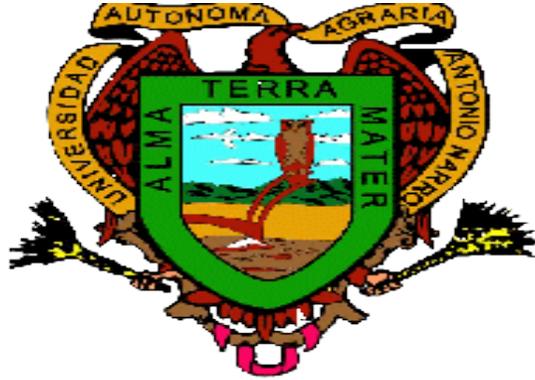


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
CENTRO ACADEMICO REGIONAL CHIAPAS**



**DIAGNÓSTICO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS
CAFETALEROS DE LA MICRO CUENCA LA SUIZA, MUNICIPIO DE
MONTECRISTO, CHIAPAS.**

TESIS

Presentada por:

JULIÁN ZAVALA MOLINA

Como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN CIENCIAS AGRARIAS

Cintalapa de Figueroa, Chiapas, México, Octubre 2015.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
“CENTRO ACADEMICO REGIONAL CHIAPAS”

**DIAGNÓSTICO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS
CAFETALEROS DE LA MICRO CUENCA LA SUZA, MUNICIPIO DE
MONTECRISTO, CHIAPAS.**

Por:

JULIÁN ZAVALA MOLINA

TESIS

Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial
para obtener el título de:

INGENIERO EN CIENCIAS AGRARIAS

APROBADO



Dr. Armando Rodríguez García

Asesor principal



M.Sc. Walter López Báez
Asesor



Ing. Francisca del Rosario de la Cruz Morales
Sinodal



Dr. Armando Rodríguez García
Director del Centro Académico Regional
Chiapas.



Cintalapa de Figueroa, Chiapas, México Octubre 2015

DEDICATORIA

Dios

Señor por la fortaleza que me has dado, desde mi nacimiento hasta hoy en día, por permitirme estar con las personas que más amo, por prestarme tu caminar para seguirlo como ejemplo para lograr mis metas, gracias por amarme, por estar a mi lado en los momentos más difíciles, como cuando estaba solo y sin darme cuenta me sostenías ante tus brazos consolando mi corazón.

Estas palabras quedan grabadas en este humilde papel, porque tú fuiste el que me guio y me guía para seguir luchando.

A mis padres Santiago y Luzvina

Por haberme formado un hombre con valores y principios, por apoyarme en mis estudios y en los momentos más difíciles, con la finalidad de ser una mejor persona.

A mis abuelitos May y mi mama Elena

Por haber sido mis segundos papás, por apoyarme cuando mis papas no se encontraban a mi lado, por aconsejarme en los momentos difíciles que cruzaba en mi vida.

A mi hermana Ariana

Por haber compartido con migo los momentos más importante de mi vida, por ser mi amiga y demostrarme su cariño a cada momento.

A mis hermanos Santiago, Maritza, Erick

Por regalarme una sonrisa de alegría, por acompañarme y demostrarme su cariño, por querer seguir mi ejemplo y por compartir con migo momentos de mucha alegría.

A mi novia Martita

Por el gran apoyo que me ha brindado, por ser mi mejor amiga, por apoyarme en momentos difíciles, por compartir momentos de alegría a mi lado, por ser una persona linda, por aconsejarme en los momentos difíciles, por tener un gran corazón.

A mi tía Fran

Por su apoyo incondicional, por prestarme su hogar, por ser una persona de corazón dulce, por ser un ejemplo a seguir por que con sus consejos me ha impulsado a no darnos por vencidos.

AGRADECIMIENTOS

Dios

Gracias señor por la fortaleza que me has concedido, por las fuerzas que me has dado para seguir en el trascurso de mi vida, gracias por estar a mi lado y ser mi inspiración, mi luz y mi ejemplo a seguir.

Gracias por permitirme vivir en el mismo año en la misma época con las personas que yo más amo.

A mis Papás

Gracias por ser unas personas maravillas, por regalarme la vida y el tiempo para estar a mi lado, por ser los mejores padres. Son los papas más increíbles, ya que han formado en mí un hombre que lucha por mejorar día a día su vida. Estoy orgullo de ustedes por su duro trabajo que han afrontado para sacarnos adelante aun en los tiempos difíciles, gracias. No me quedan palabras para expresar lo maravillosos padres que Dios me ha regalado, los amo, siempre han sido mi ejemplo a seguir muchas gracias.

A mi novia Martita

Gracias por regalarme momento de ternura y amor, por demostrarme tu cariño todos los días, por motivarme para seguir luchando, por darme lo mejor de ti.

Gracias por dejarme ver tu hermoso corazón, por ser mi motivación para salir adelante, te amo martita, gracias.

A mi tía Fran

Por ofrecernos su corazón, por regalarme sus consejos, por ayudarme cuando más lo necesitaba, gracias por estar a mi lado cuando me encontraba enfermo, siempre estaré agradecido con usted, por ser una persona que lucha por lo que desea, Dios me la bendiga siempre.

