



Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE POSGRADO**

**Título de tesis**

***Análisis de la infiltración y compactación de suelos ganaderos: aportando información básica para el manejo de la cuenca Aguas Calientes, Somoto, Madriz, Nicaragua***

Tesis sometida a consideración de la división de Educación y el Programa de Posgrado  
como requisito para optar al grado de

***MAGISTER SCIENTIAE***

En Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

**Jeffrey José Díaz Sierra**

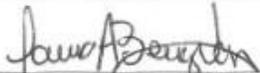
**Turrialba, Costa Rica**

**2018**

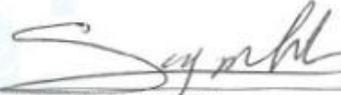
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

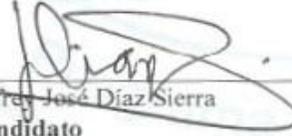
**FIRMANTES:**

  
\_\_\_\_\_  
Laura Benegas, Ph.D.  
**Directora de tesis**

  
\_\_\_\_\_  
Gregoire Leclerc, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**

  
\_\_\_\_\_  
Sergio Vilchez, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**

  
\_\_\_\_\_  
Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.  
**Decana Programa de Posgrado**

  
\_\_\_\_\_  
Jeffrey José Díaz Sierra  
**Candidato**

## DEDICATORIA

---

*A Dios*

*A mis padres Francisco José Díaz Mejía y Yolanda Sierra Sandoval*

*A mis hermanos: Jacqueline, Yorlin, Norlan y Darlin*

*A mi esposa Dennise*

## AGRADECIMIENTO

---

A Dios: por su inmenso poder colocándome en los lugares y tiempos adecuados...

A mis Padres: Francisco José Díaz Mejía “Chico Díaz” (QEPD), y Yolanda Sierra Sandoval por ser pilares fundamentales en mi formación personal y profesional, sin sus consejos yo no comprendería el funcionamiento de la vida.

A mis hermanos: Jacqueline, Yorlin, Norlan y Darlin; quienes a pesar del pasar de los años siempre sigo siendo su “hermanito menor”. Jacqueline... gracias por apoyarme siempre de forma incondicional. Yorlin... gracias por responderme en 1998, una inquietud sobre el Huracán Mitch, esa respuesta fue la semilla que me impulsó desde siempre a estudiar una Maestría. Norlan... gracias por tus consejos de vida, e ideas que me brindaste en la etapa de campo. Darlin... gracias por tus aportes para el crecimiento personal.

A mis sobrinos: Marialuisa, Norlan, Alessandra, Derek, Jeffrito, Alexito y Milagritos

A mi Esposa: Dennise, mi amada, mi amiga, mi consejera, mi respaldo, mi acompañante, mi apoyo, mi revisora de documento. Muchas gracias por estar siempre conmigo y decirme “SÍ SE PUEDE, ADELANTE...SEGUÍ”.

Muchas gracias don Gustavo y doña María, por estar siempre atentos con mi proceso de Maestría.

Muchas gracias Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) a través de Grettel y su equipo, gracias a ustedes se han hecho realidad muchos sueños anhelados de toda mi vida. Les agradezco mucho por todo su apoyo.

Muchas gracias Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) por haberme permitido ser parte y estudiar en este prestigioso Centro.

A mi comité consejero: Laura Benegas: gracias por sus consejos, compartir sus conocimientos, por su paciencia y por su apoyo; Sergio Vílchez: gracias por sus enseñanzas y apoyo; Gregoire Leclerc; gracias por compartir sus conocimientos y experiencias con mi persona; Profesores les agradezco mucho.

Muchas gracias compañeros de CATIE Generación 2016-2017; y principalmente a los estudiantes de Cuencas (BRÓDERES): Dorian, Yaneth, Ricardo, Juan Carlos y José Joaquín. Me llevo de ustedes sus experiencias, sus valores, sus ganas de superarse y aprender cada día más. Gracias BRÓDERES.

A mi equipo de logística: María Esther y Marco; sin su apoyo y ayuda no hubiera podido terminar mi trabajo de campo.

A los pobladores de la Cuenca Hidrográfica Aguas Calientes, que me brindaron un poco de su valioso tiempo y me prestaron sus fincas para hacer los estudios de esta tesis.

Muchas gracias Profesor Jorge Faustino por compartir sus experiencias profesionales.

Gracias Aranjid, Ariadne, Alfonso por apoyarme siempre. Gracias Andrés por atender todas mis consultas. Gracias Juancito por apoyarme con las impresiones y fotocopias.

A TODOS... MUCHAS GRACIAS

## ORGANIZACIÓN Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo se enfoca en evaluar el efecto de la compactación de los suelos sobre la infiltración de agua en pastizales de la cuenca Aguas Calientes, Somoto, Madriz, Nicaragua por medio del uso del instrumento DCP (Dynamic Cone Penetration), como un dispositivo alternativo del infiltrómetro doble anillo para calcular la infiltración acumulada en la cuenca. Contiene las siguientes partes:

Introducción general: Introducción, justificación, objetivos y síntesis referencial.

Artículo científico: Título, resumen, introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y bibliografía citada.

Anexos: Formato de entrevista, diagrama del dispositivo DCP, prueba gráfica y analítica de normalidad de los datos.

Al inicio del documento se encuentran los índices de contenido, cuadros, figuras y acrónimos.

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
RESUMEN.....	X
1. Introducción.....	1
1.1. Justificación.....	2
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Preguntas de investigación .....	3
2. Síntesis referencial.....	4
2.1. Conceptos clave en relación con los recursos hídricos .....	4
2.1.1. Gestión integrada de recursos hídricos .....	4
2.1.2. Cuencas hidrológicas e hidrográficas .....	5
2.1.3. Zonas de recarga hídrica .....	6
2.1.4. Degradación del suelo.....	7
2.1.5. Balance hídrico .....	8
2.1.6. Escorrentía e infiltración.....	8
2.2. Conceptos clave en relación a la calidad del suelo .....	9
2.2.1. Compactación.....	9
3. Resultados obtenidos .....	11
4. Conclusiones.....	12
5. Literatura citada.....	12
1. Artículo: Análisis de la infiltración de agua en los suelos de fincas ganaderas de la cuenca hidrográfica Aguas Calientes, Nicaragua: una metodología costo-eficiente con el uso del cono dinámico de penetración .....	17
1.1. Introducción.....	18
1.2. Materiales y métodos.....	19
1.2.1. Zona de estudio .....	19
1.2.2. Muestreo e instrumentación de los experimentos .....	21
1.2.3. Análisis de datos .....	23
1.3. Resultados .....	23
1.3.1. Tipología de fincas.....	24
1.3.2. Medición de características del suelo.....	26
1.3.3. Relación entre infiltración y características del suelo.....	29

1.3.4. Estimación del número de replicaciones para obtener una estimación de la infiltración en parcelas de 1,4 ha.....	32
1.4. Discusión.....	34
1.5. Conclusión.....	37
1.6. Recomendación .....	38
1.7. Bibliografía.....	39
Anexos .....	42
Anexo 1. Formato de entrevista aplicada en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua .....	42
Anexo 2. Diagrama del DCP.....	43

#### Índice de cuadros:

Cuadro 1. Aplicaciones de dispositivo DCP en la GIRH .....	5
Cuadro 2. Comparación costo-tiempo entre dispositivo DCP e infiltrómetro doble anillo.....	11
Cuadro 3. Ventajas y desventajas del infiltrómetro doble anillo y el penetrómetro dinámico de cono .	22
Cuadro 4. Comparación de los costos-tiempo entre los dispositivo penetrómetro dinámico de cono (DCP) e infiltrómetro doble anillos (IDA).....	32
Cuadro 5. Resultados de modelos de infiltración acumulada en función de la densidad aparente y el penetrómetro dinámico de cono de fincas ubicadas en la cuenca Somoto, Madriz, Nicaragua .....	32

#### Índice de figuras:

Figura 1. Macrolocalización de la cuenca hidrográfica Aguas Calientes, ubicada en el norte de Nicaragua, entre los municipios de Somoto y San Lucas, Departamento de Madriz .....	20
Figura 2. Precipitación y temperatura media de la cuenca hidrográfica Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua .....	21
Figura 3. Principales resultados de las entrevistas aplicadas a productores de la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. a) Principales problemas con el agua; b) Calidad del agua; c) Fuentes de agua; d) Influencia del pisoteo de ganado en la infiltración de agua en el suelo. ....	24
Figura 4. Tipología de productores ganaderos en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua basada en un análisis de conglomerado jerárquico .....	25
Figura 5. Ubicación espacial de las fincas muestreadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. E-12 representa la finca 12, E-17 la finca 17, E-33 la finca 33, E-39 la finca 39 y la E-46 la finca 46. Las fincas E-12, E-33 y la E-39 corresponden a la tipología 1; la E-46 a la 3 y la E-17 a la 4	26
Figura 6. Infiltración acumulada en función del tiempo en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. Violeta: finca número 12 (tipología 1); celeste: finca 33 (Tipología 1); naranja: finca 39 (tipología 1); rojo: finca 46 (tipología 3); verde: finca 17 (tipología 4) .....	27
Figura 7. Penetración acumulada en función del número de golpes con DCP en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. Violeta: finca número 12 (tipología 1); celeste: finca	

número 33 (Tipología 1); naranja: finca número 39 (tipología 1); rojo: finca número 46 (tipología 3); verde: finca número 17 (tipología 4).....	28
Figura 8. Tipologías y variables medidas en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. a) DA; b) infiltración acumulada; c) DCP al primer golpe; d) DCP total; e) contenido de arcilla; e) elevación .....	29
Figura 9. Relaciones entre las variables medidas de las propiedades físicas del suelo en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. a) Relación entre densidad aparente (DA) e infiltración acumulada; b) Relación entre DCP total e infiltración acumulada; c) Relación entre DCP en el primer golpe e infiltración acumulada; d) Relación entre DCP total y DA; e) Relación entre DCP en el primer golpe y DA; f) Relación entre contenido de arcilla e infiltración acumulada. ....	30
Figura 10. Relación entre la infiltración acumulada y DCP individual en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. Círculos: textura arcillosa; triángulo: franca; cruz: textura franco arcillosa .....	31
Figura 11. Relación entre la infiltración acumulada y el DCP acumulado en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Nicaragua. Círculos: textura arcillosa; triángulo: franca; cruz: textura franco arcillosa .....	31
Figura 12. Varianzas máximas en función del número de muestras en parcelas de 1,4 ha en la cuenca Somoto, Madriz, Nicaragua: a) infiltración acumulada; b) DA; c) DCP total.....	33

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>DEM</b>	Digital elevation model
<b>DCP</b>	Dynamic cone penetration
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
<b>GIRH</b>	Gestión integrada de recursos hídricos
<b>GPS</b>	Global positioning system
<b>GWP</b>	Global Water Partnership
<b>INETER</b>	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
<b>IDA</b>	Infiltrómetro de doble anillo
<b>MARENA</b>	Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales
<b>PNUD</b>	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
<b>UNESCO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>UTM</b>	Universal Transversal Mercator

## LISTA DE UNIDADES

Ha	hectáreas
Kg	kilogramos
Km	kilómetros
m	metros
m/h	metro sobre hora
m <sup>2</sup>	metros cuadrados
mm	milímetros
Mm <sup>3</sup> /año	Millones de metros cúbicos sobre año
s	segundos

## RESUMEN

---

La compactación es uno de los mayores problemas que afecta a los suelos hoy en día, pues produce un incremento de la densidad aparente, reducción del espacio poroso, reducción de la infiltración de agua, incremento de la escorrentía superficial, pérdida de la fertilidad y reducción de las actividades de los microorganismos. El estudio y comprensión de la compactación es de gran importancia para las actividades productivas y el estudio del ciclo hidrológico. En lugares con grandes áreas compactadas, y con poca precipitación de lluvia, la compactación tiene un papel relevante ya que el agua que se precipita no puede ser aprovechada para recarga hídrica, sino que fluye en forma de escorrentía. Tradicionalmente, para estudiar la infiltración del agua en los suelos se hace uso del infiltrómetro doble anillo, que implica mucha inversión de tiempo (2-3 horas) y recursos. En este estudio se propone el uso del dispositivo del cono dinámico de penetración (DCP, por sus siglas en inglés), usado mayormente para calcular compactación en carreteras, como una alternativa costo-efectiva (10 minutos por prueba), para calcular infiltración acumulada.

Con este dispositivo y con un modelo empírico que relaciona la infiltración acumulada con el índice DCP, o sea la profundidad alcanzada por el instrumento, será posible efectuar mayor cantidad de muestras para conocer la compactación de suelos y la infiltración acumulada en áreas de pastoreo y labranza y áreas para la construcción de lagunas de oxidación.

Este estudio se realizó en la cuenca Aguas Calientes (38,62 km<sup>2</sup>), tributaria de la cuenca del río Coco, la cuenca de mayor tamaño de Nicaragua. Se establecieron relaciones lineales entre varios parámetros de interés: (i) DCP al primer golpe y densidad aparente (DA), resultando ( $P=0,015$ ,  $r=0,66$ ); (ii) DCP al primer golpe e infiltración acumulada obteniendo ( $P=0,002$ ,  $r=0,77$ ); (iii) DA e infiltración acumulada obteniendo ( $P=0,001$  y  $r=0,8$ ). Se estableció un modelo lineal para predecir infiltración acumulada a partir de DA y DCP al primer golpe y se obtuvo ( $P=0,001$  y  $R^2$  ajustado = 0,68).

**Palabras clave:** Cono dinámico de penetración, American Society for Testing and Materials, balance hídrico, dinámica de agua en el suelo, infiltrómetro doble anillos, macroporos, precipitación, recarga hídrica, textura de suelos, tipología de fincas.

## 1. Introducción

---

El agua es uno de los recursos con mayor importancia a nivel mundial, ya que de ella depende la subsistencia de la población humana. La calidad y cantidad del agua se ve reflejada en su disminución en términos netos de volumen, desigualdad al acceso dado por factores físicos, económicos, político-institucionales (Pérez y Valenzuela 2006; Escribano 2007), con consecuencias en la salud humana, la sustentabilidad ambiental y el desarrollo socioeconómico (Meadows y Meadows 2007).

Organizaciones como el PNUD, FAO y UNESCO reportan que la degradación de los ecosistemas, el cambio de uso de suelo y la sobreexplotación de los recursos inciden de manera negativa en el suministro del agua. Entre estos factores, uno de los más importantes es la sobreexplotación de las fuentes de agua; es decir, que la extracción de agua supera a la capacidad natural de recarga de los acuíferos (Samaniego 2014).

Uno de los elementos clave para comprender la recarga hídrica es el estudio de la compactación del suelo, la cual puede influenciar directa o indirectamente la calidad del medio ambiente. La influencia de la compactación tiene una distribución geográfica definida, principalmente en donde se origina (Ellison 1960; Reed y Peterson 1961; Soane 1995), por lo que se incrementa la erosión hídrica (Richard *et al.* 1999), el riesgo global de la inseguridad alimentaria y la vulnerabilidad al cambio climático (Lal 1990).

El incremento de la compactación de los suelos puede ocurrir debido a la reducción en la estabilidad estructural causado por cultivos, el pisoteo de ganado y la reducción del contenido de materia orgánica, generando una reducción de la velocidad de infiltración e incrementando la escorrentía superficial-erosión (Warren *et al.* 1986; Connolly 1998; Ríos 2006; Alhassoun 2011), generando una alta probabilidad de producir con mayor frecuencia las inundaciones (Sparovek *et al.* 2002).

El pisoteo del ganado afecta a los componentes principales de un sistema de pastizales (plantas, estructura y biología del suelo), y cuando no se maneja apropiadamente puede destruir la vegetación y compactar el suelo (Cluzeau *et al.* 1992), aumentando la densidad aparente del mismo (Bilotta *et al.* 2007). Los pastizales en las áreas bajas de las cuencas se caracterizan por el establecimiento de altas densidades de animales por unidad de área, la entrada de contaminantes químicos como fertilizantes, pesticidas y el uso de tractores (Bilotta *et al.* 2007), que generalmente son los que mayor daño causan a las cuencas hidrográficas (Rhoades *et al.* 1964; Warren *et al.* 1986; Soane 1995). La compactación del suelo reduce la infiltración de agua y aumenta la escorrentía superficial (Gregory *et al.* 2006).

La compactación puede cuantificarse por medio de diversas propiedades de los suelos tales como densidad aparente, porosidad y distribución de tamaño de poros (Soane y Van Ouwerkerk 1994). También, es necesario tener datos de la evaporación, el drenaje y el agua tomada por las raíces para conocer la velocidad de movimiento del agua a través del suelo (Plagge *et al.* 1990; Kutílek y Nielsen 1994). La infiltración de agua es un indicador de las propiedades físicas y biológicas del suelo (Radke y Berry 1993). A través de la compactación del suelo se estudia la degradación de la tierra, que representa un problema para el manejo del suelo en todos los sectores. Es un fenómeno asociado con la agricultura, la industria forestal, el uso de la tierra, la colocación de tuberías, la restauración de la tierra y pisoteo de animales (Batey 2009).

### 1.1. Justificación

La degradación del suelo y de los ecosistemas es producto de los cambios de uso y la explotación intensiva de los recursos naturales (Magrin *et al.* 2007), sumado a las variaciones climáticas y el crecimiento acelerado de la población. Estos procesos generalmente tienen su origen en aquellos ecosistemas que brindan poca cantidad y calidad de agua, principalmente para consumo humano y en los rubros productivos (Cajina 2007). Además, la deforestación en la parte alta y media de las cuencas hidrográficas afectan los recursos naturales, lo que junto a la limitada precipitación media reduce la disponibilidad de agua en el suelo y subsuelo. En las cuencas hidrográficas, las zonas de alta y de extrema pobreza se caracterizan por la sobreutilización de la tierra (Zúniga 2004), lo que causa desequilibrios ambientales que afectan negativamente la cantidad y calidad de agua (Samaniego 2014). Este contexto hace necesaria la conservación y el manejo de los recursos del suelo y agua para satisfacer la demanda excesiva de producción de alimento y las necesidades de la población que va en aumento (Lal 1990).

