 | 0.20 | 0.25 | 1.3 | 5YR3/1 | 7,5YR5/2 |
| | A | 300.1 | 262.40 | 301.90 | 300.70 | 299.15 | 270.70 | 0.14 | 0.21 | 1.4 | 7,5YR4/1 | 5YR7/1 |
| | A | 285.9 | 239.40 | 287.93 | 286.75 | 284.65 | 280.60 | 0.19 | 0.27 | 1.4 | 5YR4/1 | 7,5YR6/1 |
| | A | 297.5 | 261.30 | 299.90 | 298.30 | 296.40 | 293.80 | 0.14 | 0.20 | 1.4 | 7,5YR4/1 | 5YR6/1 |
| | A | 308.9 | 274.00 | 314.23 | 313.60 | 308.90 | 305.65 | 0.13 | 0.20 | 1.6 | 7,5YR5/2 | 7,5YR7/1 |
| | B | 300.4 | 250.20 | 292.67 | 291.95 | 290.25 | 285.85 | 0.20 | 0.28 | 1.4 | 5YR4/1 | 5YR7/2 |
| | AB | 303.8 | 267.50 | 303.37 | 302.90 | 301.85 | 298.95 | 0.14 | 0.20 | 1.5 | 7,5YR3/1 | 7,5YR6/1 |
| M6 | AB | 288.2 | 238.30 | 288.60 | 287.90 | 286.55 | 282.70 | 0.21 | 0.25 | 1.2 | 10YR6/6 | 10YR7/4 |
| | AB | 264.2 | 220.50 | 265.80 | 263.75 | 261.65 | 258.25 | 0.20 | 0.22 | 1.1 | 5YR3/1 | 5YR6/1 |
| | AB | 290.8 | 259.60 | 303.73 | 301.75 | 300.80 | 297.80 | 0.12 | 0.18 | 1.5 | 10YR6/6 | 10YR8/4 |
| | B1 | 297.9 | 237.10 | 288.80 | 288.85 | 288.25 | 285.15 | 0.26 | 0.31 | 1.2 | 10YR8/8 | 2,5YR8/4 |
| | B1 | 286.3 | 238.30 | 286.10 | 286.15 | 285.80 | 283.50 | 0.20 | 0.25 | 1.3 | 10YR7/6 | 2,5YR8/4 |
| | B1 | 287.8 | 256.30 | 299.93 | 299.70 | 299.25 | 296.45 | 0.12 | 0.16 | 1.3 | 7,5YR7/8 | 10YR8/6 |
| | B2 | 298.4 | 273.20 | 311.37 | 310.35 | 308.65 | 305.15 | 0.09 | 0.15 | 1.6 | 2,5YR6/8 | 5YR7/6 |
| | B2 | 304.5 | 260.20 | 302.97 | 302.85 | 301.35 | 299.55 | 0.17 | 0.24 | 1.4 | 5YR6/6 | 7,5YR7/4 |

## Anexo 4. Triángulos de textura del suelo

Altitud: 2000 m snm.