A los productores cafetaleros de la micro cuenca la suiza.

Por su acompañamiento en el estudio de suelos de su cafetales, por brindarnos su apoyo al disponer tiempo de su trabajo, por abrirnos sus puertas de sus comunidad y confiar en nosotros.

A María Guadalupe Manuel Ugarte

Por su comprensión, por su gran amistad, por brindarnos su compañía y abrirnos las puertas de su casa, por brindarnos su cariño en nuestra estancia en la suiza, por permitirme ser su amigo.

M.Sc. Walter López Báez

Por su incondicional apoyo que me ha brindado, por su amistad, por enseñarme valores profesionales, por brindarme consejos de superación, por su gran confianza y por permitir ser parte de su maravillosa familia.

Ing. Francisca del Rosario de la Cruz Moralez.

Por su amistad, por su apoyo en la revisión de mi tesis, por ser una persona con valores, por transmitirme sus conocimientos en el transcurso de mis estudios.

Dr. Armando Rodríguez García

Por su apoyo profesional en la revisión de mi tesis y sus consejos laborales.

FONCET

Por permitirme realizar este trabajo de investigación dentro de la Reserva Biosfera el Triunfo, y por la confianza brindada que se refleja hoy en día en la culminación de dicho trabajo que ayudara a la conservación de los suelos y beneficios a las personas de las comunidades que habitan dentro de la Reserva.

INDICE GENERAL

	Pagina
INDICE DE CUADROS	viii
INDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
I. INTRODUCCION	1
1.1.Justificación	2
1.2.Objetivos	3
1.2.1.General	3
1.2.2.Especificos	3
1.3.Hipotesis	3
II. REVISION DE LITERATURA	4
2.1.La propuesta integrada de adaptación al cambio climático en la micro cuenca la suiza	4
2.2.Suelo	5
2.3.Propiedades físicas de los suelos	8
2.4.Profundidad del suelo	10
2.5.Textura	11
2.6.Densidad aparente	13
2.7.Porocidad	14
2.8.Infiltración	15
2.9.Pendiente	16
2.10.Humedad del suelo	17

2.11.Materia orgánica	20
2.12.Metodología participativa	21
III. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1.Descripción física de la zona de estudio	24
3.1.1.Localizacion	24
3.1.2.Clima	24
3.1.3.Fisiología y topografía	26
3.1.4.Edafología	26
3.1.5.Geología	28
3.2.Materiales y equipos	30
3.3.Metodología	31
3.3.1.Presentación del proyecto con responsables del proyecto piloto en la suiza	31
3.3.2.Presentacion del proyecto con las comunidades	32
3.3.3.Capacitación de los productores y organización de rutas de muestreo	32
3.3.4.Toma, preparación y análisis de muestra de suelos	33
3.4.Propiedades de los suelos estudiadas	34
3.4.1.Textura	34
3.4.2.Densidad aparente	35
3.4.3. Porosidad en (%)	36
3.4.4.Humedad	37
3.4.5.Velocidad de infiltración	38

3.4.6.La profundidad del suelo y del horizonte húmico	38
3.4.7. Pendiente del terreno (%)	39
3.4.8.Materia orgánica	39
3.5.Análisis de materia orgánica	40
3.5.1.Entrega de resultados a los productores	40
IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1.Integración de base de datos georeferenciadas	42
4.2.Textura	43
4.3.Profundidad del suelo	44
4.4.Densidad aparente	47
4.5.Infiltración	50
4.6.Porosidad del suelo	53
4.7.Humedad del suelo	55
4.8.Materia orgánica	57
4.9. Pendiente del terreno (%)	58
4.10.Relaciones entre propiedades	59
V.CONCLUSIONES	61
VI.BIBLIOGRAFIA	63

INDICE DE CUADROS

Cuadros		Pagina
3.1	Variables climatológicas de la estación Cuxtepeques	25
3.2	Unidades edafológicas de la microcuenca la Suiza	27
3.3	Unidades geológicas de la microcuenca la Suiza	29
3.4	Datos de los cursos de capacitación impartidos	33
3.5	Valores de densidad aparente según tipo de textura y efecto en el crecimiento de las raíces USA (1999).	36
3.6	Clasificación del porcentaje de porosidad	37
3.7	Velocidades y clases de infiltración USA(1999)	38
3.8	Clasificación de la materia orgánica	40
4.9	Porcentaje de arena, limo, arcilla, en los suelos estudiados	43
4.10	Estadística de profundidad (cm) del horizonte	45
4.11	Estadística de profundidad(cm) total del suelo	46
4.12	Resultados de densidad aparente (gr/cm^3)	48
4.13	Parecencia de piedra en los suelos estudiados(n=109)	49
4.14	Clasificación de las parcelas según datos de densidad aparente	49
4.15	Clasificación de las parcelas según datos de densidad aparente	50
4.16	Estadística de infiltración	51
4.17	Velocidad de infiltración con y sin presencia de piedra en el suelo	52
4.18	Velocidades y clases de infiltración	52
4.19	Porcentaje de porosidad con y sin presencia de piedra en el suelo	53
4.20	Clasificación de los suelos según porcentaje de porocidad	54
4.21	Contenido de agua en volumen (gr/cm^3) por tipo de suelo	55
4.22	Espacios de poros ocupados por agua (%) por tipo de suelo	56
4.23	Contenido y clases de materia orgánica en los suelos	57