La información, los datos de las tendencias y el estado de los recursos hídricos son necesarios para hacer una buena gestión del agua y un suministro eficaz hacia sectores demandantes del agua; además, con la generación de información, es posible la creación de estrategias y acciones para la sostenibilidad del recurso (Samaniego 2014). También es necesario conocer el funcionamiento de la interrelación entre vegetación, suelo y clima lo cual constituye la llave estratégica para entender los procesos de la desertificación y de erosión (Díaz *et al.* 1998). Además, al proteger y manejar adecuadamente al suelo se contribuye al suministro de los alimentos, la supervivencia de los seres vivos y la sostenibilidad del uso de la tierra (Lal 1990).

En este estudio se propone evaluar el efecto de la compactación de los suelos de la cuenca Aguas Calientes, Somoto, Madriz, Nicaragua en la infiltración de agua en sistemas de vocación ganadera.

Los suelos de la cuenca del río Aguas Calientes muestran altos grados de degradación por actividades agropecuarias. Estas actividades son de importancia socioeconómica para los productores, lo que hace poco factible el cambio de uso del suelo (Domínguez 2008). Presenta una alta vulnerabilidad a la sequía (Benegas 2006); y al igual que en el resto de Nicaragua, la cuenca muestra los efectos de la deforestación y pobreza, y, junto a las condiciones climáticas adversas de los últimos años, se agrega el problema de escasez de agua (Cajina 2007).

La mayoría del agua que abastece a Somoto y sus comunidades es de origen subterráneo, por lo que resulta necesario comprender y estudiar el movimiento del agua desde la superficie hasta las zonas de recarga hídrica, y planear escenarios para mejorar la calidad y cantidad de agua infiltrada en la cuenca del río Aguas Calientes (Obando 2005).

## 1.2. Objetivos

Analizar la infiltración y compactación de suelos ganaderos a través del aporte de medición de infiltración para el manejo de la cuenca Aguas Calientes, Somoto, Madriz, Nicaragua

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar el tipo de uso y manejo de ganado en la cuenca.
- Analizar la capacidad de infiltración de suelo y su relación con el nivel de compactación del suelo por pisoteo de ganado.
- Determinar el tamaño de muestra para infiltración acumulada, como dinámico de penetración total y densidad aparente para un área de pastura

## 1.3. Preguntas de investigación

¿Afecta la ganadería extensiva las propiedades físicas de los suelos, disminuyendo la velocidad de infiltración del agua y aumentando la densidad aparente de los mismos?

¿Está relacionada la infiltración acumulada con el índice de penetración del cono dinámico de penetración?

## 2. Síntesis referencial

---

### 2.1. Conceptos clave en relación con los recursos hídricos

#### 2.1.1. Gestión integrada de recursos hídricos

La gestión integrada de recursos hídricos (GIRH), busca maximizar el bienestar económico y social de forma equitativa pero sin comprometer el aprovechamiento sostenible de los ecosistemas vitales, mediante el desarrollo y gestión del agua, tierra y recursos relacionados (GWP 2008).

La Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente llevada a cabo en Dublín en el año de 1992, plantea cuatro principios para implementar la GIRH (GWP 2008):

- “El agua dulce como recurso finito y vulnerable, el cual es esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente”.
- “La gestión del agua debe estar basada en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles”.
- “El tercer principio rescata el rol que cumple la mujer en la gestión y protección del recurso”.
- “Finalmente, en el cuarto principio se establece que el agua es un recurso con valor económico en todos sus diversos usos, por lo tanto, se lo reconoce como un bien económico”.

La GIRH tiene que ser aplicada a través de la coordinación de los entes vinculados al tema del agua y otros recursos naturales; sin embargo América Latina se caracteriza por las competencias dispersas y sectorizadas entre las diferentes instituciones, empresas vinculadas a los temas de recursos naturales, lo que causa un estancamiento y atraso en los avances en gestión integrada del agua (Castro Brenes 2014).

Al considerar la interdependencia de los usos del agua, la GIRH permite el involucramiento participativo de los sectores relacionados directa o indirectamente en todas las escalas (local y nacional). Insta a la participación colectiva para estrategias de desarrollo y gestión del agua y permite que los usuarios estén informados y puedan aplicar medidas regulatorias locales con relación al uso del recurso y conservación/protección de zonas de importancia hídrica (GWP 2008).

En el Cuadro 1 se indican las aplicaciones del dispositivo DCP en la GIRH.

**Cuadro 1.** Aplicaciones de dispositivo DCP en la GIRH

Número	Principio	Manejo adecuado de la compactación e infiltración del agua a través de:	Usos de DCP
Principio 1	El agua dulce como recurso finito y vulnerable, el cual es esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Creación de bancos de agua subterránea (Bouwer 2000).</li> <li>• Concentrar la precipitación hacia zonas de áreas cultivadas (Rockström <i>et al.</i> 2010).</li> <li>• Promoción de sistemas de cosecha de agua (Rockström <i>et al.</i> 2010).</li> <li>• Construcción de terrazas, curvas de nivel para los cultivos (Rockström <i>et al.</i> 2010).</li> <li>• Manejo de la materia orgánica (Rockström <i>et al.</i> 2010).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoreo previo de zonas de mayor o menor infiltración.</li> <li>• Identificación de los lugares adecuados para la construcción de lagunas de cosechas de agua.</li> <li>• Como el mantenimiento y uso de DCP es fácil, con poco uso de recursos y esfuerzo es posible que sea usado por todos los miembros de la comunidad.</li> </ul>
Principio 2	La gestión del agua debe estar basado en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles.		
Principio 3	La mujer participa en la gestión y protección del recurso.		

### 2.1.2. Cuencas hidrológicas e hidrográficas

Según González (2000), “Las cuencas hidrológicas son unidades morfológicas integrales definidas por límites naturales relacionados con la geología y geomorfología y con disposición de relieve diferente a la forma geológica, además en estas cuencas, tienen lugar procesos de flujo y acumulación de masas de agua subterráneas cuyas características dependen de las condiciones climáticas y geólogo-geomorfológicas regionales y locales”. Por lo que podemos decir que las cuencas hidrológicas están formadas por las cuencas hidrológicas y las aguas subterráneas (Rodas 2008).

El área del terreno donde todas las aguas caídas por la precipitación con sus nutrientes, contaminantes y sedimentos convergen para formar un solo cauce se denomina cuenca hidrográfica. Cada cauce o curso de agua tiene definida su cuenca hidrográfica (Villón 2004). Las cuencas también unen a silvicultores, agricultores y residentes urbanos en relaciones sociales complicadas (Meinzen-Dick y Di Gregorio 2004)

La cuenca hidrográfica concebida como un sistema está conformada por las interrelaciones dinámicas en el tiempo y en el espacio de diferentes subsistemas (Jiménez 2004):

- Social: demografía, organización, participación, calidad de vida, servicios públicos e infraestructura, conflictos, amenazas antrópicas y vulnerabilidad
- Económico: ingresos, rentabilidad, inversiones, mercados, pago y cobro de servicios ambientales, vulnerabilidad
- Político: políticas, gobernabilidad, toma de decisiones, municipios
- Institucional: local y gubernamental, presencia, función, coordinación
- Cultural: costumbres, tradiciones, creencias, valores
- Legal: tenencia de tierra, normas, reglamentos, leyes, ordenanzas
- Tecnológico: tipos y niveles, competitividad
- Productivo: uso de la tierra, actividades productivas, sistemas y medios, accesos a mercados, distribución de la tierra
- Físico: suelo, clima, geomorfología, cantidad y disponibilidad de recursos naturales, amenazas naturales, vulnerabilidad
- Biológico: seres humanos, plantas, animales

La visión de la cuenca como sistema supone el reconocimiento de los siguientes elementos (Jiménez 2004):

- Interacción entre la parte alta, media y baja de la cuenca, y con la región marino costera cuando corresponde
- El análisis integral de las causas, efectos y posibles soluciones a los problemas
- La identificación y uso racional de las potencialidades de la cuenca
- El papel del agua como recurso integrador de la cuenca

La cuenca hidrográfica es también conceptualmente un sistema por las siguientes razones (Jiménez 2004):

- Está constituida por partes que se relacionan entre sí y permiten un funcionamiento
- Tiene límite definido (divisoria de aguas y su entorno)
- Tiene entradas y salidas (ciclo hidrológico)
- Ocurren interacciones en el espacio
- Ocurren interrelaciones en el tiempo entre sus componentes

### 2.1.3. Zonas de recarga hídrica

El área de la cuenca donde se acumula el agua de lluvia de acuerdo a su intensidad, clima, topografía, escorrentía, estratigrafía geológica y a las características del suelo, se denomina zona de recarga hídrica (Foster 1988; Matus 2008). Para estimar las tasas de recarga subterránea se pueden usar métodos físicos o químicos (Allison 1988). Los métodos físicos pueden obtenerse a partir de datos hidrometeorológicos y los químicos se basan en el análisis químico e isotópico en las zonas saturadas y no saturadas; sin embargo, estos métodos pueden variar en el tiempo y espacio y crear un problema sin resolver, lo que necesita de estudios adicionales (Sophocleous 1991).

Las áreas de mayor recarga hídrica, como las zonas altas montañosas donde gran parte de la precipitación es de origen orogénico, son las zonas que más hay que conservar y manejar, para controlar

sus características físicas de permeabilidad e infiltración, ya que afectan la magnitud de la recarga, así como la generación de contaminantes que se puedan infiltrar al acuífero y dañar la calidad de sus aguas (Matus 2008).

Muchas de las prácticas que realiza el ser humano en actividades como el desarrollo urbanístico, la ganadería, la producción forestal, la agricultura, la industria, etc. alteran las características de las zonas de recarga hídrica e influyen con la infiltración del agua al impermeabilizar, compactar, erosionar y/o dejar descubierto el suelo. Como consecuencia, se da una mayor escorrentía superficial y disminuye la recarga de los acuíferos, con la reducción del nivel de las aguas subterráneas (acuíferos) y la calidad de las mismas, con frecuencia hasta niveles inadecuados para consumo humano y para otros usos como el riego (Ma *et al.* 2005; Matus 2008).

Las zonas de recarga hídrica se pueden clasificar en dos tipos (Rodas 2008; GWP 2011):

Según el movimiento del flujo de agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso:

- Zonas de recarga hídrica superficial: corresponde a toda la cuenca hidrográfica completa, sin incluir las zonas permeables. Es la que comienza a saturarse cuando llueve y produce escurrimiento de acuerdo a las características topográficas y de permeabilidad.
- Zonas de recarga hídrica subsuperficial: se caracteriza por la presencia de una capa de suelo impermeable que permite la circulación de agua horizontalmente. En esta zona el agua puede desplazarse aun cuando ha dejado de llover.
- Zonas de recarga hídrica subterránea: cuando el flujo vertical de la infiltración es significativo. Así se abastecen los acuíferos. En esta zona es posible recibir agua desde otras cuencas hidrológicas.

De acuerdo a la condición hidrogeológica las zonas de recarga se pueden clasificar en (Rodas 2008; GWP 2011):

- Zonas de buen acuífero, que tiene buena capacidad de almacenamiento y conducción.
- Zonas de acuífero pobre, que tiene poca capacidad de almacenamiento.
- Zonas acuitardas, almacena agua, pero no favorece su aprovechamiento.
- Zonas impermeables, no tienen ninguna capacidad de almacenamiento de agua.

#### 2.1.4. Degradación del suelo

Los cambios de usos impactan directamente en la diversidad de los seres vivos (Barroso 1991; Vitousek *et al.* 1997; Sala *et al.* 2000; Lambin *et al.* 2001); además contribuyen a cambiar el clima regional (Chase *et al.* 2000) y el calentamiento del clima (Houghton *et al.* 1999). Todos estos cambios contribuyen directamente a la degradación del suelo (El-Kholy 2012), y a alterar los servicios ecosistémicos que afectan la habilidad de los sistemas biológicos a respaldar las necesidades de los seres humanos (Vitousek *et al.* 1997). Tales cambios también determinan en parte la vulnerabilidad de los lugares y personas a perturbaciones climáticas, económicas o socio-políticas (Kasperson *et al.* 1995).

### 2.1.5. Balance hídrico

Los cambios de estado (superficial, líquido, subterráneo, sólido etc.), que experimenta el agua en la naturaleza constituyen el ciclo hidrológico (Fetter 2000; Villón 2004). Para poder estudiar el ciclo hidrológico es necesario estudiar el balance hídrico vinculado con el principio de conservación de masas o la ecuación de continuidad, que dice que durante un tiempo definido las diferencias entre las entradas y las salidas, fase activa y pasiva respectivamente (Maderey Rascon y Roman 2005), están bajo la condición del diferencial de volumen de agua almacenada (Samaniego 2014).

El estudio del balance hídrico es muy amplio, puede abarcar desde una muestra de suelo hasta una cuenca hidrográfica; y mediciones diarias, mensuales y anuales. Con el balance hídrico es posible cuantificar las variaciones de agua en una unidad de estudio (Seoanez *et al.* 2001).

“La cuantificación del balance hídrico es complicada, pues la falta de medidas directas, la variación espacial de las variables (tales como precipitación, evapotranspiración), las pérdidas profundas (a acuíferos) y las variaciones del agua almacenada son una limitación en este proceso; sin embargo, como respuesta a estas dificultades, de manera general se admiten dos premisas: la primera supone que las pérdidas profundas son despreciables y la segunda admite que las variaciones del agua almacenada en la cuenca hidrográfica son despreciables para un periodo normalmente largo” (Faustino 2006; Oki y Kanae 2006). Muchos modelos de balance hídrico han sido desarrollados usando solamente la lluvia como entrada al sistema; no toman en cuenta las entradas desde otro origen, como puede ser desde otras cuencas hidrológicas (Xu y Singh 1998).

Cuando a la superficie del suelo se le agrega agua por precipitación o riego, parte de esta agua penetra la superficie y es absorbida por el suelo; la que no logra penetrar se acumula o fluye en el suelo. El agua que alcanza a penetrar en la superficie del suelo se divide en dos partes: la que permanece en la superficie para luego evapotranspirarse y la que penetra para recargar los reservorios de agua subterránea (Hillel 1980).

### 2.1.6. Escorrentía e infiltración

Cuando el agua de lluvia no se infiltra ni se evapotranspira, se crea la escorrentía que, al circular por la superficie, contribuye al caudal de la red de drenaje. Es decir, cuando la tasa de infiltración es menor que la intensidad de las lluvias se producen las corrientes de agua. La escorrentía depende del tipo de suelo, cobertura, pendiente y de la intensidad de la lluvia (Salas 2015).

Existen diferentes tipos de escurrimientos:

- Escurrimiento superficial, que es el agua que llega a los cauces provenientes de la superficie de los terrenos vecinos (Campos 1998).
- Escurrimiento subsuperficial, interflujo o escorrentía hipodérmica, que corresponde a la parte de la precipitación que se infiltró y que se mueve lateralmente en los horizontes del suelo cercanos a la superficie. Parte de esta agua llegará hasta las aguas subterráneas y la otra parte hasta los cauces (Campos 1998; Proano *et al.* 2006).
- Agua que circula en los mantos subterráneos del suelo y que puede almacenarse y circular lentamente por largos períodos de tiempo (Samaniego 2014).

El movimiento del agua en el suelo, a través de los macroporos, mesoporos y microporos (Fassbender 1993), puede ser líquido o gaseoso. En el primer caso, “el movimiento de agua entre las diferentes capas del suelo se da por efecto de gradientes de tensión y su dirección será, de zonas en el suelo con baja tensión (alto contenido de humedad) a zonas con alta tensión (bajo contenido de humedad)” (Fassbender 1993; Casanova 2005). En estas condiciones y al llegar las precipitaciones o el riego se produce la infiltración hasta las capas de mayor profundidad. Este movimiento se conoce como “flujo de agua en suelos no saturados” (Morgan 1997; Prieto 2004; Villón 2004).

Para poder estudiar la infiltración es necesario conocer las siguientes propiedades de los suelos: velocidad y duración de la infiltración del agua, conductividad hidráulica en las condiciones iniciales de humedad del suelo, la continuidad vertical y las características de los poros verticales (Bouma y Dekker 1978). La velocidad de infiltración determina la cantidad de agua que entrará al suelo y la cantidad de agua que correrá en la superficie del suelo como escorrentía (Hillel 2013), así como su grado de erosión (Alhassoun 2011).

También es necesario conocer los siguientes conceptos:

- Tasa de infiltración: es el volumen de flujo de agua que drena en un perfil por unidad de área (Hillel 1980).
- Capacidad de campo: “Cantidad de agua retenida en el suelo cuando ha drenado el agua por acción de la gravedad” (UNESCO 1993).
- Punto de marchitez: “Contenido de humedad del suelo expresado como porcentaje de la masa seca del suelo, por debajo del cual una planta muere por marchitez” (UNESCO 1993).
- Capacidad de infiltración: “Velocidad máxima a la que el agua puede ser absorbida por un terreno determinado, por unidad de superficie y en unas condiciones determinadas” (UNESCO 1993).
- Conductividad hidráulica: “Propiedad de un medio poroso que, de acuerdo con la ley de Darcy, relaciona el caudal específico con el gradiente hidráulico” (UNESCO 1993).

## 2.2. Conceptos clave en relación a la calidad del suelo

### 2.2.1. Compactación

La compactación es la densificación de los suelos por la presión o carga sobre la superficie, como resultado del pisoteo de animales, personas y la inadecuada utilización de equipos (Gavande 1972; Bassuk y Whitlow 1985), que producen una compresión de las partículas de suelo (Makedon et al. 2009), por la expulsión de aire en condiciones no saturadas (Tafur 1976). Además con la compactación decrece la permeabilidad, la compresibilidad y erodabilidad de los geomateriales que integran al suelo (Makedon et al. 2009). La compactación de los suelos a través del ganado se da debido a la gran cantidad de peso sometido en un área pequeña como lo es la pezuña del animal (Bilotta et al. 2007), ya que el esfuerzo o presión es inversamente proporcional al área de aplicación, es decir a menor área de contacto mayor será la presión ejercida (Moreau et al. 2003).