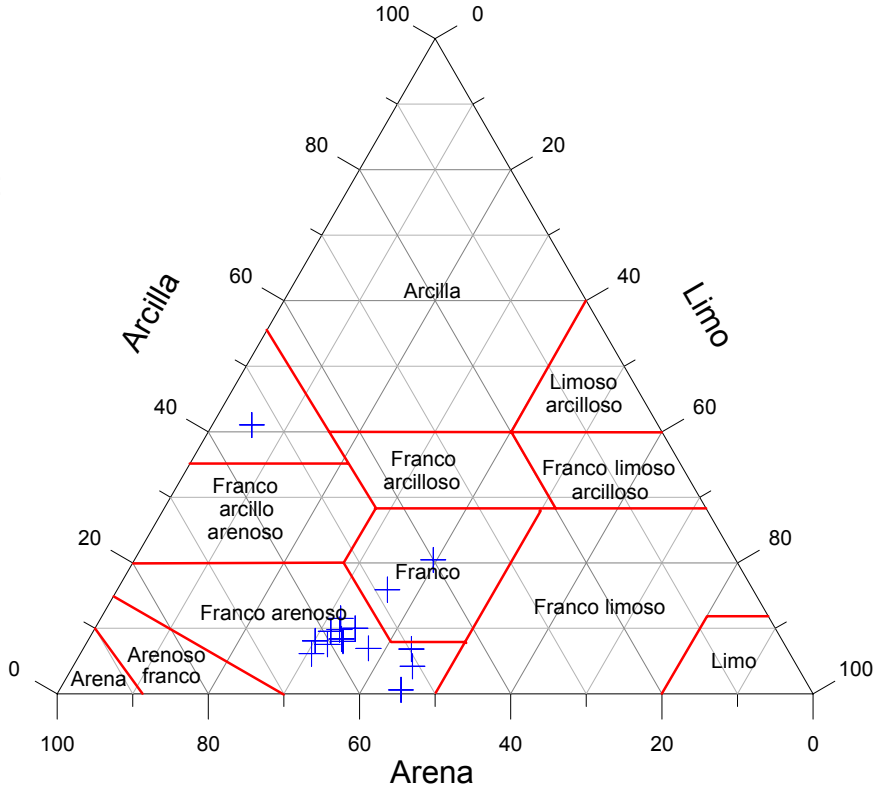


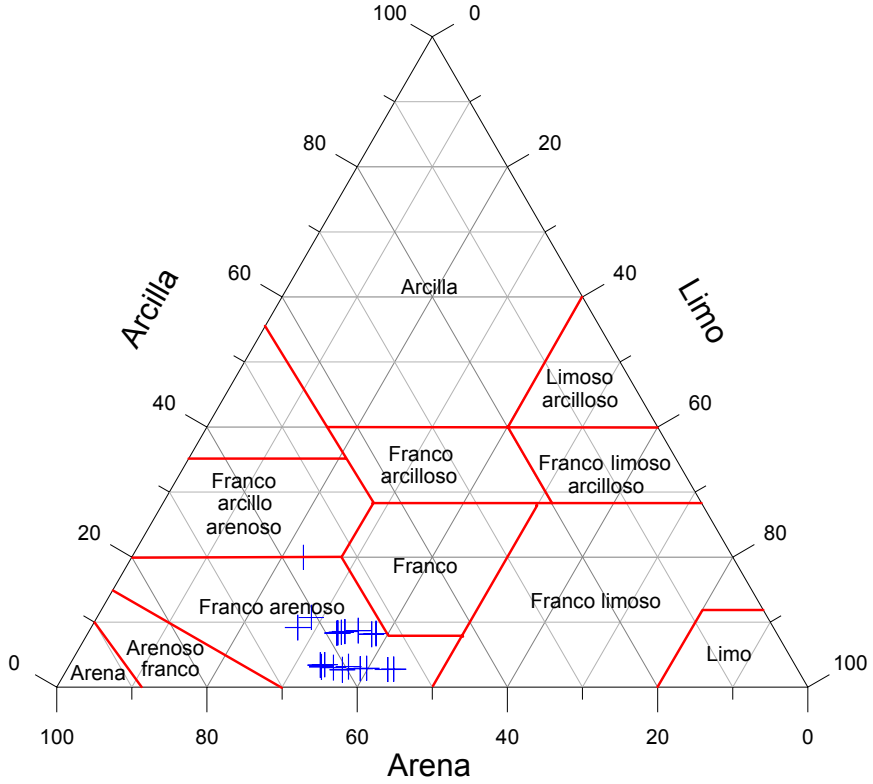
**Anexo 4. Continuación**

Altitud: 2100 m snm.