4.24	Influencia de la densidad aparente sobre otras propiedades del suelo	59
4.25	Influencia de la materia orgánica sobre otras propiedades de los suelos	60

INDICE DE FIGURAS

Figuras		pagina
2.1	Perfil del suelo y los distintos horizontes que lo conforman	7
2.2	La escalera de participación de Gelfius	23
3.3	Ubicación de la microcuenca la Suiza	25
3.4	Tipo de suelo de la microcuenca la Suiza	27
3.5	Geología de la microcuenca la Suiza	29
3.6	Metodología aplicada en el estudio	31
3.7	Ilustración de los puntos de muestreos según el terreno	34
3.8	Determinación de textura del suelo por el método del tacto	35
4.9	Ubicación de los predios estudiados en la microcuenca la Suiza	42
4.10	Porcentaje de arena, limo y arcilla en los suelos estudiados	43
4.11	Clasificación de los suelos según textura	44
4.12	Profundidad (cm) del horizonte húmico en los suelos estudiados	45
4.13	Mapa de erosión hídrica actual en la microcuenca la Suiza (López <i>et al.</i> , 2012)	47
4.14	Valores de densidad aparente con y sin piedra	48
4.15	Velocidad de infiltración con y sin presencia de piedra en el suelo	51
4.16	Porosidad (%) con y sin presencia de piedra en el suelo	54
4.17	Contenido de agua en volumen (gr/cm ³) en parcelas	56
4.18	Espacio de poros ocupados por agua (%) en parcelas	57
4.19	Pendiente del terreno (%) en parcelas	58
4.20	Relación entre densidad aparente y porosidad del suelo (%)	60

RESUMEN

Palabras claves: suelos, propiedades físicas, cuenca, café, cambio climático.

La baja productividad de 12,000 ha de café que se cultivan dentro de la Reserva de la Biósfera El Triunfo (REBITRI), además de afectar el ingreso de las familias, representa la principal amenaza de cambio de uso de suelo, pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos en el área natural protegida, al incentivar la apertura de nuevas áreas de cultivo para compensar la ineficiencia.

El daño causado por la reciente enfermedad de la roya ha incentivado a los productores a mejorar sus prácticas de cultivo, especialmente la fertilización. En este estudio se analizaron algunas propiedades físicas de los suelos con el propósito de iniciar un programa de conservación que conlleve a mejorar de manera sustentable los niveles de productividad del café.

Los resultados señalan que las parcelas presentan suelos con textura franca ideales para el cultivo de café. El 75% de las parcelas tienen suelos moderadamente profundos con el horizonte húmico mayor a los 30 cm que es la zona con mayor densidad de raíces del café y se detectó que el 25% tienen suelos pocos profundos y erosionados.

El 85.7% tiene densidades aparentes ideales para el crecimiento de las raíces de las plantas en función a la textura. Predominan las clases de infiltración de rápido y muy rápido, el tiempo requerido para la infiltración de un centímetro de agua en los suelos sin piedras es 6.4 veces más que en los suelos con presencia de piedras y estadísticamente significativo.

La totalidad de los casos se ubicaron en las clases de alta y muy alta porosidad con valores por arriba del 50% de porosidad. Se observó un efecto estadístico altamente significativo negativo de la presencia de piedras sobre el contenido de humedad en el suelo, ya que los suelos sin piedra en promedio tuvieron 0.08

gr/cm³ más de agua. La densidad aparente y el % de porosidad fueron las únicas variables que mostraron una alta asociación ($R=0.947$ y $R^2=0.946$) con muy alta significancia estadística. Los contenidos medio y alto de materia orgánica en los suelos, no permitió detectar efecto sobre otras propiedades. Se concluye que los suelos presentan buenas condiciones físicas debido a su origen volcánico, aunque requieren acciones de conservación de suelos y agua por ubicarse en zonas de orografía accidentada.

I. INTRODUCCION

La producción de café en Chiapas, es una de las actividades productivas más importantes en términos económicos, sociales, culturales y ambientales. Participan en ella 83 de los 118 municipios de la entidad con alrededor de 183 mil productores en una superficie de 253,461.6 ha distribuidas en 193 mil predios (AMECAFE, 2010).

Con aproximadamente 12,000 ha el café es la principal actividad económica dentro del polígono de la Reserva de la Biósfera El Triunfo (REBITRI) ubicada en la Sierra Madre de Chiapas, particularmente en los municipios de Ángel Albino Corzo, Montecristo de Guerrero y La Concordia, en donde representa la principal fuente de ingresos de la población y también la principal amenaza de la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos asociados a esta área natural protegida (López *et al.*, 2011).

El café dentro de la REBITRI se cultiva en pequeñas áreas (80 por ciento de los productores tienen superficie menores de 2 ha) con pendientes mayores de 30 grados. Las plantaciones se caracterizan por su edad avanzada, variedades susceptibles a la enfermedad de la roya, pocas prácticas de manejo (sólo control de malezas, poda y desombre), rendimientos bajos y variables con una media de 12 Qq /ha (± 7.7) y totalmente dependientes de la fertilidad natural complementada con la humificación y mineralización de la materia orgánica de la hojarasca proveniente del arbolado.