Los suelos o capas de los suelos son considerados compactos cuando el total de la porosidad y particularmente los poros que contienen son tan bajos que restringen la aireación e impiden la penetración de raíces y el drenaje (Cooper 1971). Los poros grandes sirven para la aireación y filtración, los medianos

conducen agua y los pequeños almacenan el agua para las plantas; los poros medianos y los grandes son los que influyen en el proceso de compactación ya que al obstruirse, disminuyen la aireación y la infiltración del suelo (Andries *et al.* 1984).

La compactación además reduce la velocidad de infiltración de agua, causa disminución en el drenaje, reduce la disponibilidad de agua y abastecimiento de aire y oxígeno utilizado por las raíces (Patterson *et al.* 1980). Estas pueden modificar el crecimiento radicular y pueden experimentarse simultáneamente en la compactación del suelo, siendo difícil diferenciar entre sus efectos (Russell 1977).

El estado de compactación del suelo puede ser modificado y controlado; sin embargo, una vez que los suelos han sido compactados, su reacondicionamiento se constituye en una operación difícil de revertir, ya que al tratar de romper el suelo con el arado se producen terrones donde las raíces no penetran (Barroso 1991).

Generalmente el objetivo de estudiar la compactación para fines agronómicos es buscar su disminución. Para ello primero se debe establecer una red de macroporos para el desarrollo de la raíz, aireación e infiltración rápida del agua; luego se debe realizar la distribución de los agregados. Los sitios de cultivos tienen requerimientos específicos sin importar la compactación de microporos. Por lo tanto, los estudios de compactación se enfocan en las características físicas y biológicas del suelo y profundidad adecuada del cultivo, entre otros (Barroso 1991).

La compactación tiene efectos en diferentes variables

- **Atmósfera:** las actividades agrícolas tienen el mayor efecto en la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono, metano y óxido nitroso (Ehrlich 1990). La compactación puede cambiar el flujo de estos gases desde el suelo a la atmósfera debido a su influencia en la permeabilidad y aireación del suelo y el desarrollo de cultivos (Soane 1995).
- **Agua superficial:** la cantidad y la composición de la escorrentía de las tierras agrícolas puede ser influenciada fuertemente por la compactación a través de la velocidad de infiltración; además se produce la escorrentía del estiércol líquido que incrementa la pérdida de amoníaco a la atmósfera, lo que contribuye a la contaminación del agua superficial. Por otro lado, la compactación contribuye a la creación de encharcamiento en la superficie con la lluvia y al incremento de la escorrentía (Soane 1995).
- **Agua subterránea:** los cambios en la conductividad hidráulica saturada de los suelos como resultado de la compactación afecta el movimiento del agua en los acuíferos, lo que provoca el incremento del contenido de nitrato en el suelo (Soane 1995). A través de la filtración del agua en el suelo, es posible que varias sustancias puedan descomponerse por la acción microbiana, y así reducir elementos químicos o pesticidas del medio (Soane 1995).
- **Recursos del suelo:** las implicaciones de la compactación del suelo en el estado de sus recursos puede ser considerado en aspectos físicos, químicos y biológicos (Håkansson *et al.* 1987). El incremento de la escorrentía puede causar muchos problemas, como el incremento de inundaciones en la parte baja de las cuencas y la transferencia masiva de sedimento en los cursos de agua, lagos y reservorios (Soane 1995). Con la compactación se produce un cambio en los procesos biológicos y químicos que afecta la demanda y suministro de los nutrientes para las plantas. La compactación restringe el crecimiento de la raíz, reduce la accesibilidad de nutrientes, e incrementa la pérdida de nutrientes en el agua superficial y subterránea. Las plantas que crecen

en suelos compactados requieren del uso de mucho fertilizante para obtener rendimientos aceptables (Boone 1988).

### 3. Resultados obtenidos

1. La infiltración acumulada es mayor en las fincas con mayor área de potreros, presumiblemente, por la facilidad de rotarlos.
2. La mayor infiltración y DCP ocurre en la parte baja de la cuenca hidrográfica.
3. La densidad aparente se relaciona de forma inversa con la infiltración acumulada y con el DCP.
4. La infiltración acumulada se relaciona de forma directa con el DCP y con el contenido de arcilla.
5. El uso del infiltrómetro doble anillo implica una inversión grande de tiempo, recursos y personal (Cuadro 2).
6. El uso del dispositivo de DCP implica una inversión pequeña de tiempo, recursos y personal (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Comparación costo-tiempo entre dispositivo DCP e infiltrómetro doble anillo

	<b>Unidad de medida</b>	<b>DCP</b>	<b>Infiltrómetro doble anillo</b>
Tiempo usado por prueba	Minutos	10	180
Costo de prueba	US\$	1	30
Elaboración de dispositivo	US\$	300	100
Materiales adicionales	Unidad	1 Cinta métrica	2 baldes, 1 fuente cercana con abundante agua, 1 mazo de 20 libras, 6 pedazos de madera (5 cm * 5 cm * 80 cm), 2 reglas (50 cm), 1 barra, 8 guantes
Personal	Unidad	3	4

7. Se calculó el siguiente modelo para calcular infiltración acumulada a partir de DCP y DA:

$$I1 = -12,09DA + 0,99DCP1 - 15,77$$

$$R^2=0,74; R^2 \text{ Ajustado}=0,68; \text{Valor de } P=0,0013$$

8. La ganadería extensiva afecta las propiedades físicas de los suelos, disminuyendo la velocidad de infiltración del agua y aumentando la densidad aparente de los mismos.

9. La infiltración acumulada está relacionada con la densidad aparente y con el índice de penetración del cono.

#### 4. Conclusiones

---

1. Con el infiltrómetro doble anillo se requiere una mayor inversión de tiempo y recursos y es difícil de transportar, por lo que su uso resulta más laborioso; en cambio, con DCP la inversión de tiempo y recursos es menor y fácil de transportar.
2. Los potreros de áreas pequeñas (con evidencia de erosión hídrica), presentan mayor compactación que los potreros con áreas más grandes.
3. La finca de tipología cuatro presentan menor densidad aparente, mayor infiltración acumulada y mayor DCP al primer golpe; las fincas de la tipología uno presentan mayor densidad aparente, menor infiltración acumulada y menor DCP al primer golpe.
4. En la época seca, los dueños de los potreros localizados en la parte media de la cuenca (grandes problemas de abastecimiento de agua), han trasladado el ganado hacia la parte alta y baja de la cuenca

#### 5. Literatura citada

---

- Alhassoun, R. 2011. Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils. Dissertationen Dr. rer. nat. s. I. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- Allison, G. 1988. A review of some of the physical, chemical and isotopic techniques available for estimating groundwater recharge. *In* Simmers I. Estimation of Natural Groundwater Recharge. Springer. p. 49-72.
- Andries, M; Harper, M; Kavura, R; Martin, P; Weiss, C; Ilaco, B; Ridler, N; James-Bryan, M; Rama, G; Gutiérrez, B. 1984. Proteger y producir; conservación del suelo para el desarrollo. Roma, Italia, FAO.
- Barroso, FA. 1991. Relación entre compactación del suelo y usos de la tierra a nivel de cuencas hidrográficas, río AQUIARES, Turrialba, Costa Rica. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A1365e/A1365e.pdf>
- Bassuk, N; Whitlow, T. 1985. Environmental stress in street trees: The Scientific Management of Vegetation in the Urban Environment 195:49-58.
- Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management—a review Soil use and management 25(4):335-345.
- Benegas, LA. 2006. Propuesta metodológica para evaluar la adaptación de los productores a la variabilidad climática, principalmente la sequía, en cuencas hidrográficas en América. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0984e/A0984e.pdf>
- Bilotta, G; Brazier, R; Haygarth, P. 2007. The impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands. *Advances in Agronomy* 94:237-280.
- Boone, F. 1988. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil and Tillage Research* 11(3):283-324.
- Bouma, J; Dekker, LW. 1978. A case study on infiltration into dry clay soil I. Morphological observations *Geoderma* 20(1):27-40.
- Bouwer, H. 2000. Integrated water management: emerging issues and challenges. *Agricultural water management* 45(3):217-228.

- Cajina, MJ; Faustino, J. 2007. Alternativas de captación de agua, la esperanza de mejores cosechas y la conservación ambiental: cogestión de actores locales y acción colectiva en la subcuenca del río Aguas Calientes, Nicaragua. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 44 p. (Serie técnica. Informe técnico no. 355). Disponible en <http://hdl.handle.net/11554/263>
- Campos, AD. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Casanova, E. 2005. Introducción a la Ciencia del Suelo. Caracas, Venezuela, UCV-CDCH.
- Castro Brenes, JE. 2014. Análisis de vulnerabilidad de fuentes de agua de consumo humano y de las zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca La Concordia, Jinotega, Nicaragua. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Disponible en <http://hdl.handle.net/11554/4317>
- Cluzeau, D; Binet, F; Vertes, F; Simon, J; Riviere, J; Trehen, P. 1992. Effects of intensive cattle trampling on soil-plant-earthworms system in two grassland types. *Soil Biology and Biochemistry* 24(12):1661-1665.
- Connolly, R. 1998. Modelling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: a review. *Soil and Tillage Research* 48(1):1-19.
- Cooper, A. 1971. Effects of tillage on soil compaction. *Compaction of Agricultural Soils*. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI:315-366.
- Chase, T; Pielke Sr, R; Kittel, T; Nemani, R; Running, S. 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics* 16(2-3):93-105.
- Díaz, AR; Bermúdez, FL; Serrato, FB. 1998. Erosión y escorrentía en el campo experimental de «El Ardaid (Murcia). Nueve años de experiencias. *Papeles de Geografía*(27):115-130.
- Domínguez, S; Velásquez, S; Jiménez Otárola, F; Faustino, J. 2008. Zonificación ambiental para el ordenamiento territorial de la subcuenca bimunicipal del río Aguas Calientes, Nicaragua. *Recursos Naturales y Ambiente* no. 55:64-73. Disponible en <http://hdl.handle.net/11554/6930>
- Ehrlich, A. 1990. Agricultural contributions to global warming *Global Warming: The Greenpeace Report*. Oxford, United Kingdom, University Press.
- El-Kholly, O. 2012. *The world environment 1972–1992: Two decades of challenge*. New York, United States of America, Springer Science & Business Media.
- Ellison, L. 1960. Influence of grazing on plant succession of rangelands. *The Botanical Review* 26(1):1-78.
- Escribano, B. 2007. Una visión sostenibilista sobre la escasez del agua dulce en el mundo. *Revista Internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo*(2):85-107.
- Fassbender, HW. 1993. *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales*. 2da edición. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 530 p. (Serie Materiales de Enseñanza no. 29).
- Faustino, J. 2006. Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica San Salvador, El Salvador, CATIE.
- Fetter, CW. 2000. *Applied hydrogeology*. New York, United States of America, Prentice Hall.
- Foster, S. 1988. Quantification of groundwater recharge in arid regions: a practical view for resource development and management. In Simmers, I (ed.). *Estimation of Natural Groundwater Recharge*. Ciudad, País, Springer. p. 323-338.
- GWP (Global Water Partnership). 2008. Principios de gestión integrada de los recursos hídricos. Bases para el desarrollo de planes nacionales. s. l. 12 p. Disponible en [http://www.gwp.org/Global/GWP-SAM\\_Files/Publicaciones/Sobre%20GIRH/2008-Principios-de-GIRH-Base-para-el-desarrollo-de-Planes-Nacionales.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-SAM_Files/Publicaciones/Sobre%20GIRH/2008-Principios-de-GIRH-Base-para-el-desarrollo-de-Planes-Nacionales.pdf)
- GWP (Global Water Partnership). 2011. Agua Subterráneas-Acuíferos (en línea). Consultado 8 nov. 2016. Disponible en [http://www.gwp.org/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/aguas\\_subterraneeas.pdf](http://www.gwp.org/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterraneeas.pdf)
- Gavande, SA. 1972. *Física de suelos: principios y aplicaciones*. México D. F., México, Limusa.
- González, J. 2000. *Guía metodológica para el estudio de cuencas hidrológicas superficiales con proyección de manejo*. La Habana, Cuba, Universidad de La Habana (inédito).
- Gregory, JH; Dukes, MD; Jones, PH; Miller, GL. 2006. Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of soil and water conservation* 61(3):117-124.

- Håkansson, I; Voorhees, WB; Elonen, P; Raghavan, G; Lowery, B; Van Wijk, A; Rasmussen, K; Riley, H. 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil and Tillage Research* 10(3):259-268.
- Hillel, D. 1980. *Applications of soil physics*. New York, United States of America, Academic Press
- Hillel, D. 2013. *Introduction to soil physics*. New York, United States of America Academic Press.
- Houghton, R; Hackler, J; Lawrence, K. 1999. The US carbon budget: contributions from land-use change. *Science* 285(5427):574-578.
- Jiménez, F. 2004. La cuenca hidrográfica como unidad de planificación, manejo y gestión de los recursos naturales. *In El agua en Iberoamérica: Experiencias en gestión y valoración del agua*. Buenos Aires, CYTED no 9:67-82. Disponible en <http://hdl.handle.net/11554/8334>
- Kasperson, JX; Kasperson, RE; Turner, BL. 1995. *Regions at risk*. Tokyo, Japan, United Nations University Press.
- Kutílek, M; Nielsen, DR. 1994. *Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines*. Cremlingen-Destedt, Germany, Catena Verlag.
- Lal, R. 1990. *Soil erosion in the tropics: principles and management*. New York, United States of America, McGraw Hill.
- Lambin, EF; Turner, BL; Geist, HJ; Agbola, SB; Angelsen, A; Bruce, JW; Coomes, OT; Dirzo, R; Fischer, G; Folke, C. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global environmental change* 11(4):261-269.
- Ma, J; Wang, X; Edmunds, W. 2005. The characteristics of ground-water resources and their changes under the impacts of human activity in the arid Northwest China—a case study of the Shiyang River Basin. *Journal of Arid Environments* 61(2):277-295.
- Maderey Rascon, LE; Roman, J. 2005. *Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. Méxido D. F., México, UNAM.
- Magrin, G; García, CG; Choque, DC; Giménez, JC; Moreno, AR; Nagy, GJ; Nobre, C; Villamizar, A. 2007. Latin America Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.
- Makedon, T; Tremopoulou, E; Dimopoulos, G. 2009. The influence of gradation on the in situ compaction of geo-materials in road construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 68(1):81-87.
- Matus, O. 2008. Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. Validación en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. *Recursos Naturales y Ambiente* no. 55:74-82. Disponible en <http://hdl.handle.net/11554/6573>
- Meadows, DH; Meadows, D. 2007. The history and conclusions of *The Limits to Growth*. *System Dynamics Review* 23(2-3):191-197.
- Meinzen-Dick, R; Di Gregorio, M. 2004. *Acción colectiva y derechos de propiedad para el desarrollo sostenible Comprender los derechos de propiedad*. Washington, D.C, United States of America, IFPRI.
- Moreau, M; Oshanin, G; Bénichou, O; Coppey, M. 2003. Pascal principle for diffusion-controlled trapping reactions. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 67(4):045104.
- Morgan, R. 1997. *Erosion y conservación del suelo*. Madrid, España, Mundi-Prensa España.
- Obando, FO. 2005. *Situación del recurso hídrico subterráneo de la subcuenca del río Aguas Calientes, Nicaragua*. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0662e/A0662e.pdf>
- Oki, T; Kanae, S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313(5790):1068-1072.
- Patterson, J; Murray, J; Short, J. 1980. The impact of urban soils on vegetation. *In Proceedings of the third conference of the Metropolitan Tree Improvement Alliance (METRIA)*. p. 33-56
- Pérez, R; Valenzuela, M. 2006. Dinámica de los usos de suelo en el Litoral de Granada (1956-2000): interpretación para la acción planificadora (en línea). *In Congreso nacional de tecnologías de la información geográfica. El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas*.(Granada, España). p. 393.

- Plagge, R; Renger, M; Röth, CH. 1990. A new laboratory method to quickly determine the unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed soil cores within a wide range of textures. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 153(1):39-45.
- Prieto, C. 2004. El agua: Sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. Bogotá, Colombia, ECOE Ediciones.
- Proano, M; Gavilanes, C; Valenzuela, P; Cisneros, C. 2006. Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato. Quito, Ecuador, Proyecto Regional Cuencas Andinas. 42 p.
- Radke, J; Berry, E. 1993. Infiltration as a tool for detecting soil changes due to cropping, tillage, and grazing livestock American. *Journal of Alternative Agriculture* 8(4):164-174.
- Reed, MJ; Peterson, RA. 1961. Vegetation, soil, and cattle responses to grazing on northern Great Plains range. Washington, D.C, United States of America, US Dept. of Agriculture.
- Rhoades, ED; Locke, LF; Taylor, HM; McIlvain, E. 1964. Water intake on a sandy range as affected by 20 years of differential cattle stocking rates. *Journal of Range Management*:185-190.
- Richard, G; Boizard, H; Roger-Estrade, J; Boiffin, J; Guérif, J. 1999. Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil and Tillage Research* 51(1):151-160.
- Ríos, N; Cárdenas A; Andrade H; Ibrahim M; Jiménez F; Sancho F; Ramírez E; Reyes B; Woo A. 2006. Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* no. 45:66-71. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/11554/6222/1/Escorrentia\\_superficial\\_e\\_infiltracion.pdf](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/11554/6222/1/Escorrentia_superficial_e_infiltracion.pdf)
- Rockström, J; Karlberg, L; Wani, SP; Barron, J; Hatibu, N; Oweis, T; Bruggeman, A; Farahani, J; Qiang, Z. 2010. Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management* 97(4):543-550.
- Rodas, GR. 2008. Manejo y gestión de zonas de recarga hídrica de microcuencas y fuentes de agua para consumo humano en Honduras. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2924e/A2924e.pdf>
- Russell, RS. 1977. Plant root systems: their function and interaction with the soil. Maidenhead, Berkshire, UK, McGraw-Hill Book Company (UK) Limited.
- Sala, OE; Chapin, FS; Armesto, JJ; Berlow, E; Bloomfield, J; Dirzo, R; Huber-Sanwald, E; Huenneke, LF; Jackson, RB; Kinzig, A. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287(5459):1770-1774.
- Salas, CA. 2015. Comportamiento hidrológico y erosivo en usos de suelo prioritarios de la campiña lechera en Santa Cruz, Turrialba, Costa Rica. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Disponible en <http://hdl.handle.net/11554/8055>
- Samaniego, NS. 2014. Análisis de vulnerabilidad en zonas potenciales de recarga hídrica por efectos de cambios de uso de suelo y por variabilidad climática en la microcuenca del Río Purires, Costa Rica. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Disponible en <http://hdl.handle.net/11554/329>
- Seoanez, MBV; Orellana Munoz, MDDS; Vasquez Nunez, LCRS; Marin Roga, IJMS; Calderon, MJO; Andrea, C; Araos Ramirez, JIHG; Fernando, V; Diaz Navarro, DEAB; Fernando, M. 2001. Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental y análisis climático. Uso del análisis climático en los estudios medioambientales. Madrid, España.
- Soane, B; Van Ouwerkerk, C. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. *Soil Compaction in Crop Production* 11:1-26.
- Soane, B. 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Tillage Research* 35(1):5-22.
- Sophocleous, MA. 1991. Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: practical aspects. *Journal of Hydrology* 124(3):229-241.
- Sparovek, G; de Jong van Lier, Q; Marcinkonis, S; Rogasik, J; Schnug, E. 2002. A simple model to predict river floods—a contribution to quantify the significance of soil infiltration rates. *Landbauforschung Volkenrode* 52(3):187-194.