M2



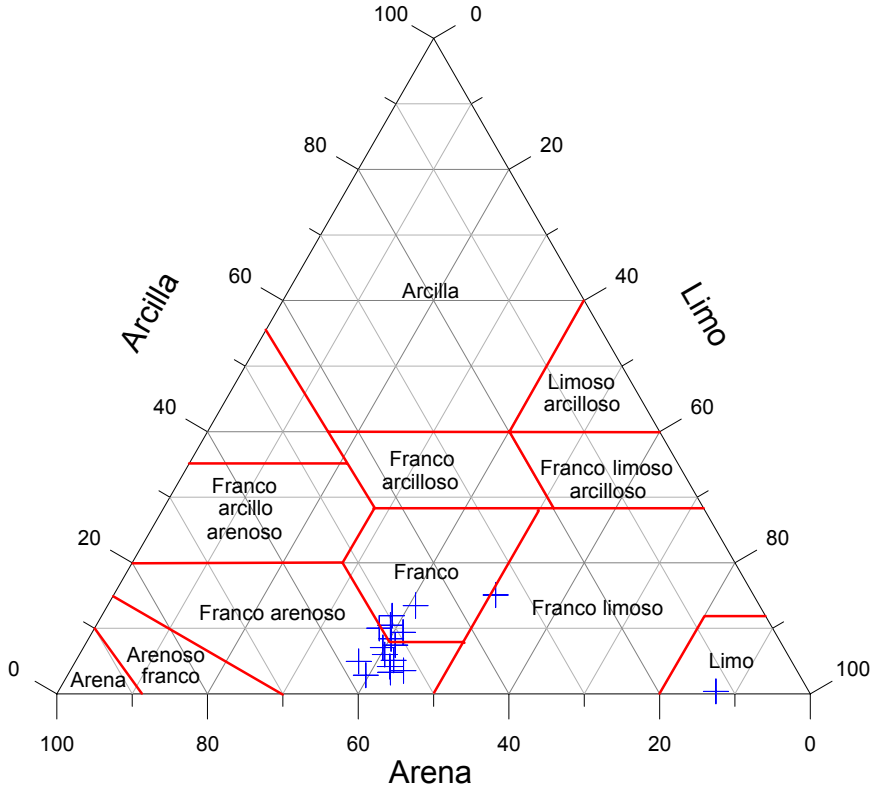

M3

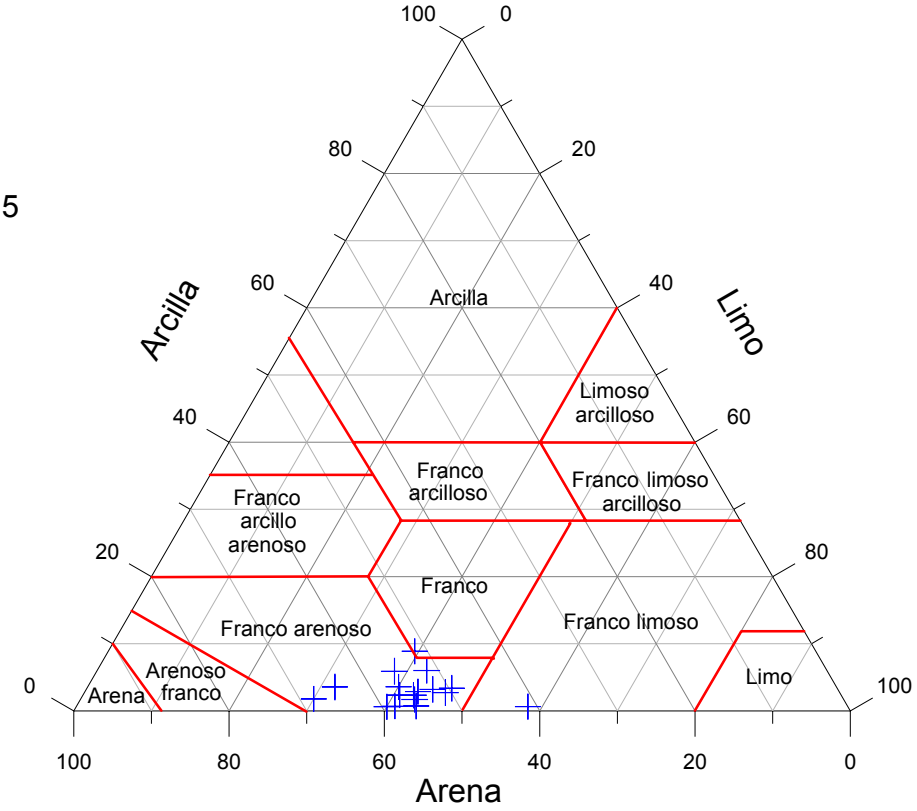


**Anexo 4. Continuación**

Altitud: 2200 m snm.

M4




M5