El 90 por ciento de los productores no tienen la cultura de aplicar nutrientes al suelo y los pocos que fertilizan carecen de sustento técnico para determinar los nutrientes, épocas y las fuentes que deben aplicarlos. Los daños severos de la roya en los últimos 2 años, con pérdidas de hasta 70 por ciento de la producción, han incentivado a los productores a mejorar sus prácticas de manejo, especialmente la fertilización.

Con base a esta demanda el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícola y Pecuaria (INIFAP) en alianza con el Fondo de Conservación El Triunfo y el Grupo Intercomunitario de Acción Territorial de la Microcuenca La suiza, decidieron realizar un diagnóstico integral de los suelos cafetaleros con la participación activa de los productores en todo el proceso.

Debido a la pesada carga de trabajo de campo que representaba la realización del diagnóstico integral y las limitaciones de recursos para realizarlo, el estudio fue dividido en varias fases. El presente trabajo de investigación de tesis es una de las fases de este diagnóstico integral y comprende el estudio de las propiedades físicas de los suelos.

1.1. Justificación

Los efectos del cambio climático (CC) son una realidad en el estado de Chiapas, especialmente en la Sierra Madre. Así lo demuestran los recurrentes desastres por derrumbes e inundaciones y los cambios en los patrones de lluvia, y temperatura. Sus efectos están asociados con la protección civil, la seguridad alimentaria, el suministro de agua, el riesgo de pérdidas en los medios de vida, el desarrollo económico y la oferta de servicios ecosistémicos.

Con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y antropogénicos frente a los efectos del CC, en el año 2010 el INIFAP, el Fondo de Conservación El Triunfo (FONCET), The Nature Conservancy (TNC) y la CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas), unieron esfuerzos para diseñar e implementar una propuesta de adaptación en comunidades de la Sierra Madre de Chiapas.

La microcuenca La Suiza fue seleccionada para la aplicación de la propuesta a manera de ensayo piloto, en la cual el cultivo de café representa entre el 90-100 por ciento de la fuentes de ingresos para las familias.

Los diagnósticos previos realizados por el INIFAP señalan que la mayoría de los productores no fertilizan y desconocen la calidad de los suelos cultivados. Hay evidencias de suelos fuertemente ácidos con pH menores a 5.5 y deterioro por erosión hídrica. Es bastante conocido que un manejo inapropiado de los suelos puede disminuir sus funciones de almacenar nutrientes y de retener agua, y en consecuencia, afectar los niveles de productividad.

Para contribuir a superar la problemática anterior, se plantea el presente estudio con el objetivo de conocer algunas propiedades físicas de los suelos cafetaleros como un insumo importante para generar recomendaciones para incrementar los ingresos a través de un mejor manejo de los suelos.

Cabe señalar que el estudio de los suelos cafetaleros es una demanda planteada dentro de la estrategia del sector cafetalero para la adaptación, mitigación y reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático de la Sierra Madre de Chiapas, propuesto por la alianza entre instituciones, ONG's y productores (Conservación Internacional, 2011).

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Contribuir a mejorar los niveles de productividad y rentabilidad del cultivo de café a través de la realización de un diagnóstico de las propiedades físicas de los suelos con un insumo para mejorar y/o conservar su capacidad productiva.

1.2.2. Específicos

- Determinar la situación en que se encuentran algunas propiedades físicas de los suelos cafetaleros.
- Proponer acciones de mejora a partir de los resultados encontrados

1.3. Hipótesis

Existen diferencias en las propiedades físicas entre los suelos cafetaleros de la microcuenca la Suiza.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. La propuesta integrada de adaptación al cambio climático en la microcuenca la suiza

Los efectos del cambio climático son una realidad en el estado de Chiapas, especialmente en la Sierra Madre, así lo demuestran los recurrentes desastres por derrumbes e inundaciones y los cambios en los patrones de lluvia y temperatura (Schroth *et al.*, 2009). Sus efectos están asociados con la protección civil, la seguridad alimentaria, el suministro de agua, el riesgo de pérdidas en los medios de vida, el desarrollo económico y la oferta de servicios ecosistémicos (López *et al.*, 2011).

Con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y antropogénicos frente a los efectos del cambio climático, en el año 2010, el INIFAP, FONCET, TNC y la CONANP, unieron esfuerzos para diseñar e implementar una propuesta integral de adaptación en comunidades de la Sierra Madre de Chiapas (PIACC), tomando como área piloto de ejecución a la “Microcuenca La Suiza” en el municipio de Montecristo de Guerrero, dentro de la Reserva de la Biósfera El Triunfo.

La propuesta de adaptación incluyó los siguientes componentes (López *et al.*, 2014):

1.- Gestión integrada y sistémica del desarrollo: reconoce que el cambio climático afecta todos los aspectos de la vida humana y que los componentes del desarrollo permanecen en constante interacción en el territorio. En consecuencia, el cambio climático no puede ser abordado con una visión reduccionista con acciones aisladas y dispersas.