- Tafur, NA. 1976. Efectos de varios sistemas de producción agrícola sobre la resistencia mecánica de los suelos. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, UCR/CATIE. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2766e/A2766e00.pdf#page=6>
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 1993. International Glossary of Hydrology. 2nd Edition. Geneva, Switzerland. ((Wmo/Omm/Vmo, No. 385).
- Villón, M. 2004. Hidrología. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Vitousek, PM; Mooney, HA; Lubchenco, J; Melillo, JM. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. Science 277(5325):494-499.
- Warren, S; Thurow, T; Blackburn, W; Garza, N. 1986. The influence of livestock trampling under intensive rotation grazing on soil hydrologic characteristics. Journal of Range Management:491-495.
- Xu, C-Y; Singh, VP. 1998. A review on monthly water balance models for water resources investigations. Water Resources Management 12(1):20-50.
- Zúniga, T. 2004. Estado del ambiente en Nicaragua 2003. Managua, Nicaragua. (II informe GEO).

1. Artículo: Análisis de la infiltración de agua en los suelos de fincas ganaderas de la cuenca hidrográfica Aguas Calientes, Nicaragua: una metodología costo-eficiente con el uso del cono dinámico de penetración

---

### Resumen

La determinación *in situ* de las propiedades físicas de los suelos han sido una de las principales metas para los ingenieros civiles, agrónomos, geotecnistas y científicos investigadores del suelo para obtener resultados precisos en poco tiempo. Una de estas propiedades físicas es la infiltración acumulada de agua en los suelos, usando infiltrómetros doble anillos (IDA), que constan de dos cilindros de 30 cm y 60 cm de diámetro que se insertan en el suelo y se les añade agua para calcular el tiempo de variación del nivel de la misma. En este trabajo se hicieron pruebas de penetración dinámica de cono (DCP por sus siglas en inglés), para calcular la infiltración acumulada reduciendo el tiempo de 3 horas con IDA a 10 minutos con DCP. El instrumento DCP consiste en una masa de 8 kg que se deja caer libremente a través de una varilla de 5/8 de pulgada sobre un cono de 60°. Las pruebas se efectuaron en época seca en potreros con suelos de textura arcillosa, textura franca y textura franco-arcillosa. Se establecieron relaciones lineales entre varios parámetros de interés: (i) DCP al primer golpe y densidad aparente (DA), resultando ( $P=0,015$ ,  $r=0,66$ ); (ii) DCP al primer golpe e infiltración acumulada obteniendo ( $P=0,002$ ,  $r=0,77$ ); (iii) DA e infiltración acumulada obteniendo ( $P=0,001$  y  $r=0,8$ ). Se estableció un modelo lineal para predecir infiltración acumulada a partir de DA y DCP al primer golpe y se obtuvo ( $P=0,001$  y  $R^2$  ajustado = 0,68).

. La finca con tipología cuatro presentaron menor densidad aparente, mayor infiltración acumulada y mayor DCP al primer golpe; las fincas con tipología uno presentaron mayor densidad aparente, menor infiltración acumulada y menor DCP al primer golpe.

**Palabras clave:** Árboles en potreros, American Society for Testing and Materials, balance hídrico, dinámica de agua en el suelo, macroporos, precipitación, recarga hídrica, textura de suelos, tipología de fincas

## 1.1. Introducción

El impacto del pastoreo sobre el ciclo hidrológico se da principalmente en la superficie o zonas cercanas a la superficie del suelo, por ejemplo en la interceptación, la infiltración, la formación de escorrentía, la recarga subterránea y la evapotranspiración (Gifford y Hawkins 1978). Según Vzzotto *et al.* (2000), en un área del Campus da Universidade Federal de Santa Maria Rio Grande do Sul con un sistema de pastoreo continuo, ocurrió un incremento de la densidad del suelo por pisoteo en los primeros 5 cm; que afectó las propiedades físicas del suelo a una profundidad de 20 cm, con efectos grandes en los primeros 5 cm. En una zona fuertemente pisoteada de la finca de New University of Maidugure, Nigeria, el pisoteo produjo zonas densas, las cuales redujeron la infiltración en una profundidad entre 7,5 - 15 cm (Usman 1994). Las intensas lluvias tropicales, las tierras de pastoreo de subsistencia, las formaciones geológicas y las pendientes pronunciadas tienden a acelerar el proceso de erosión a corto y largo plazo (Dunne *et al.* 1978).

El pisoteo por pastoreo de animales puede tener un efecto adverso en las propiedades del suelo y crecimiento de las plantas, particularmente bajo condiciones húmedas (Hamza y Anderson 2005), degradando su calidad física (Imhoff *et al.* 2000; Silva *et al.* 2000) y destruyendo su estructura (Ferrero y Lipiec 2000), lo cual en el largo plazo causa su deformación (Warren *et al.* 1986; Pietola *et al.* 2005). La homogenización del suelo por efectos de corte, que es definido como la resistencia interna por unidad de área que una masa de suelo puede soportar por una falla y deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de dicha masa (Das y Sivakugan 2016), y la posterior creación de terrones en las zonas de pastoreo resulta en una reducción del tamaño de poros y un debilitamiento completo, incrementando así la escorrentía (Duley 1940; Proffitt *et al.* 1995; Pietola *et al.* 2005; Dunne *et al.* 2011) y afectando la conductividad hidráulica (Mitchell y Berry 2001).

El grado de compactación de un suelo de potrero está relacionado con su densidad aparente, su textura, su contenido de humedad, el tiempo de pastoreo y el contenido de materia orgánica de la superficie del suelo (Van Haveren 1983). La compactación se incrementa linealmente con la intensidad de pastoreo (Bryant *et al.* 1972; Mwendera y Saleem 1997). La susceptibilidad al impacto del pisoteo del ganado varía con la cantidad de pisoteo (Willatt y Pullar 1984; Mwendera y Saleem 1997; Donkor *et al.* 2002), tipo de suelo (Van Haveren 1983), contenido de agua (Robinson y Alderfer 1952), las condiciones climáticas y la vegetación (Warren *et al.* 1986). Consecuentemente, la compactación de los suelos afecta el movimiento del agua y nutrientes en el suelo (Di *et al.* 2001). La resistencia a la penetración, definida como la fuerza de penetración por unidad de área transversal de una base de cono (Bengough *et al.* 2000), y la densidad aparente, entendida como la proporción de la masa de suelo seca y su volumen total (sólidos

y poros unidos) (Hillel 1982), son significativamente mayores en la superficie del suelo pastoreado que en las otras capas subsuperficiales (Mapfumo *et al.* 1999). La medición de la densidad aparente a través de la extracción de núcleos con cilindros de diámetro y altura conocidos, tiene la ventaja de que las muestras pueden ser localizadas e identificadas exactamente y con mucha precisión (Soane *et al.* 1980).

Con el pisoteo del ganado se da la reducción del espacio poroso de un suelo que ocurre al darse un incremento de densidad aparente (Bailey *et al.* 1986; Fritton 2001; Assouline 2002), debido a la compactación (Croney y Coleman 1954; Smith y Woolhiser 1971; Libardi *et al.* 1982; Asouline 2006), que a la vez reduce la infiltración de agua en el suelo. Cuando ocurre el proceso de compactación los agregados gruesos y finos que forman al suelo pueden moverse, deformarse o colapsar como resultado de la carga aplicada (Asouline 2006). La aplicación de la carga produce una deformación y fragmentación de los agregados, lo que produce la creación de nuevos espacios de microporos y el incremento de la retención de agua en ellos (Hill y Sumner 1967). Las arcillas son las fracciones del suelo que más influyen en el comportamiento del suelo (Hillel 1982), ya que los suelos de textura gruesa son generalmente más densos que los de textura fina (Bharati *et al.* 2002).

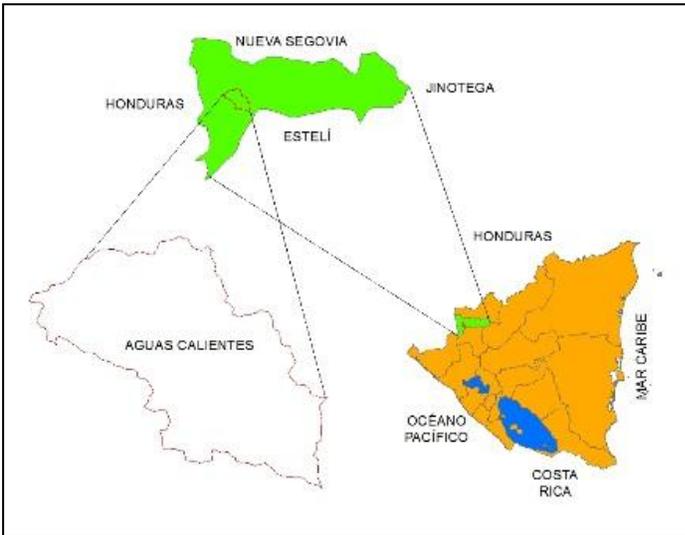
La compactación del suelo es el proceso en el cual los granos son acomodados para reducir el espacio vacío que existe entre un grano y otro, por lo que se aumenta la densidad aparente (Hamza y Anderson 2005).

El objetivo de este artículo es analizar la capacidad de infiltración de suelo y su relación con el nivel de compactación por pisoteo de ganado. Las fincas ganaderas estudiadas se ubican en la cuenca hidrográfica Aguas Calientes en Somoto, Madriz, Nicaragua.

## 1.2. Materiales y métodos

### 1.2.1. Zona de estudio

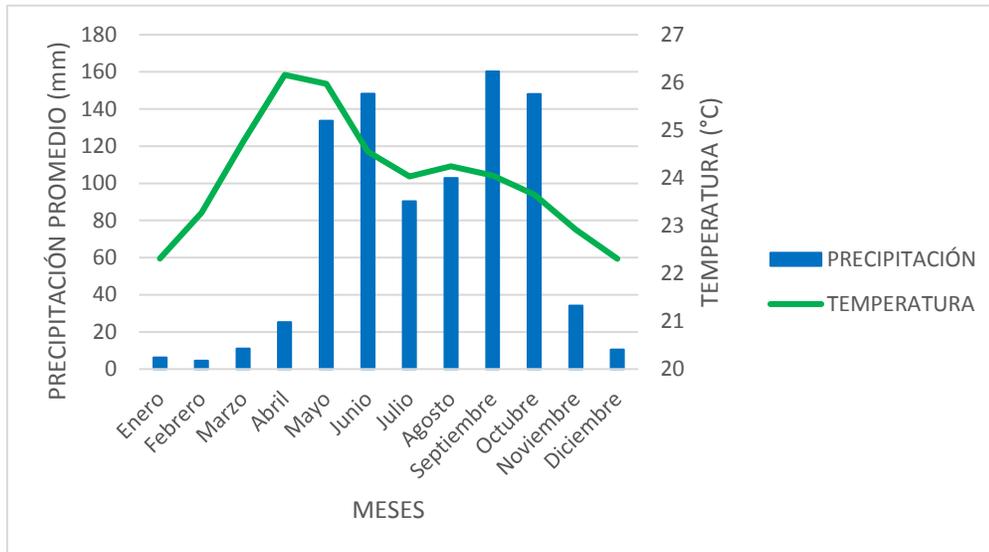
La cuenca bimunicipal del río Aguas Calientes se ubica en la región de Las Segovias, departamento de Madriz (Figura 1), entre las coordenadas 13°24'10'' y 13°29'28'' latitud norte y 86°34'12'' y 86°39'39'' longitud oeste. La cuenca forma parte de la red del río Coco y posee numerosos tributarios (Benegas *et al.* 2007).



**Figura 1.** Macrolocalización de la cuenca hidrográfica Aguas Calientes, ubicada en el norte de Nicaragua, entre los municipios de Somoto y San Lucas, Departamento de Madriz

La cuenca comprende las comunidades de Aguas Calientes, Quebrada de Agua, Mansico, Los Copales, Santa Rosa, Rodeo No. 2, Santa Isabel y Uniles del municipio de Somoto y El Volcán y El Porcal del municipio de San Lucas. La cuenca tiene un área de 38,62 km<sup>2</sup>: el 83,29% corresponde al municipio de Somoto y el 16,71% al municipio de San Lucas (Domínguez *et al.* 2008).

El clima de la cuenca es tropical seco. La precipitación media anual de los últimos años es de 823 mm con variaciones entre 448 mm y 1449 mm. A través del año, las lluvias son muy irregulares en cantidad e intensidad. En general se dan dos periodos estacionales: un periodo seco desde diciembre a abril y otro lluvioso de mayo a noviembre; en este último, entre julio y agosto se presenta un subperíodo de bajas precipitaciones (y a veces totalmente seco) llamado canícula (Figura 2), con duración variable de 15 a 40 días (Benegas *et al.* 2007).



**Figura 2.** Precipitación y temperatura media de la cuenca hidrográfica Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua

En la cuenca se identifican principalmente los suelos del orden molisol, los cuales ocupan la mayor parte de la superficie (aproximadamente el 94% del total de la cuenca). Son suelos minerales con estado de desarrollo incipiente, joven o maduro, con un horizonte superficial (epipedón móllico) de color oscuro, rico en humus, desarrollado a partir de depósitos aluviales y lacustres sedimentados de origen volcánico, rocas básicas, ácidas, metamórficas, sedimentarias y piroclásticas. Se ubican en toda la parte baja, parte media y en un gran porcentaje de la parte alta (Umaña y Mendoza 2000).

### 1.2.2. Muestreo e instrumentación de los experimentos

En la cuenca de Aguas Calientes se realizaron 106 entrevistas (Anexo 1), haciendo uso de la bola de nieve, definida como una técnica para encontrar sujetos en una investigación (Atkinson y Flint 2001), los cuales le brindan al investigador el nombre de un sujeto, y este a su vez le brinda el nombre de un tercer sujeto, y así sucesivamente (Vogt y Johnson 2011).

Con la información brindada por las personas en las entrevistas, se realizó un agrupamiento de fincas de acuerdo con la cantidad de ganado por finca, área de potrero, tiempo de posesión del potrero, tiempo de rotación de animales, respuestas a la pregunta de influencia del pisoteo del ganado en la formación de charcas y presencia de árboles en el lugar de permanencia del ganado. De acuerdo a los resultados, se obtuvieron cuatro grupos de finca.

Las mediciones de infiltración y de compactación se hicieron con un infiltrómetro doble anillo (IDA) y un penetrómetro dinámico de cono (DCP), respectivamente. El Cuadro 3 sintetiza las ventajas y desventajas de estos instrumentos.

**Cuadro 3.** Ventajas y desventajas del infiltrómetro doble anillo y el penetrómetro dinámico de cono

<b>Infiltrómetro doble anillo (IDA)</b>		<b>Penetrómetro dinámico de cono (DCP)</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preciso (Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> 2013)</li> <li>• Compensa el flujo lateral (Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> 2013)</li> <li>• Cuantitativo (Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> 2013)</li> <li>• La conductividad hidráulica en la dirección vertical puede ser medida (Daniel 1989)</li> <li>• El agua infiltrada desde el anillo interior es mínima (Daniel 1989)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destruye el suelo (Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> 2013)</li> <li>• Toma mucho tiempo (Castellanos-Navarrete <i>et al.</i> 2013)</li> <li>• Difícil ejecutar en campo (Batres y Barahona-Palomo 2017)</li> <li>• Se necesita hacer correcciones por evaporación (Daniel 1989)</li> <li>• No puede usarse en terrenos con pendientes pronunciadas (Daniel 1989)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rápido, se obtienen resultados en menos de 10 minutos (Kianirad 2011), y económico (Karunaprema y Edirisinghe 2001; Amini 2003)</li> <li>• Puede ser manipulado por personas con poco entrenamiento (Amini 2003)</li> <li>• Bajo peso y portable (Feleke y Araya 2016)</li> <li>• Mantenimiento simple y barato (Feleke y Araya 2016)</li> <li>• Caracterización <i>in situ</i> de la compactación y la profundidad (Feleke y Araya 2016)</li> <li>• Repetible y confiable (Kianirad 2011)</li> <li>• Puede ser usado en suelos con diferente tamaño de partículas y resistencias (Kianirad 2011)</li> <li>• Prueba no destructiva (Karunaprema y Edirisinghe 2001)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los resultados pueden tener errores debido a la fricción de suelos cohesivos (Kianirad 2011)</li> <li>• Variabilidad alta, principalmente en materiales granulares (Amini 2003)</li> <li>• Su uso es una operación física “pesada” por el manejo del martillo (Kianirad 2011)</li> <li>• Extracción difícil del instrumento al terminar la prueba (Kianirad 2011)</li> </ul>

La infiltración acumulada fue medida con un IDA (Abdel-Magid *et al.* 1987), el cual está compuesto por dos cilindros concéntricos (de radio de 30 y 50 cm cada uno), insertados 10 cm en el suelo. El cilindro externo es rellenado con agua para saturar el suelo alrededor del cilindro central y para limitar el flujo de agua lateral en el suelo saturado. Las medidas tomadas están basadas en el principio de la infiltración a carga variable. Después de rellenar (de ser necesario) los dos cilindros, son medidas las variaciones del nivel de agua en el cilindro central (Bedbabis *et al.* 2014) cada 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos.