2.- Diagnóstico y planificación participativa y territorial: se parte del análisis de las necesidades familiares, los medios de vida y el uso de los recursos naturales. Se utiliza a la cuenca como la unidad de planificación y acción territorial, ya que dentro de ésta, se pueden atender integralmente las áreas agropecuarias, las

fuentes de agua, las áreas naturales protegidas, las viviendas, la infraestructura, las zonas de desastres y las áreas degradadas (López *et al.*, 2013).

El proceso de adaptación al cambio climático se sustenta en el involucramiento de las comunidades en la planeación, seguimiento y evaluación de las acciones, así como, en la organización de la población para lograr la gestión del desarrollo, basada en la acción colectiva, el interés común y la participación organizada.

3.-Mecanismo financiero: reconoce que la adaptación es un proceso gradual de aprendizaje con horizontes de mediano y largo plazos. Considera una iniciativa de financiamiento público-privada para garantizar continuidad a través de los años en un esquema de concurrencia, participación, corresponsabilidad y transparencia en la aplicación de recursos.

Dentro de las líneas estratégicas de trabajo de la propuesta se encuentra el diagnóstico los suelos cafetaleros como un primer insumo para diseñar un programa de nutrición que permita mejorar los niveles de productividad y rentabilidad de este medio de vida.

2.2. Suelo

La función más universalmente reconocida del suelo es su apoyo a la producción alimentaria. Es la base para la agricultura y el medio en el que crecen casi todas las plantas de las que obtenemos alimentos. De hecho, se estima que el 95 por ciento de nuestros alimentos se produce directa o indirectamente en nuestros suelos (FAO, 2015).

Casi todos los suelos se forman a partir de roca (llamada roca madre) que es degradada paulatinamente en partículas cada vez más pequeñas por procesos de intemperismo biológico, químico y físico. Otros factores formadores del suelo

son: el clima, los organismos vivos, el relieve y el tiempo. Su acción determina la dirección, velocidad y duración de los procesos formadores.

La desintegración de la roca sólida en partículas minerales cada vez más finas y la acumulación de materia orgánica en el suelo requieren un tiempo muy largo, por lo común de miles de años. El suelo se forma de manera continua a medida que se va degradando la roca madre. El espesor del suelo varía desde una película delgada hasta más de 3 metros (suelos desarrollados) (Porta *et al* 2003).

El suelo está constituido por capas llamadas horizontes; el arreglo de los horizontes en el suelo se llama perfil edáfico. Los horizontes se definen como una capa de suelo aproximadamente paralela a la superficie, con características producidas por los procesos de formación, la textura, el espesor, el color, la naturaleza química y la sucesión de los diferentes horizontes que caracterizan un suelo y determinan su calidad.

Los niveles que resultan de los procesos de formación de un suelo se clasifican en seis grupos u horizontes principales O, A, E, B, C, R, los horizontes se observan en la figura 2.1. La mayoría de los suelos desarrollados poseen al menos los horizontes A, B, C, otros suelos no tan desarrollados carecen de estos horizontes (Miller, 1994; Jaramillo, 2001 citado en Volke *et al.*, 2005).

Según Benzing (2001), el suelo constituye el fundamento más importante de la producción agropecuaria y en consecuencia de la alimentación humana. En la agricultura moderna se ha impuesto el concepto de suelo como un simple medio de producción, cuya función, en el caso más extremo, se limita a sostener las raíces de las plantas, mientras todo lo demás se añade en forma de sustancias minerales o sintéticas.

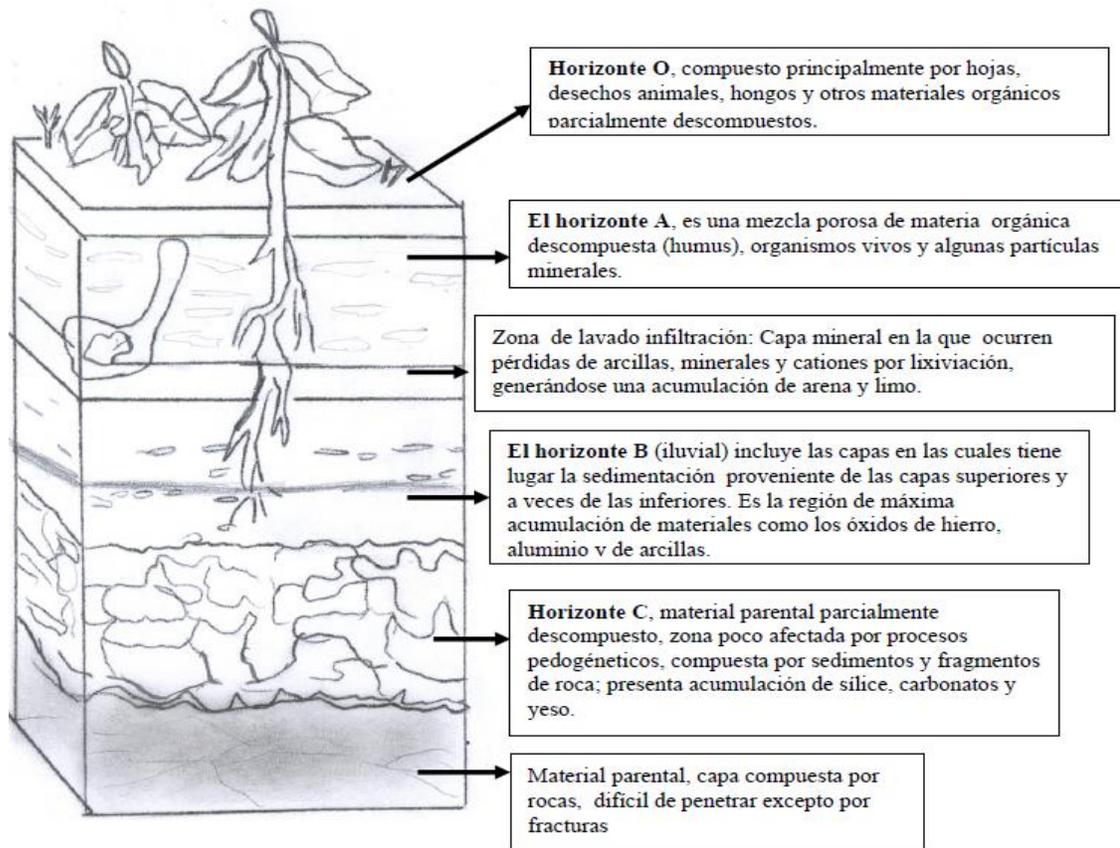


Figura 2.1. Perfil de suelo y los distintos horizontes que lo conforman. Modificado de enciclopedia en carta 2009 (Fuente: www.microsoft.com/spain/encarta).

Para Geissert, *et al.* (2013), el suelo es un recurso natural vivo que cumple funciones y brinda servicios ambientales específicos como:

- a) Proveedor de nutrientes para la vida biológica;
- b) Es un medio de filtrado, almacenamiento y suministro de agua;
- c) Es un sitio de secuestro y captura de carbono;
- d) Es un proveedor de oxígeno para la respiración de las raíces y;
- e) Es un sustrato de soporte mecánico y de anclaje para las plantas así como hogar de muchos organismos.

Cuando el suelo es capaz de cumplir estas funciones y brindar estos servicios, se le considera saludable y de buena calidad.

Según FAO (2015), la calidad del suelo es variable y los suelos responden de forma distinta conforme las prácticas implementadas sobre él. Se incluyen los elementos de la calidad del suelo; las propiedades físicas, químicas y biológicas inherentes y dinámicas.

La calidad del suelo se define como “la capacidad del suelo de funcionar, dentro de las fronteras del ecosistema y el uso de la tierra, manteniendo la calidad ambiental y fomentando de plantas, los animales y el ser humano”. Los suelos sanos suministran los nutrientes esenciales, agua, oxígeno y el soporte para las raíces que nuestras plantas productoras de alimentos necesitan para crecer y prosperar. Los suelos también sirven como protección para las delicadas raíces de las plantas frente a las fuertes fluctuaciones de temperatura.

La salud del suelo se ha definido como su capacidad para funcionar como un sistema vivo.

Los suelos sanos mantienen una comunidad variada de organismos del suelo que ayudan a controlar las enfermedades de las plantas, insectos y malezas, forman asociaciones simbióticas beneficiosas con las raíces, reciclan nutrientes esenciales para las plantas, mejoran la estructura del suelo con efectos positivos para el agua del suelo y la capacidad de retención de nutrientes, y en última instancia mejoran la producción agrícola. Un suelo sano también contribuye a la mitigación del cambio climático, manteniendo o aumentando su contenido de carbono. (FAO (2015).

2.3. Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades físicas de un suelo tienen mucho que ver con la capacidad que el hombre les da para muchos usos. Las características físicas de un suelo en condiciones húmedas nos muestra la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la retención de nutrimentos de las plantas, etc., están íntimamente conectados con la condición física del suelo (Porta et al., 2003).

De acuerdo a Valencia (1997), el suelo adecuado para cualquier cultivo debe permitir aireación y retención de humedad, indispensables para el desarrollo de un buen sistema de raíces. Se requiere aireación para que la raíz pueda respirar y se requiere humedad para que los nutrientes se disuelvan en el agua y puedan ser absorbidos por las raíces para luego ser transportados a todas las partes de las plantas.

Un buen sistema de raíces permite a la planta explorar suficiente volumen de suelo para obtener agua y nutrientes, lo que se traduce en buen desarrollo vegetativo y buena producción. Para este autor un suelo físicamente ideal (suelo productivo) es aquel que tiene de su volumen total alrededor de 50 por ciento de espacios porosos y éstos están ocupados mitad por aire y mitad por agua.

El otros 50 por ciento lo constituyen los sólidos, entre los que debe haber un 8 por ciento de materia orgánica. Las características físicas más relevantes en los suelos cafetaleros son: textura, estructura, consistencia, densidad real y aparente, retención de humedad, estabilidad de los agregados y profundidad efectiva (Valencia, 1998).

Este conjunto de condiciones físicas de muy difícil y costosa modificación, determinan la productividad del cultivo, la susceptibilidad del suelo a la erosión y las normas de manejo del suelo y del cultivo. Después de las condiciones del clima, las condiciones físicas son las que determinan el uso y manejo del suelo.