La densidad aparente (DA) se calculó por medio de la extracción de núcleos de muestras de suelo con un cilindro de acero inoxidable de 55,7 mm de diámetro interno y una altura de 101,9 mm. Luego, las muestras de suelo se secaron en un horno a una temperatura de 105 grados centígrados por 24 horas, y posteriormente se pesaron para obtener la densidad aparente seca (Carter 1990).

El cálculo de textura de suelos se hizo por medio del método de Bouyoucos, el cual consiste en sumergir una muestra de suelo en un hidrómetro, después hacer lectura a los 40 segundos, a los 4 minutos y a las 2 horas para estimar los porcentajes de arena, limo y arcilla en la muestra de suelo (Bouyoucos 1927; Gee y Bauder 1979).

Las mediciones con el DCP se hicieron de acuerdo con lo propuesto por la American Society of Testing and Materials 6951-03 (ASTM 6951-03). En esta norma se detallan las características que deben cumplir el instrumento para llevar a cabo la prueba que consiste en una varilla de acero con diámetro de 5/8 de pulgada que funciona como guía para que una masa de 8 kilogramos se deje caer desde una altura constante de 57,5 cm. La punta de la guía es cónica con un ángulo de 60° respecto a la línea horizontal. El DCP se basa en los golpes que da un martillo a una varilla de 5/8 pulgada para que esta penetre el suelo de forma vertical (Anexo 2). Las lecturas son registradas y anotadas después de cada golpe (Zacny *et al.* 2012). El índice de DCP se obtiene al dividir la penetración de la punta en el suelo, dividido por el número de golpes efectuados (Mohammadi *et al.* 2008). A través del DCP se pueden obtener resultados de *California Bearing Ratio* (CBR) y resistencia a la compresión (Livneh 1989; Zacny *et al.* 2010). El CBR se obtiene dividiendo 292 sobre DCP elevado a la potencia 1.12; el valor de DCP se expresa en mm (Webster *et al.* 1992).

Cada sitio de muestro de infiltración acumulada, DCP, DA, textura de suelo y áreas fueron referenciadas con un receptor GPS Garmin; los valores de pendiente de cada sitio de muestreo se extrajeron con la herramienta “Extract value to points” de ArcGis 10.2 y desde el DEM (resolución de 12.5 m) descargado de Alaska Alos Palsar (<https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>).

### 1.2.3. Análisis de datos

Para agrupar a los productores entrevistados en función de las variables (identificación de tipologías), se utilizó un análisis de conglomerados utilizando el método de Ward y la distancia gower dado que las variables eran mixtas (cuantitativas y cualitativas).

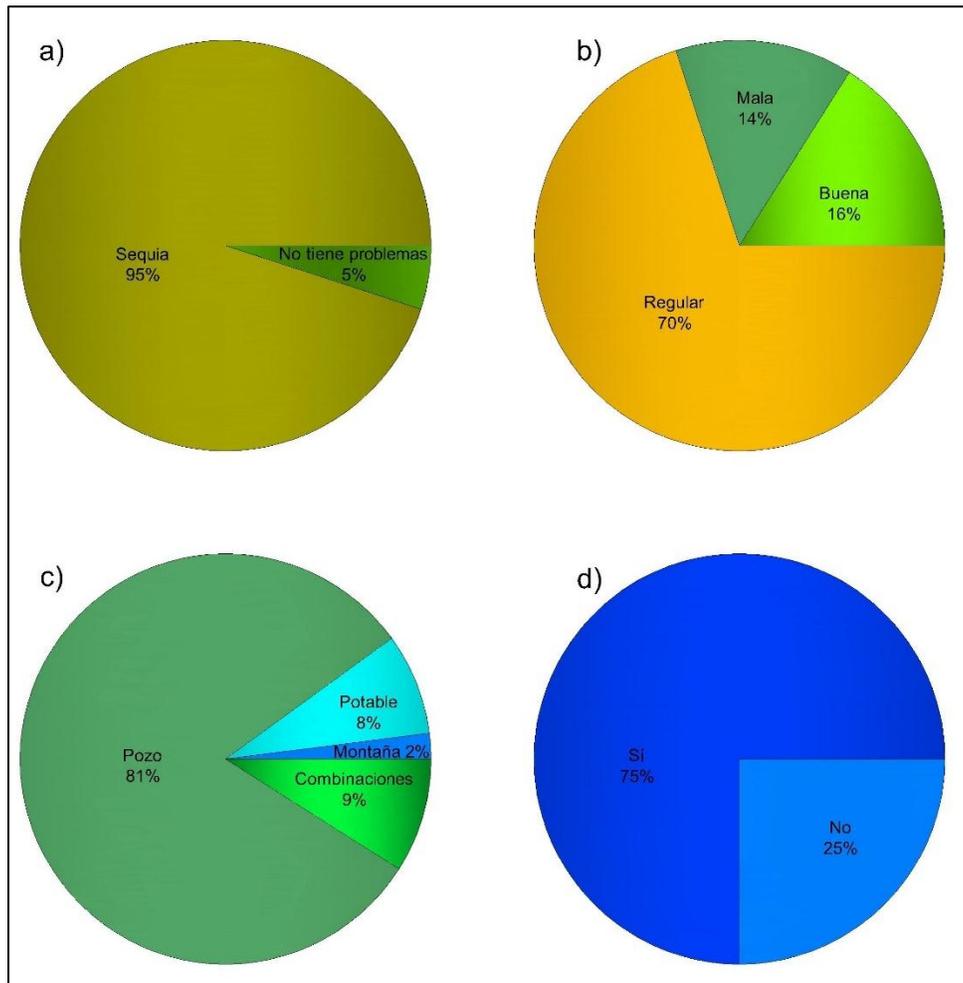
Para evaluar la relación entre DCP, infiltración acumulada, DA y contenido de arcilla se realizaron modelos de regresión lineal.

Los datos se analizaron por medio de INFOSAT para calcular el cluster jerárquico y se utilizó R STUDIO para efectuar gráficas y regresiones lineales entre DA, infiltración acumulada y DCP.

## 1.3. Resultados

De acuerdo con la información recopilada de las 106 entrevistas, se evidenció que el 95% de las personas tienen problemas de sequía y solamente un 5% no (Figura 3-a). La mayoría de los entrevistados considera que la calidad del agua es regular (70%), mientras que el restante 30% la considera entre buena y mala (Figura 3-b). Por otro lado, los entrevistados indicaron que el origen del agua consumible proviene

en su mayoría de pozos (81%); y apenas un 19% indicó que el agua que recibe proviene de montaña (10%) o de una red de agua potable (8%) o una combinación de ambas (Figura 3-c). El 75% de las personas entrevistadas percibe que el pisoteo del ganado influye en la infiltración del agua en el suelo (Figura 3-d).



**Figura 3.** Principales resultados de las entrevistas aplicadas a productores de la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. a) Principales problemas con el agua; b) Calidad del agua; c) Fuentes de agua; d) Influencia del pisoteo de ganado en la infiltración de agua en el suelo.

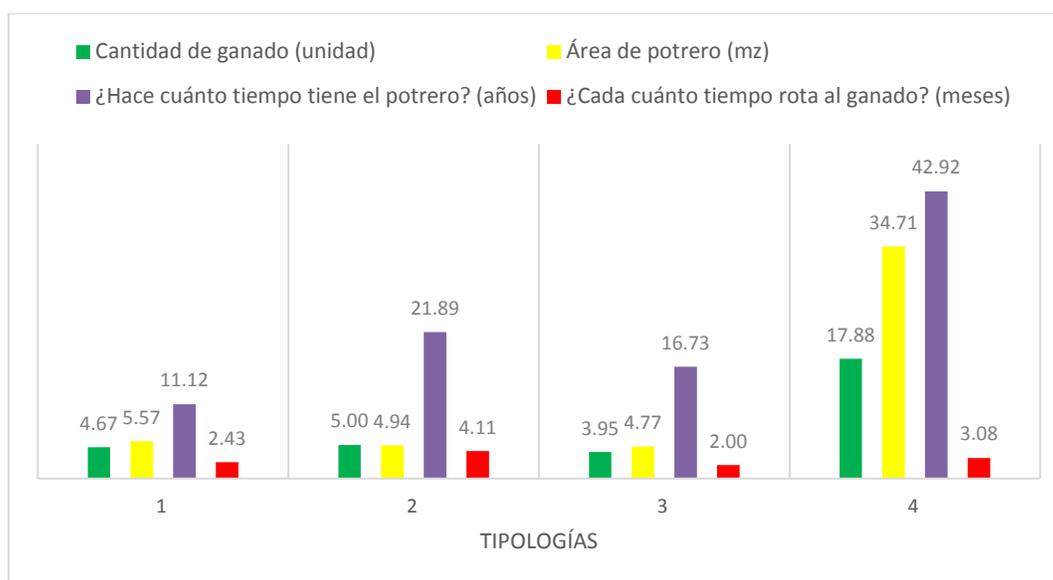
### 1.3.1. Tipología de fincas

De acuerdo con las entrevistas efectuadas se obtuvieron cuatro tipologías basadas en variables de manejo, composición del hato y percepción de problemas de agua (Figura 4):

1. El primer grupo está conformado por propietarios de finca que indicaron que el pisoteo del ganado influye en la infiltración de agua en el suelo, que tienen árboles dispersos dentro de las áreas

donde permanece el ganado, que lo rotan en promedio cada 2,4 meses, la edad de los potreros donde permanece el ganado es, en promedio, de 11 años, la superficie promedio es de 5,56 manzanas<sup>1</sup> y la carga promedio es en esta área es de 4,66 animales.

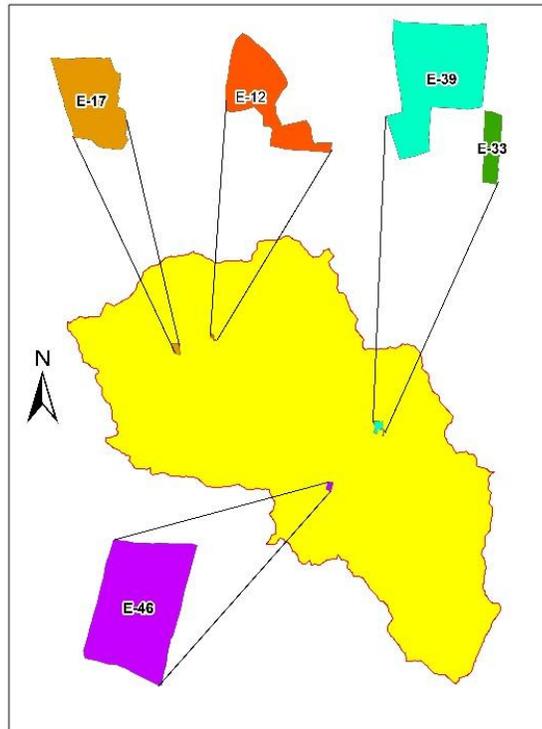
2. El segundo grupo lo conforman los propietarios de fincas que indican que el pisoteo del ganado no influye en la infiltración de agua en el suelo, que tienen árboles donde permanece el ganado, al cual rotan en promedio cada 4,1 meses, el lugar donde permanece el ganado existe, en promedio, desde hace 21,8 años, el área es de 4,94 manzanas y la carga animal de 5 animales en promedio.
3. El tercer grupo está conformado por los propietarios que indican que el pisoteo del ganado no influye en la infiltración de agua en el suelo, que tienen árboles donde permanece el ganado, al cual rotan en promedio cada 2 meses, el lugar donde permanece el ganado existe, en promedio, desde hace 16,7 años, el área es de 4,77 manzanas y la carga animal es de 3,95 animales en promedio.
4. El cuarto grupo lo conforman los propietarios de las fincas que indican que el pisoteo del ganado influye en la infiltración de agua en el suelo, las áreas donde permanece el ganado tienen árboles, lo rotan en promedio cada 3,08 meses, la edad es, en promedio, de 42,9 años, el área de 34,7 manzanas en promedio y la carga animal de 17,9 animales en promedio.



**Figura 4.** Tipología de productores ganaderos en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua basada en un análisis de conglomerado jerárquico

<sup>1</sup> Una manzana corresponde a 0,7025 ha

De los 106 entrevistados se seleccionaron 19 fincas donde los propietarios mantienen al ganado; cinco potreros, cinco arados y nueve corrales; sin embargo, por las condiciones de permanencia del ganado, y para una mejor representatividad del manejo en fincas ganaderas, se descartaron arados y corrales, por lo que se trabajó solamente en los cinco potreros (Figura 5), dado que en ellos se asume un nivel de compactación muy alto. De los cinco potreros, tres corresponden a la tipología uno, uno a la cuatro y otra a la tres.

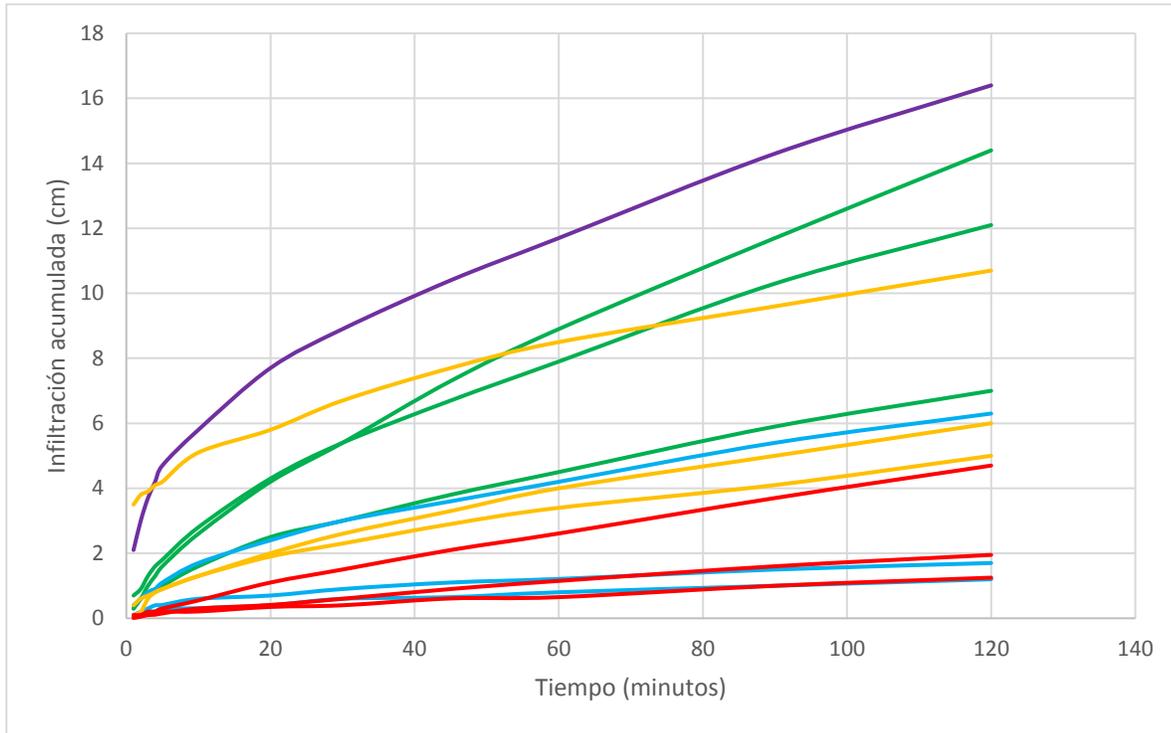


**Figura 5.** Ubicación espacial de las fincas muestreadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. E-12 representa la finca 12, E-17 la finca 17, E-33 la finca 33, E-39 la finca 39 y la E-46 la finca 46. Las fincas E-12, E-33 y la E-39 corresponden a la tipología 1; la E-46 a la 3 y la E-17 a la 4

### 1.3.2. Medición de características del suelo

El valor máximo de infiltración acumulada varió entre 1,2 y 16,4 cm con una media de 6,82 cm. Los valores de DA se encuentran entre 0,79 gr.cm<sup>-3</sup> y 1,54 gr.cm<sup>-3</sup>, con una media de 1,14 gr.cm<sup>-3</sup>. La elevación sobre el nivel del mar tiene como valor mínimo 664 m y máximo 748 m con una media de 722,40 m. Los valores de DCP total oscilan entre 8,2 cm (tipología 4) y 33,3 cm con una media de 17,94 cm. Los porcentajes de arcilla están entre 26,2% y 62,2% con una media de 36,2%. Los valores de DCP golpe 1 se encuentran entre 2,3 cm y 9,8 cm con una media de 4,81 cm (Figura 8).

Hubo un aumento de la infiltración acumulada a medida que aumentó el tiempo de infiltración. Las fincas 17 (tipología 4) y la 12 (tipología 1), fueron las que presentaron la mayor infiltración acumulada, mientras que la 46 (tipología 3) la menor (Figura 6).



**Figura 6.** Infiltración acumulada en función del tiempo en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. Violeta: finca número 12 (tipología 1); celeste: finca 33 (Tipología 1); naranja: finca 39 (tipología 1); rojo: finca 46 (tipología 3); verde: finca 17 (tipología 4)

La penetración aumentó con los golpes, siendo mayor en la finca 17 (tipología 4) y 39 (tipología 1), y menor en la 33 (tipología 1) y en la 46 (tipología 3) (Figura 7).