Una combinación de adecuadas condiciones físicas se refleja en una buena aireación, rápido drenaje interno, adecuada capacidad de retención de agua, desarrollo normal de raíces, dinámica actividad biológica y buena y oportuna respuesta a la fertilización (FAO 2015).

2.4. Profundidad del suelo

La definición original del suelo se denominaba como la capa superficial del suelo junto con el subsuelo. El horizonte C se definía como estratos con poca formación edafogénica. De este modo la profundidad efectiva del suelo fue considerada como la espesura del suelo. Sin embargo, la presencia de raíces y la actividad biológica que frecuenta a menudo el horizonte C realza la importancia de incluir este horizonte en la definición de profundidad del suelo.

En la práctica los estudios con levantamiento de suelos utilizan límites de profundidad arbitrarios de hasta 200 cm (FAO, 2015).

La profundidad del horizonte superior es importante para el almacenamiento del agua y la provisión de nutrientes para el crecimiento de las plantas. Generalmente, la remoción del horizonte superficial determina pérdida de fertilidad, de capacidad de retención de agua, de contenido de carbono orgánico y de productividad (USDA, 1999).

Mediciones de la profundidad del horizonte superficial a lo largo del tiempo brindan buena estimación de la pérdida del suelo por erosión (Madison, 1982).

Cambios en el espesor del horizonte superior son usualmente el resultado de erosión por viento, erosión por agua, deposición de material, o nivelación del terreno. Los suelos erosionados comúnmente presentan un horizonte Ap (capa arable) o un horizonte superior rebajados.

Erosión natural ocurre en la ausencia de distribuciones antrópicas. Sin embargo, es la erosión acelerada, causada por las aradas, quemazones, sobrepastoreo y otras prácticas de manejo, las que remueven la cubierta vegetal protectora y determina la pérdida de calidad del suelo (Arshad, Et al., 1996).

La profundidad efectiva de un suelo para café es de 120 cm, con textura media a arcillosa, que no tengan más desde un 15 por ciento de piedras y posean

una estructura granular o semi granular, con media a buena estabilidad en agua de agregados. Por estar desprovista de pelos radicales, la raíz del café es extremadamente exigente en la buena aireación del suelo, de su textura, estructura y la cantidad y relación entre los macro y micro poros (Kupper, 1981).

Se acepta en forma muy general que la mayor densidad de raíces absorbentes del cafeto, cerca del 90 por ciento del total, se presentan en los primeros 30 cm de profundidad del suelo.

Para Geissert, *et al.* (2013), la profundidad biológica de un suelo corresponde al espesor del suelo donde las raíces pueden desarrollarse libremente. Para el café es muy importante el grosor disponible encima de una capa dura, de un nivel freático o una roca. El suelo debe tener una profundidad de por lo menos 2.0 metros para asegurar un buen desarrollo de las raíces verticales y un suministro suficiente de agua durante la época seca. Según estos autores, las raíces del cafeto pueden penetrar hasta una profundidad de 3 metros, pero la mayor parte del sistema radicular se desarrolla en los primeros 30 centímetros de profundidad.

2.5. Textura

La textura es una propiedad importante ya que influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades (FAO, 2015).

La textura de un suelo está determinada por las cantidades de partículas minerales inorgánicas (medidas como porcentajes en peso) de diferentes tamaños (arena, limo y arcilla) que contiene.

La proporción y magnitud de muchas reacciones físicas, químicas y biológicas en los suelos están gobernadas por la textura, debido a que ésta determina el tamaño de la superficie sobre la cual ocurren las reacciones, además de la plasticidad, la permeabilidad, la facilidad para trabajar la tierra, la sequedad, la fertilidad y la productividad que varían dependiendo de la región geográfica.

Las partículas de arena son comparativamente de tamaño grande (0.05-2mm) y, por lo tanto, exponen una superficie pequeña comparada con la expuesta

por un peso igual de partículas de arcilla o de limo. La función que ésta tiene en las actividades físicas y químicas de un suelo es casi insignificante, las arenas aumentan el tamaño de los espacios de los poros entre las partículas, facilitando el movimiento del aire y del agua de drenaje.

El tamaño de partícula de los limos va de 0.002 a 0.05mm, tiene una velocidad de intemperización más rápida y una liberación de nutrimentos solubles para el crecimiento vegetal mayor que la arena.

Los suelos limosos tienen gran capacidad para retener agua disponible para el crecimiento vegetal. Las partículas de limo se sienten suaves, semejantes a un polvo y tienen poca tendencia a reunirse o a adherirse a otras partículas (Buckman y Brady, 1966).

El tamaño de partícula de los suelos arcillosos es menor a 0.002mm; tienen la capacidad de retener agua contra la fuerza de gravedad. La fracción de arcilla, en la mayoría de los suelos, está compuesta de minerales que difieren grandemente en composición y propiedades en comparación con la arena y el limo.

El componente arcilloso de un suelo es fundamental para determinar muchas características de éste, debido a que las partículas de arcilla tienen un área superficial mayor. Cada partícula de arcilla tiene cargas eléctricas negativas en su superficie externa que atraen y retienen cationes de manera reversible. Muchos cationes como potasio (K^+) y magnesio (Mg), son esenciales para el crecimiento vegetal y son retenidos en el suelo por las partículas de arcilla.