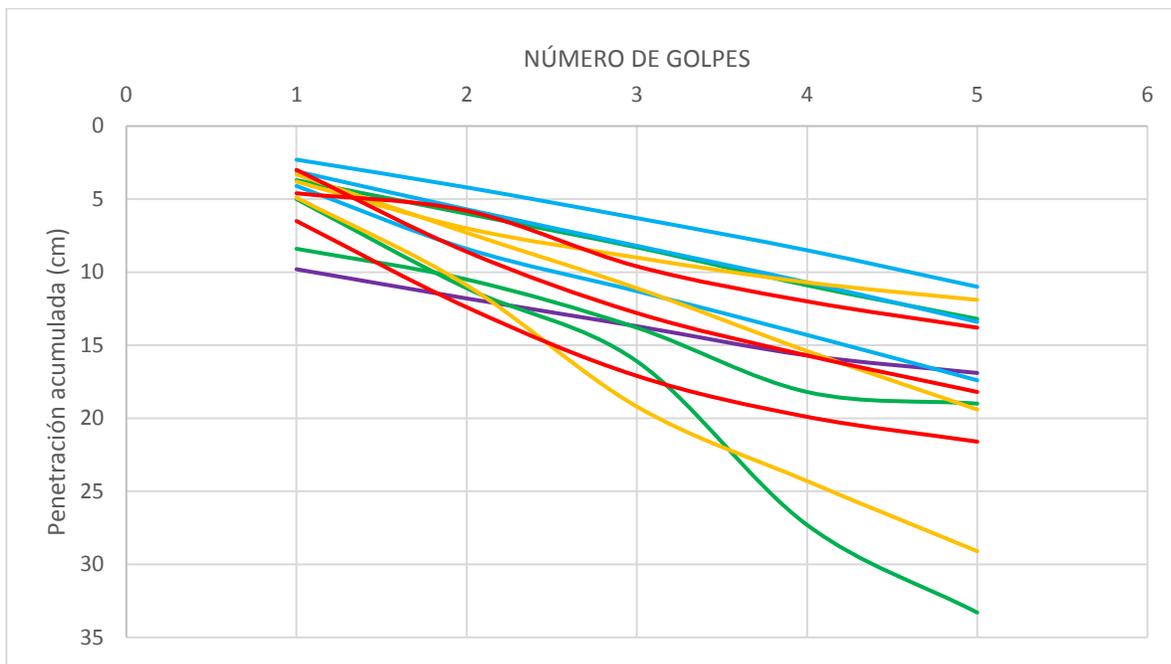
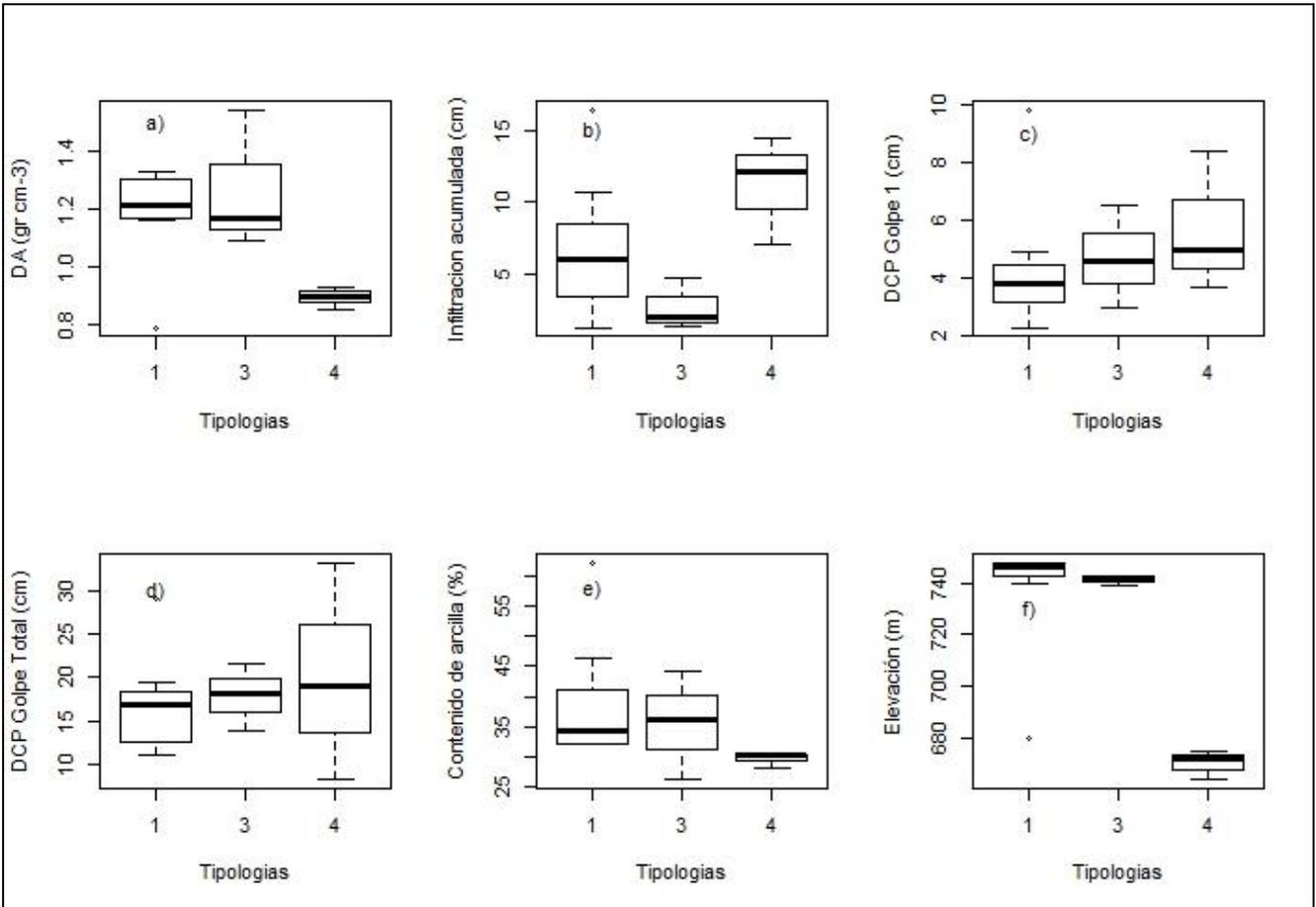


Figura 7. Penetración acumulada en función del número de golpes con DCP en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. Violeta: finca número 12 (tipología 1); celeste: finca número 33 (Tipología 1); naranja: finca número 39 (tipología 1); rojo: finca número 46 (tipología 3); verde: finca número 17 (tipología 4)

La tipología 4 presenta valores bajos de DA y altos de infiltración acumulada y DCP golpe 1 y un bajo contenido de arcilla; la tipología 1 presenta valores altos de DA y bajos de infiltración acumulada y DCP golpe uno, con un alto contenido de arcilla (Figura 8).

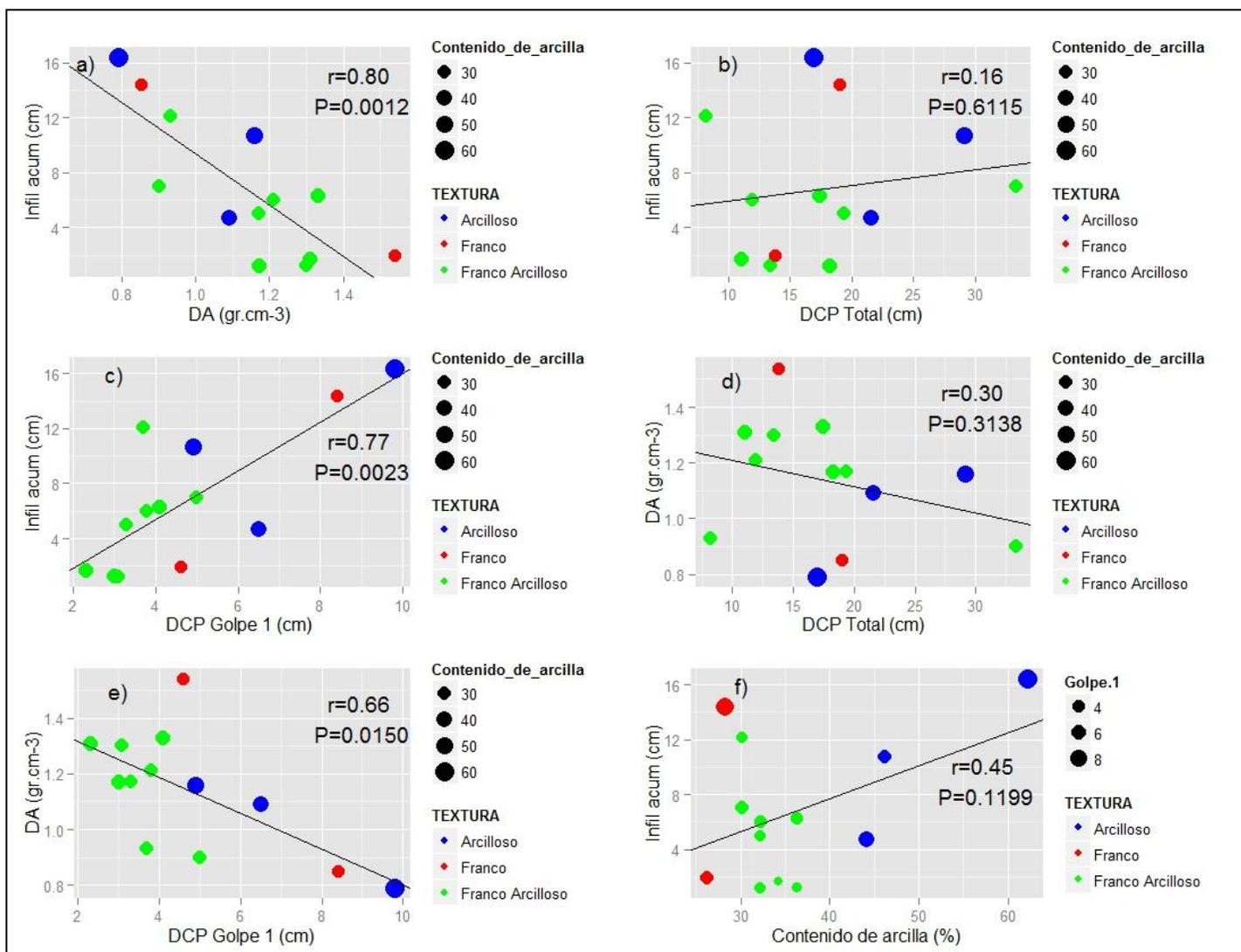


**Figura 8.** Tipologías y variables medidas en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. a) DA; b) infiltración acumulada; c) DCP al primer golpe; d) DCP total; e) contenido de arcilla; e) elevación

### 1.3.3. Relación entre infiltración y características del suelo

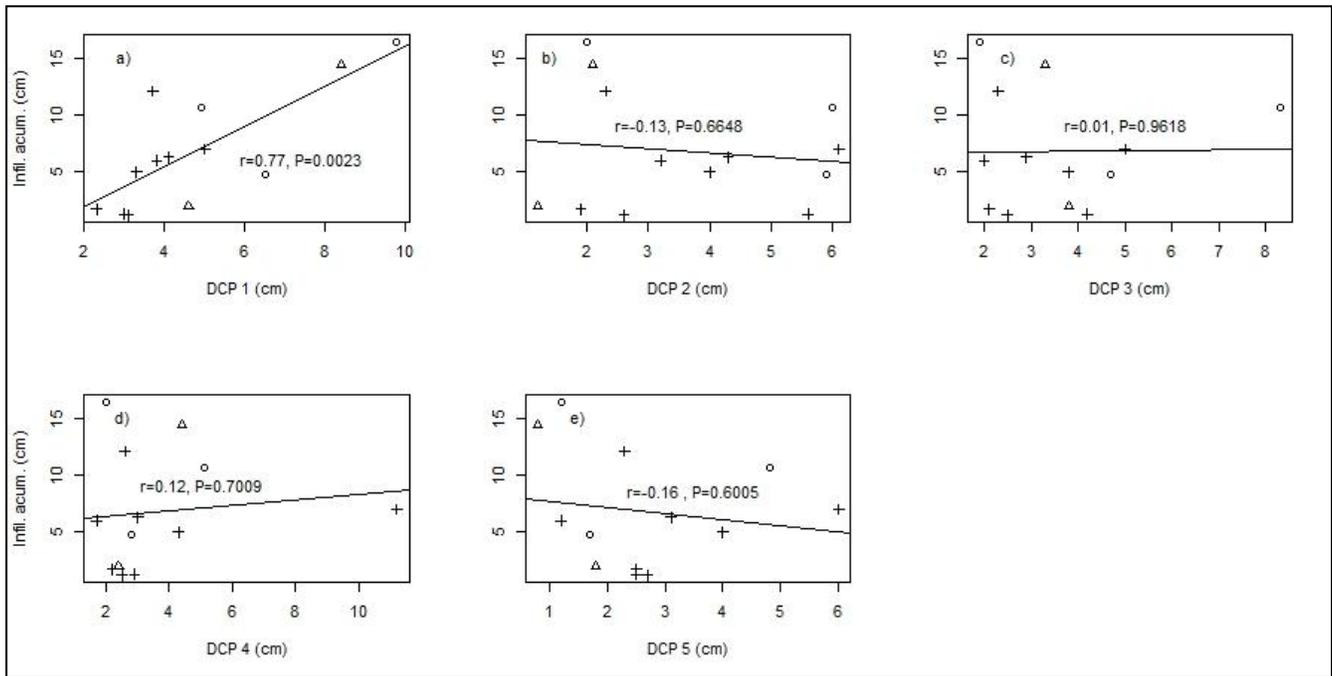
Según los resultados obtenidos, hay una relación negativa entre infiltración acumulada y DA ( $r = 0,8$ ;  $p = 0,0012$ ) (Figura 9a); Así mismo, la relación infiltración acumulada y DCP golpe 1 mostró una relación positiva ( $r = 0,77$ ,  $p = 0,0023$ ), lo que indica que la DA y DCP al primer golpe están estrechamente vinculadas con la infiltración acumulada.

No se encontró relación entre DA y DCP total ( $r = 0,30$ ,  $p = 0,3138$ ) (Figura 9d); sin embargo, la relación DA con DCP al primer golpe sí estuvo correlaciona ( $r = 0,66$ ,  $p = 0,0150$ ) (Figura 9e). La penetración al primer golpe fue inversamente proporcional a la densidad aparente y el contenido de arcilla se relacionó positivamente con la infiltración acumulada ( $r = 0,45$ ,  $p = 0,1199$ ) (Figura 9.f).



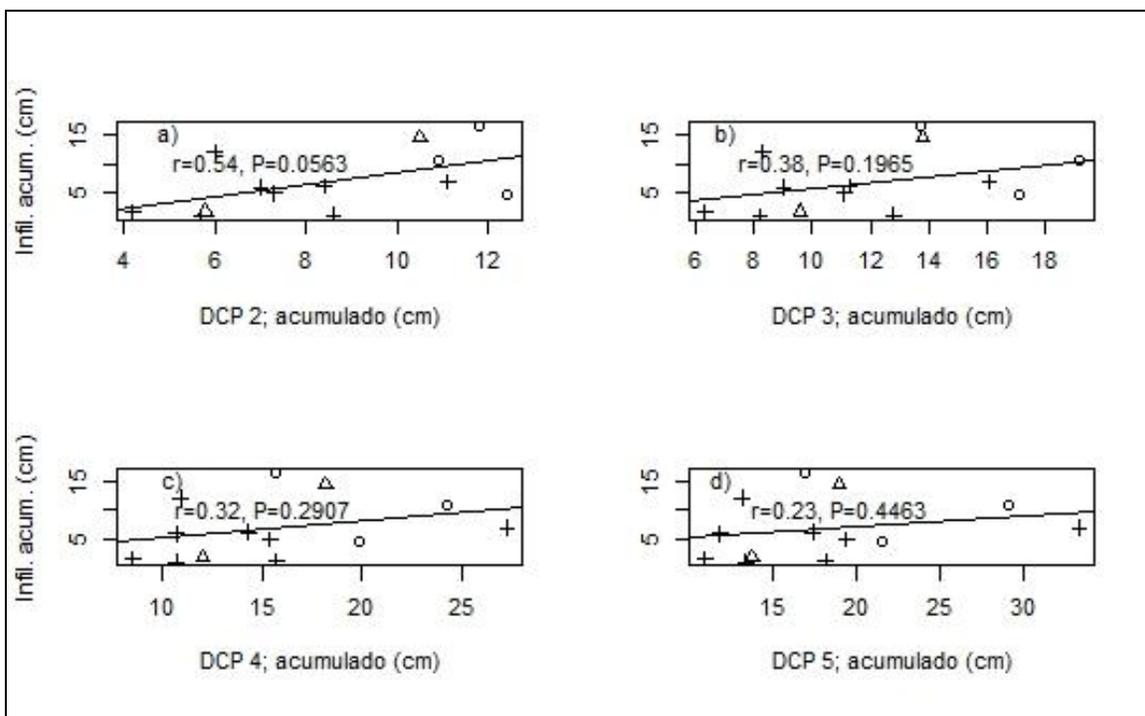
**Figura 9.** Relaciones entre las variables medidas de las propiedades físicas del suelo en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. a) Relación entre densidad aparente (DA) e infiltración acumulada; b) Relación entre DCP total e infiltración acumulada; c) Relación entre DCP en el primer golpe e infiltración acumulada; d) Relación entre DCP total y DA; e) Relación entre DCP en el primer golpe y DA; f) Relación entre contenido de arcilla e infiltración acumulada.

Los golpes DCP medidos de forma individual no mostraron relación con la infiltración acumulada, excepto el golpe número 1 (Figura 10).



**Figura 10.** Relación entre la infiltración acumulada y DCP individual en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua. Círculos: textura arcillosa; triángulo: franca; cruz: textura franco arcillosa

La comparación de la infiltración acumulada versus los golpes DCP medidos de forma acumulada, indicó que los golpes están relacionados con la infiltración acumulada a medida que se profundiza en el suelo en forma directamente proporcional (Figura 11).



**Figura 11.** Relación entre la infiltración acumulada y el DCP acumulado en fincas ubicadas en la cuenca Aguas Calientes, Nicaragua. Círculos: textura arcillosa; triángulo: franca; cruz: textura franco arcillosa

A partir de las mediciones de las principales variables del suelo que afectan su potencial de infiltración, se buscó estimar la infiltración acumulada/infiltrabilidad a partir de propiedades que se calcularon en campo con poca inversión de tiempo y dinero, en las etapas de planeación y prefactibilidad de los proyectos sin hacer uso de pruebas de laboratorio (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Comparación de los costos-tiempo entre los dispositivo penetrómetro dinámico de cono (DCP) e infiltrómetro doble anillos (IDA)

	<b>Unidad de medida</b>	<b>DCP</b>	<b>IDA</b>
Tiempo usado por prueba	Minutos	10	180
Costo de prueba	US\$	1	30
Elaboración de dispositivo	US\$	300	100
Materiales adicionales	Unidad	1 Cinta métrica	2 baldes, 1 fuente cercana con abundante agua, 1 mazo de 20 libras, 6 pedazos de madera (5 cm * 5 cm * 80 cm), 2 reglas (50 cm), 1 barra, 8 guantes
Personal	Unidad	3	4

De los modelos ajustados para predecir la infiltración acumulada el que obtuvo mejor ajuste fue el que contempló como efectos aditivos densidad aparente y DCP1 (Cuadro 5). Este modelo fue ajustado para la estación seca y con suelos de textura arcillosa, franca y franco-arcillosa.

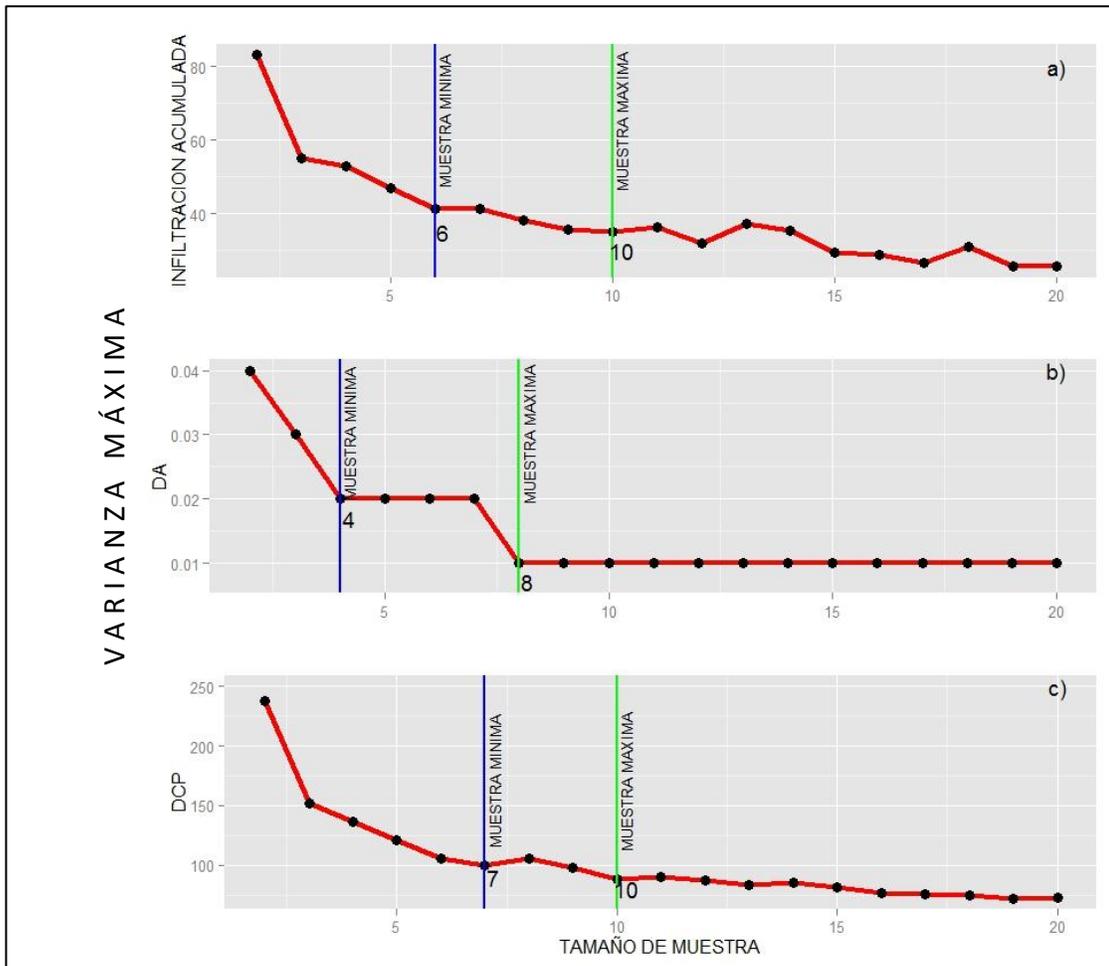
**Cuadro 5.** Resultados de modelos de infiltración acumulada en función de la densidad aparente y el penetrómetro dinámico de cono de fincas ubicadas en la cuenca Somoto, Madriz, Nicaragua

	<b>MODELO</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> Ajustado</b>	<b>Valor de P</b>
1	$I1 = -12.09*DA + 0.99*DCP1 - 15.77$	0.74	0.68	0.0013
2	$I1 = 1.78*DCP1 - 1.71$	0.59	0.55	0.0023
3	$I1 = -18.68*DA + 28.02$	0.63	0.60	0.0012

**Dónde:** I1: Infiltración acumulada [cm], DA: Densidad aparente [ $\text{gr.cm}^3$ ] y DCP1: DCP al primer golpe [ $\text{cm.golpe}^{-1}$ ]

1.3.4. Estimación del número de replicaciones para obtener una estimación de la infiltración en parcelas de 1,4 ha

La varianza máxima disminuye al tomarse en cuenta una mayor cantidad de muestras. Para el caso de la infiltración acumulada, la varianza máxima se estabilizó a partir de seis muestras (Figura 12a): para la DA a partir de cuatro muestras (Figura 12b) y para el caso de DCP a partir de siete muestras (Figura 12c).



**Figura 12.** Varianzas máximas en función del número de muestras en parcelas de 1,4 ha en la cuenca Somoto, Madriz, Nicaragua: a) infiltración acumulada; b) DA; c) DCP total.

#### 1.4. Discusión

Los problemas de sequía en la cuenca hidrográfica Aguas Calientes se deben en parte a que dicha región forma parte del corredor seco de Nicaragua (GWP 2011; Arias *et al.* 2012). Como la mayor parte del origen del agua es de pozo, la infiltración de agua de lluvia tiene mucha importancia para la realización de las actividades diarias y productivas en la cuenca. El cálculo de infiltración acumulada es muy útil para conocer el comportamiento del flujo del agua en el suelo, lo cual es de mucha importancia para el riego y drenaje de cultivos, construcción de canales y acequias, impermeabilización de terraplenes, vías de comunicación terrestres y lagunas de oxidación para tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. El cálculo de infiltración a nivel de cuenca es importante para estudiar el incremento del volumen de escorrentía, erosión hídrica de suelos sin cobertura vegetal, pérdida de capa fértil, reducción de las zonas de recargas hídricas, la resistencia de las raíces de las plantas para penetrar el suelo. La relación entre infiltración y compactación que encontramos en este estudio, implica que el cálculo de las variables DA y DCP permite reducir tiempo (de 3 horas a 10 minutos en lugar), y dinero para estimar la infiltración acumulada.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las fincas con suelos clasificados como tipología cuatro presentaron mayor infiltración acumulada, mayor DCP golpe uno y mayor DCP golpe total, y menor DA y contenido de arcilla, debido presumiblemente a que el área donde permanece el ganado es grande y es posible hacer rotación de potreros. En suelos francos destinados a pasturas, la densidad aparente se incrementa y la infiltración acumulada se reduce (Bharati *et al.* 2002), y en suelos de textura franco arenosas que han sido sometidos a riego, se produce una reducción de la infiltración acumulada debido a compactación (Peterson 1984). Los resultados del presente estudio indican que al aumentar la densidad aparente por compactación se reduce la infiltración acumulada ( $R=0,8$  y valor de  $P$  de  $0,0012$  – Figura 9), debido a que las partículas que forman el suelo reducen su espacio de poros, por lo que el agua no tiene la facilidad de moverse a través de los mismos.

Con el IDA se calcula de forma directa la infiltración acumulada, por lo que los resultados serán más precisos; sin embargo, esta precisión está supeditada a los cambios de nivel del agua todo el tiempo de la prueba. Cuando el IDA se inserta 10 cm en el suelo, se hace un alto esfuerzo físico con la percusión manual del martillo de 20 libras, y aún más repeticiones cuando el suelo está muy compacto. Con este método el suelo es destruido, en el sitio quedan marcas de la circunferencia del aparato y en algunos casos del círculo completo. Con este método se necesitan instrumentos adicionales para poder completar la prueba (2 baldes, 1 fuente cercana con abundante agua, 1 mazo de 20 libras, 6 pedazos de madera (5 cm \* 5 cm \* 80 cm), 2 reglas (50 cm), 1 barra, 8 guantes y el tiempo de uso y costo aproximado es de

180 minutos y US\$30 respectivamente). Los valores de infiltración acumulada son sobreestimados por la cabeza de agua (mayor a 10 cm) con que se efectúa la prueba, ya que al momento de las precipitaciones, las cabezas de agua pocas veces alcanzan un nivel mayor de 10 cm.

Con el uso del dispositivo DCP, por su parte, se obtienen resultados de infiltración acumulada de forma indirecta en menos de 10 minutos. Para operar este dispositivo se necesita dejar caer una masa de 8 kg a través de una varilla de 5/8 de pulgada, lo cual implica relativamente un esfuerzo físico bajo; el suelo es poco destruido, quedando solamente un agujero de 5/8 de pulgadas; se necesitan pocos instrumentos adicionales para completar la prueba y el dispositivo puede ser operado por personas capacitadas al momento de hacer la prueba con la supervisión del capacitador.

Con el uso del dispositivo DCP será posible efectuar más muestreos en campo (debido a la alta variabilidad temporal y espacial), para calcular la infiltración acumulada de los suelos, con baja inversión de tiempo y dinero (10 minutos y costo aproximado de US\$1); similar a las funciones de pedotransferencia usadas para calcular las características hidráulicas de los suelos (Wösten *et al.* 2001).

El DCP primer golpe está relacionado positivamente con la infiltración acumulada de agua en los suelos; es decir, a mayor DCP golpe 1, mayor infiltración acumulada, lo cual está relacionado también con la textura del suelo. Con el DCP primer golpe se obtiene una mejor relación con la infiltración acumulada debido a que la profundidad oscila entre 2,3 cm y 9,8 cm, lo cual presumiblemente puede estar relacionado con la profundidad a la cual son insertados los cilindros en el suelo (10 cm).

Como los datos se recopilaban durante la estación seca, las partículas que forman las arcillas se encuentran contraídas y permiten el almacenamiento de agua entre los espacios que hay entre las partículas. En los períodos secos el volumen individual de los agregados de las arcillas se reduce, por lo que en campo se pueden observar grietas de contracción; en cambio, en períodos húmedos el hinchamiento causa el cierre de las grietas en un movimiento hacia de la superficie del suelo (Grim 1953; Hillel 1982; Bronswijk 1991). Cuando las grietas se cierran, la infiltración de agua en el suelo ocurre muy despacio, por lo que se crea la escorrentía superficial. En estas condiciones los pastos pueden ser destruidos por las pezuñas del ganado.

Durante las estaciones secas los suelos formados por arcillas se fracturan y producen un alto nivel de infiltración acumulada (Bronswijk 1991; Radke y Berry 1993). Con respecto a nuestros resultados, esto implica que la infiltración acumulada será mayor, ya que el agua se encargará de rellenar todos los macroporos y grietas presentes en el suelo. En 3 muestras de suelos (fincas con tipología 1 y 3), la textura es arcillosa, sin embargo en una de estas muestras (DA=0.79 gr.cm<sup>-3</sup>, infiltración acumulada=16.4 cm),

se da una mayor infiltración, presumiblemente debido a que tiene mayor porcentaje de arcilla (Figura 9), lo que hace que el suelo tenga mayor potencial expansivo de acuerdo a la gráfica para la determinación de expansividad potencial de suelos usada por Van der Merwe (1956). En este estudio el contenido de arcilla y por lo tanto la textura de los suelos, tienen influencia sobre el comportamiento de la infiltración acumulada, la densidad aparente (Van der Merwe 1956; Mukhtar *et al.* 1985) y el DCP ya que el contenido de arcilla es directamente proporcional a la infiltración acumulada y DCP e inversamente proporcional a la densidad aparente.

Los resultados obtenidos durante la fase de campo de este estudio para suelos CH (*clay of high plasticity*) fueron 7,06 cm DCP promedio y para suelos CL (*clay of low plasticity*) 4,13 cm DCP promedio coinciden con los de Webster *et al.* (1992), quienes encontraron (en datos de campo de CBR versus DCP), valores de DCP de 2 a 6 cm para suelos CH y de 3 a 6 cm de DCP para suelos CL. (Edil *et al.* 2006), encontraron resultados de 9 a 36 cm de DCP para suelos CH y de 4 a 16 cm de DCP para suelos CL.

En la curva de varianza máxima de infiltración acumulada se observa una tendencia constante, aproximadamente de un tamaño de muestra entre 6 y 9. En la “Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo” de USDA se propone hacer como mínimo 3 muestras; la curva de varianza máxima para tres muestras es alta. En el caso de DCP total y DA no existen referencias bibliográficas que indiquen el tamaño de muestras óptimo; por lo que en este artículo se propone realizar entre 7 y 10 muestras para DCP total y entre 4 y 8 muestras para DA. La cantidad de repeticiones para tener una estimación confiable de DCP y DA en una ventana de una hectárea, dependerá de la variabilidad espacial dada por las condiciones de suelo, microrelieve, etc.

## 1.5. Conclusión

En la parte media y baja de la cuenca Aguas Calientes existe escasez de agua. Cuando se dan las precipitaciones el agua no se infiltra, sino que corre hacia las quebradas y ríos a alta velocidad. En las comunidades Quebrada de Agua, Mansico, Los Copales, Santa Rosa, Rodeo No. 2 y Santa Isabel, el nivel freático en los pozos ha bajado de manera crítica por lo que los gobiernos municipales traen cisternas de agua desde otra cuenca hidrográfica para poder abastecer a estas comunidades.

La finca con tipología cuatro (mayor área y rotación de potreros y mayor cantidad de animales), presenta menor densidad aparente, mayor infiltración acumulada y mayor DCP al primer golpe; las fincas de la tipología uno (con menor área y rotación de potreros y menor cantidad de animales), presentan mayor densidad aparente, menor infiltración acumulada y menor DCP al primer golpe.

La profundidad de penetración de DCP está relacionada con la infiltración de agua en el suelo ya que al aumentar la profundidad de penetración, los valores de coeficiente de correlación con infiltración acumulada se van reduciendo, lo que puede estar relacionado con la respuesta del suelo en los primeros instantes de tiempo al proceso de infiltración.

El DCP es un instrumento que puede ser usado para estudiar la compactación del suelo hasta una profundidad de 1 m; además se puede usar en terrenos de difícil acceso. Es posible obtener resultados de resistencia a la penetración e infiltración acumulada inmediatamente al finalizar la prueba.

Por otra parte, el uso del IDA implica mucha inversión de tiempo y dinero, en cambio el uso de DCP ayuda a reducir dichos costos. Cuando el DCP encuentra una piedra durante en su trayectoria es necesario moverlo hacia otro lugar, para evitar el deterioro del instrumento.

Para estimar la infiltración acumulada en un área de 1,4 ha se requieren entre 7 y 10 muestras de DCP y DA.

## 1.6. Recomendación

Se recomienda el uso de DCP como un método alternativo para calcular la infiltración acumulada ya que es posible obtener los resultados de forma rápida, a menor costo y con un reducido uso de herramientas y personal y un mayor número de muestras a ser consideradas (mínimo ocho).

Se requieren hacer estudios en donde las condiciones de suelo y agua estén completamente controladas: efectuar varias repeticiones de mediciones de DCP e infiltración acumulada para diferentes texturas de suelo, agregar volúmenes exactos de agua a las muestras de suelo, controlar la precisión y exactitud de la pendiente de los suelos, diferentes gradientes altitudinales, agregar o eliminar materia orgánica del suelo para medir los resultados de DCP e infiltración acumulada.

En futuras investigaciones es necesario realizar pruebas durante la estación lluviosa con las mismas texturas de suelo y calcular el porcentaje de porosidad de cada muestra de suelo para determinar posibles influencias en el modelo empírico presentado en este artículo.

El involucramiento de los dueños de las fincas o líderes comunitarios en estudios de infiltración es recomendable para que vean y conozcan lo que ocurre con la infiltración del agua pluvial bajo distintos escenarios de compactación o DA.

Para un área de 1,4 ha se recomienda un mínimo de siete muestras para estimar la infiltración acumulada, DCP y DA.

## 1.7. Bibliografía

- Abdel-Magid, AH; Schuman, GE; Hart, RH. 1987. Soil bulk density and water infiltration as affected by grazing systems. *Journal of Range Management*:307-309.
- Amini, F. 2003. Potential applications of dynamic and static cone penetrometers in MDOT pavement design and construction. Mississippi, United States of America, Jackson State University.
- Arias, A; Zee, J; Meyrat, A; Poveda, C; Picado, L. 2012. Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano (Países CA-4). Tomo 1. Tegucigalpa, Honduras, FAO.
- Asouline, S. 2006. Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve. *Vadose Zone Journal* 5(2):554-563.
- Assouline, S. 2002. Modeling soil compaction under uniaxial compression. *Soil Science Society of America Journal* 66(6):1784-1787.
- Atkinson, R; Flint, J. 2001. Accessing hidden and hard-to-reach populations: Snowball research strategies. *Social Research Update* 33(1):1-4.
- Bailey, A; Johnson, C; Schafer, R. 1986. A model for agricultural soil compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research* 33(4):257-262.
- Batres, CA; Barahona-Palomo, M. 2017. Comparison of three infiltration methods used to calculate soil water balance, in the Suquíapa River Basin, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED* 9(1):23-33.
- Bedbabis, S; Rouina, BB; Boukhris, M; Ferrara, G. 2014. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. *Journal of Environmental Management* 133:45-50.
- Benegas, L; Jiménez Otárola, F; Locatelli, B; Faustino, J; Campos, M. 2007. Evaluación de la adaptación de los productores a la variabilidad climática, principalmente a la sequía, en cuencas hidrográficas de América Central. Parte 1. Propuesta metodológica. *Recursos Naturales y Ambiente* 51-52:107-116.
- Bengough, AG; Campbell, DJ; O'Sullivan, MF. 2000. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. *Soil environmental analysis: physical methods* 2:377-403.
- Bharati, L; Lee, K-H; Isenhardt, T; Schultz, R. 2002. Soil-water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in Midwestern USA. *Agroforestry Systems* 56(3):249-257.
- Bouyoucos, GJ. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Science* 23(5):343-354.
- Bronswijk, J. 1991. Drying, cracking, and subsidence of a clay soil in a lysimeter. *Soil Science* 152(2):92-99.
- Bryant, H; Blaser, R; Peterson, J. 1972. Effect of trampling by cattle on bluegrass yield and soil compaction of a Meadowville Loam. *Agronomy Journal* 64(3):331-334.
- Carter, M. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams Canadian. *Journal of Soil Science* 70(3):425-433.
- Castellanos-Navarrete, A; Chocobar-Guerra, A; Cox, R; Fonteyne, S; Govaerts, B; Jaspers, N; Kienle, F; Sayre, K; Verhulst, N. 2013. Infiltración: guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo. México, CIMMYT.
- Croney, D; Coleman, J. 1954. Soil structure in relation to soil suction (pF) European. *Journal of Soil Science* 5(1):75-84.
- Daniel, DE. 1989. In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering* 115(9):1205-1226.
- Das, BM; Sivakugan, N. 2016. *Fundamentals of geotechnical engineering*. Boston, United States of America, Cengage Learning.
- Di, H; Cameron, K; Milne, J; Drewry, J; Smith, N; Hendry, T; Moore, S; Reijnen, B. 2001. A mechanical hoof for simulating animal treading under controlled conditions, *New Zealand Journal of Agricultural Research* 44(1):111-116.
- Domínguez, S; Velásquez, S; Jiménez, F; Faustino, J. 2008. Zonificación ambiental para el ordenamiento territorial de la subcuenca bimunicipal del río Aguas Calientes, Nicaragua. *Recursos Naturales y Ambiente* 55:64-73.

- Donkor, N; Gedir, J; Hudson, R; Bork, E; Chanasyk, D; Naeth, M. 2002. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science* 82(1):1-8.
- Duley, F. 1940. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Proceedings. Soil Science Society of America*, 1939 4:60-64.
- Dunne, T; Dietrich, WE; Brunengo, MJ. 1978. Recent and past erosion rates in semi-arid Kenya. *Zeitschrift für Geomorphologie* 29:130-140.
- Dunne, T; Western, D; Dietrich, W. 2011. Effects of cattle trampling on vegetation, infiltration, and erosion in a tropical rangeland. *Journal of Arid Environments* 75(1):58-69.
- Edil, TB; Acosta, HA; Benson, CH. 2006. Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(2):283-294.
- Feleke, GG; Araya, AA. 2016. Prediction of cbr using dcp for local subgrade materials. s.l. AfCAP.:
- Ferrero, A; Lipiec, J. 2000. Determining the effect of trampling on soils in hillslope-woodlands. *International Agrophysics* 14(1):9-16.
- Fritton, D. 2001. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. *Soil Science Society of America Journal* 65(3):678-684.
- Gee, G; Bauder, J. 1979. Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters. *Soil Science Society of America Journal* 43(5):1004-1007.
- Gifford, GF; Hawkins, RH. 1978. Hydrologic impact of grazing on infiltration: a critical review. *Water Resources Research* 14(2):305-313.
- Grim, RE. 1953. *Clay mineralogy*. New York, United States of America, Mcgraw-Hill Book Company.
- GWP. 2011. *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada*. Tegucigalpa, Honduras..
- Hamza, M; Anderson, W. 2005. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82(2):121-145.
- Hill, J; Sumner, M. 1967. Effect of bulk density on moisture characteristics of soils. *Soil Science* 103(4):234-238.
- Hillel, D. 1982. *Introduction to soil physics*. New York, United States of America, Academic press.
- Imhoff, S; Silva, APD; Tormena, CA. 2000. Applications of the resistance curve in the control of the physical quality of soils under grass. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 35(7):1493-1500.
- Karunaprema, K; Edirisinghe, A. 2001. *Dynamic cone penetrometer-its use in highway engineering*. Peradeniya, Sri Lanka. IESL.
- Kianirad, E. 2011. *Development and testing of a portable in-situ near-surface soil characterization system*. Thesis Boston, United States of America, Boston Northeastern University.
- Libardi, P; Reichardt, K; Jose, C; Bazza, M; Nielsen, D. 1982. An approximate method of estimating soil water diffusivity for different soil bulk densities. *Water Resources Research* 18(1):177-181.
- Livneh, M. 1989. Validation of correlations between a number of penetration tests and *in situ* California bearing ratio tests. *Transportation Research Record* 1219:56-67.
- Mapfumo, E; Chanasyk, D; Naeth, M; Baron, V. 1999. Soil compaction under grazing of annual and perennial forages. *Canadian Journal of Soil Science* 79(1):191-199.
- Mitchell, F; Berry, W. 2001. The effects and management of compaction in agricultural soils. *Proc S Afr Sug Technol Assoc* no. 75:118-124.
- Mohammadi, S; Nikoudel, M; Rahimi, H; Khamehchiyan, M. 2008. Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils. *Engineering Geology* 101(3):195-203.
- Mukhtar, S; Baker, J; Horton, R; Erbach, D. 1985. Soil water infiltration as affected by the use of the paraplow. *Transactions of the ASAE* 28(6):1811-1816.
- Mwendera, E; Saleem, MM. 1997. Hydrologic response to cattle grazing in the Ethiopian highlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 64(1):33-41.
- Pietola, L; Horn, R; Yli-Halla, M. 2005. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil and Tillage Research* 82(1):99-108.

- Proffitt, A; Bendotti, S; McGarry, D. 1995. A comparison between continuous and controlled grazing on a red duplex soil. I. Effects on soil physical characteristics. *Soil and Tillage Research* 35(4):199-210.
- Radke, J; Berry, E. 1993. Infiltration as a tool for detecting soil changes due to cropping, tillage, and grazing livestock. *American Journal of Alternative Agriculture* 8(4):164-174.
- Robinson, R; Alderfer, R. 1952. Runoff from permanent pastures in Pennsylvania. *Agronomy Journal* 44(9):459-462.
- Silva, V; Reinert, D; Reichert, J. 2000. Soil bulk density, chemical attributes and corn root distribution as affected by grazing and soil management. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 24(1):191-199.
- Smith, RE; Woolhiser, DA. 1971. Overland flow on an infiltrating surface. *Water Resources Research* 7(4):899-913.
- Soane, B; Blackwell, P; Dickson, J; Painter, D. 1980. Compaction by agricultural vehicles: A review I. Soil and wheel characteristics. *Soil and Tillage Research* 1:207-237.
- Umaña, E; Mendoza, J. 2000. Caracterización biofísica de la subcuenca Coco-Somoto Informe final del estudio. Somoto, NI, Alcaldía Municipal:
- Usman, H. 1994. Cattle trampling and soil compaction effects on soil properties of a northeastern Nigerian sandy loam. *Arid Land Research and Management* 8(1):69-75.
- Van der Merwe, D. 1956. The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils - discussion. *Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese* 6(12):226-228.
- Van Haveren, BP. 1983. Soil bulk density as influenced by grazing intensity and soil type on a shortgrass prairie site. *Journal of Range Management*:586-588.
- Vogt, WP; Johnson, RB. 2011. *Dictionary of Statistics & Methodology: A Nontechnical Guide for the Social Sciences*. United States of America, Sage.
- Vzzotto, VR; Marchezan, E; Segabinazzi, T. 2000. Effect of cattle trampling on lowland soil physical properties. *Ciencia Rural* 30(6):965-969.
- Warren, SD; Nevill, M; Blackburn, W; Garza, N. 1986. Soil response to trampling under intensive rotation grazing. *Soil Science Society of America Journal* 50(5):1336-1341.
- Webster, SL; Grau, RH; Williams, TP. 1992. Description and application of dual mass dynamic cone penetrometer. Washington, DC., United States of America, US Army Corps of Engineer. (Instruction Report GL-92-3).
- Willatt, S; Pullar, D. 1984. Changes in soil physical properties under grazed pastures. *Soil Research* 22(3):343-348.
- Wösten, J; Pachepsky, YA; Rawls, W. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251(3-4):123-150.
- Zacny, K; Wilson, J; Craft, J; Asnani, V; Oravec, H; Creager, C; Johnson, J; Fong, T. 2010. Robotic lunar geotechnical tool. Honolulu, Hawaii, ASCE Earth and Spece. p. 166-181.
- Zacny, K; Bualat, M; Lee, P; Alvarez, L; Fong, T; Deans, M; VanGundy, L; Lees, D. 2012. Using Percussive, Dynamic, and Static Soil Penetrometers to Assess Geotechnical Properties and the Depth to Ground Ice of the Mars and Lunar Analog Terrains on the Devon Island, Canadian Arctic. s. I. *Earth and Space* 2012 p. 284-294.

Anexos

Anexo 1. Formato de entrevista aplicada en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua

Nombre de la persona entrevistada : \_\_\_\_\_  
 Nombre del entrevistador : \_\_\_\_\_  
 Coordenadas UTM : X: \_\_\_\_\_; Y: \_\_\_\_\_; Z: \_\_\_\_\_  
 Fecha de entrevista : \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
 Hora de entrevista : \_\_\_\_:\_\_\_\_

Mi nombre es Jeffrey Díaz, soy estudiante de CATIE de la Maestría Manejo y gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas y estoy aquí con el objetivo de entrevistarle, para conocer su opinión y recibir sus comentarios sobre los usos de suelo y el impacto que tienen en la filtración del agua. Esta entrevista puede durar entre 10 a 15 minutos.  
 Su participación en esta conversación es totalmente voluntaria, si no desea participar o si existe alguna pregunta que no desea contestar puede decírmelo sin ningún problema. Si en algún momento se incomoda y no quiere continuar, por favor me lo hace saber. Su respuesta es anónima, esta será estudiada en conjunto y no se analizará en particular.  
 En caso de que mi pregunta no sea clara o desee una explicación adicional no dude en preguntarme.

Ganado: Si  No  Cantidad  Área de potrero

PESO (Kg)	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	>700
CANTIDAD								

	TERNEROS	TOROS	BUEYES	VACAS			
CANTIDAD							

	PARA CRIANZA	PARA LECHE	PARA CARNE	PARA TRABAJO		
CANTIDAD						

Pasturas: Sembradas  Naturales  Especies de pasturas: \_\_\_\_\_

¿Hace cuánto tiempo tiene el potrero?

¿Cada cuánto tiempo rota al ganado del potrero?

Árboles dentro del potrero: Si  No  Cantidad de árboles  Especies de árboles: \_\_\_\_\_

Árboles linderos del potrero: Si  No  Especies de árboles: \_\_\_\_\_

Residuos de cultivos: se remueven  se mantienen en el campo

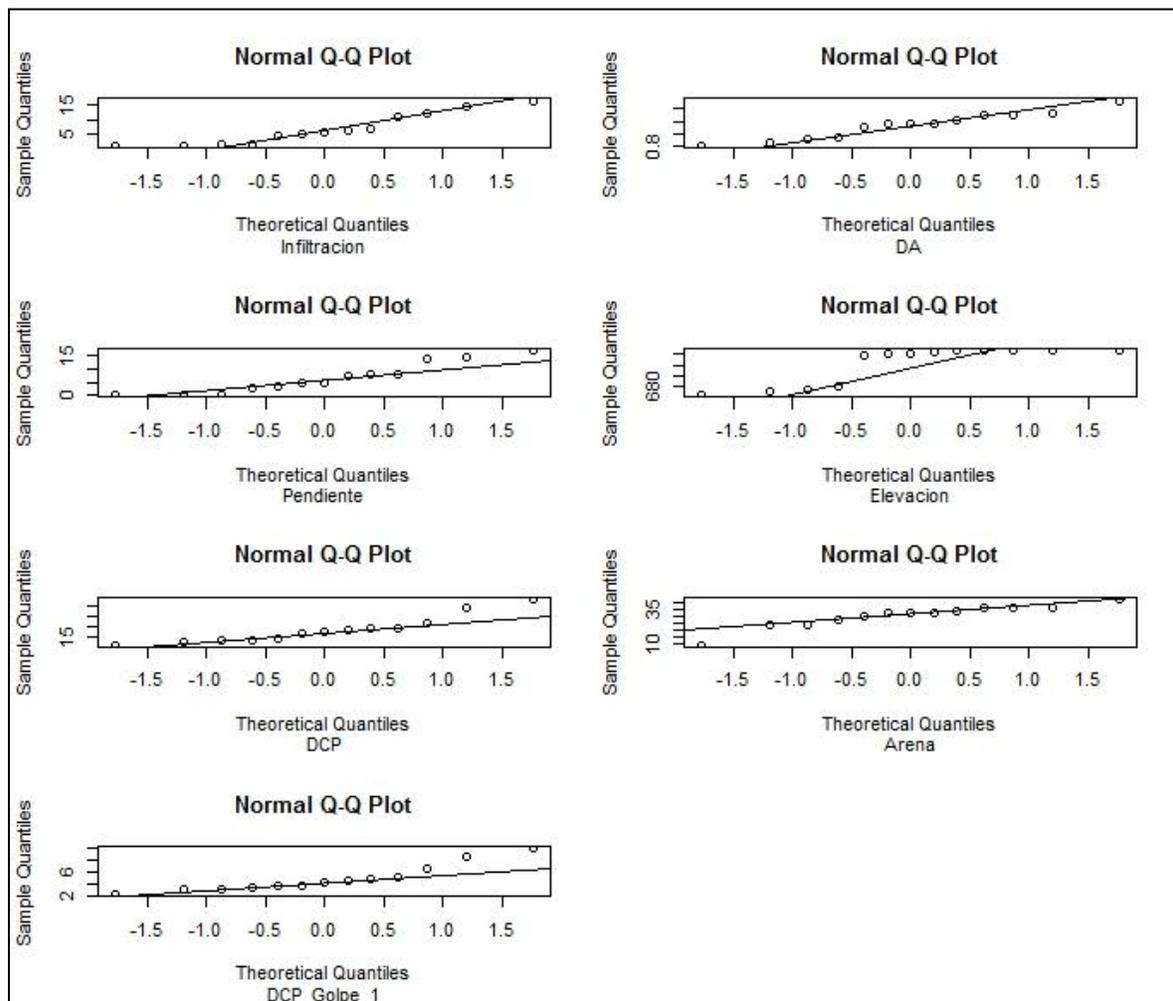
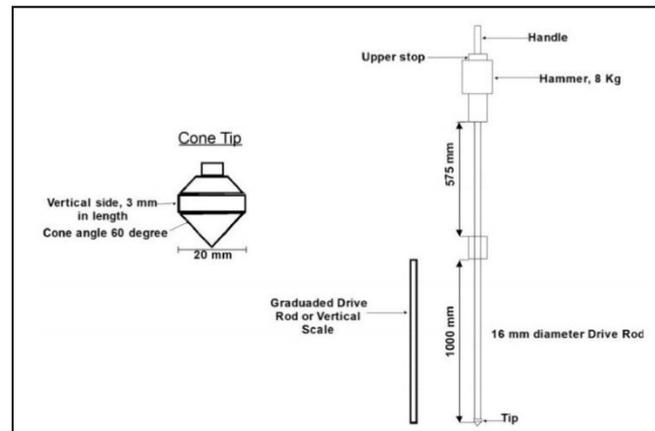
Origen del agua: Potable  Quebrada  Pozo  Cosecha de agua  Montaña

Problemas con el agua: Deslizamientos  Inundación  Escasez  Sequía

Cantidad de agua: Buena  Regular  Mala

¿Cree que el pisoteo del ganado influye en la escorrentía de agua? Sí  No

## Anexo 2. Diagrama del DCP



Prueba gráfica de normalidad de variables medidas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua

Prueba analítica de normalidad de variables medidas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks							
	Infiltración	DA	Pendiente	Elevación	DCP	Arena	DCP golpe 1
W	0,90486	0,95675	0,90256	0,69228	0,92482	0,88613	0,86503
P-valor	0,1559	0,703	0,145	0,000465	0,2911	0,08639	0,0449

Equivalencias de textura según USDA y clasificación SUCS en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua

Punto	TEXTURA (USDA)	SUCS
3-E-12	Arcilla	CH
1-E-17	Franco	CL
2-E-17	Franco Arcilloso	CL
3-E-17	Franco Arcilloso	CL
1-E-33	Franco Arcilloso	CL
2-E-33	Franco Arcilloso	CL
3-E-33	Franco Arcilloso	CL
1-E-39	Franco Arcilloso	CL
2-E-39	Arcilla	CH
3-E-39	Franco Arcilloso	CL
1-E-46	Franco Arcilloso	CL
2-E-46	Franco	CL
3-E-46	Arcilla	CH

Resumen de variables calculadas en la cuenca Aguas Calientes, Madriz, Nicaragua

	Unidad de medida	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Infiltración acumulada	cm	1,20	16,40	6,82
Velocidad de infiltración media	mm hora <sup>-1</sup>	8,73	366,50	73,42
DA	gr cm <sup>-3</sup>	0,79	1,54	1,14
Pendiente	%	0	17,03	6,42
Elevación	m	664,00	748,00	722,40
DCP	cm	8,2	33,30	17,94
Arena	%	9,80	41,80	30,26
Arcilla	%	26,20	62,20	36,20
Infiltración	mm hora <sup>-1</sup>	2,88	22,46	12,82
DCP golpe 1	cm	2,30	9,80	4,81

### Tamaño de muestras para DCP total, Infiltración acumulada y DA

Estos resultados aplican para un área de 1,4 ha, en época seca y suelos con texturas franco arcillosa. A partir de 34 muestras; se aplicó la herramienta de remuestreo (con INFOSTAT), y luego aleatorios con reposición, número de muestras 5000 y tamaño muestral desde 2 hasta n.