Cuando la arena, limo y arcilla se encuentran en proporciones iguales el suelo se denomina Franco (Quijano, 2008). Los suelos arenosos tienen un drenaje excesivo y retienen poca agua. Por el contrario, los suelos arcillosos tienen un drenaje lento (se encharcan fácilmente), pero su capacidad de almacenamiento de agua es importante. Los suelos de textura intermedia como los francos y los franco-arcillosos, proveen las mejores condiciones de drenaje y de provisión de agua.

De acuerdo a Geissert, Et al. (2013), el café prospera en suelos con textura intermedia franca, franca-arcillosa, arcillo-limosa y arcillosa (sin rebasar 70 por ciento de arcilla), siempre que estén bien drenados. No se recomienda cultivar café en suelos con más de 40 por ciento de arena, ya son muy filtrantes y retienen poca agua.

2.6. Densidad aparente

USDA (1999), define la densidad aparente del suelo como la relación entre la masa del suelo secado en horno y el volumen global, que incluye el volumen de las partículas y el espacio poroso entre las partículas. Es dependiente de las densidades de las partículas del suelo (arena, limo, arcilla y materia orgánica) y de su tipo de empaquetamiento.

Las densidades de las partículas minerales usualmente se encuentran en el rango de entre 2.5 a 2.8 g/cm³, mientras que las partículas orgánicas presentan usualmente menos que 1.0 g/cm³.

La densidad aparente es una propiedad dinámica que varía con la condición estructural del suelo. Esta condición puede ser alterada por prácticas de cultivo, pisoteo de animales, maquinaria agrícola y clima, por ejemplo por impacto de las gotas de lluvia. Estratos compactados del suelo tienen altas densidades aparentes, restringen el crecimiento de las raíces, e inhiben el movimiento del aire y el agua a través del suelo.

La densidad aparente, es la medida en peso del suelo por unidad de volumen (g/cc), se analiza con suelos secados al aire o secados en la estufa a 110°C. La densidad aparente está relacionada con el peso específico de las partículas minerales y las partículas orgánicas así como por la porosidad de los suelos.

Si se considera cierto volumen de suelo en sus condiciones naturales, es evidente que solo cierta proporción de dicho volumen está ocupada por el material del suelo (Aguilera, 1989). El resto lo constituyen espacios intersticiales que, en

condiciones ordinarias de campo, están ocupados en parte por agua y en parte por aire. El peso de la unidad de volumen de suelo con espacios intersticiales es lo que da la densidad aparente (Wooding, 1967).

Casi todos los suelos minerales tienen una densidad aparente que varía de 0.4 a 2.0 g/cc. La densidad aparente es importante para estudios cuantitativos de suelo. Los resultados de las densidades aparentes son fundamentales para calcular los movimientos de humedad, los grados de formación de arcilla y la acumulación de los carbonatos en los perfiles de suelo.

Los suelos orgánicos tienen muy baja densidad aparente en comparación con los suelos minerales (Aguilera, 1989).

La medida de la densidad aparente debe ser realizada en la superficie del suelo y/o en una zona compactada (piso de arado, etc.), si es que está presente. Mida la densidad aparente cerca (entre 3,28 y 6,56 cm) del sitio de los ensayos de respiración e infiltración. Para obtener una medida más representativa de la densidad aparente del área, se pueden tomar muestras adicionales.

La densidad aparente del suelo puede servir como un indicador de la compactación y de las restricciones al crecimiento de las raíces. Típicas densidades aparentes del suelo fluctúan entre 1.0 y 1.7 g/cm³ y generalmente aumentan con la profundidad en el perfil (Arshad et al., 1996). En suelos que contienen altas proporciones de arcillas expandibles las densidades aparentes varían con el contenido del agua, el cual debería ser medido al momento del muestreo

2.7. Porosidad

El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por 50 por ciento materiales sólidos (45 por ciento minerales y 5 por ciento materia orgánica) y 50 por ciento de espacio poroso (FAO, 2015). Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macro poros y micro poros donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macro poros no retienen agua contra

la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces. Los micro poros retienen agua y parte de la cual es disponible para las plantas.

Los espacios o poros que hay entre partículas sólidas (orgánicas e inorgánicas) del suelo, contienen diversas cantidades de dos componentes inorgánicos clave: el agua y el aire.

El agua es el principal componente líquido de los suelos y contiene sustancias minerales, oxígeno (O_2) y bióxido de carbono (CO_2) en disolución, mientras que la fase gaseosa en los suelos está constituida por aire. Dependiendo del contenido de humedad del suelo, los poros se encuentran ocupados por agua o por aire (Aguilera, 1989).

Para Benzing (2001), la dinámica del agua en el suelo depende sobre todo del volumen total de poros y el diámetro de estos. El agua en poros muy pequeños es retenida con muchas fuerzas y por el contrario el agua de los poros pequeños y medianos si puede ser absorbida por las plantas, mientras los poros grandes sirven sobre todo para la conducción.

2.8. Infiltración

Infiltración es el proceso de penetración del agua en el suelo (USDA; 1999). La velocidad de infiltración es una medida de cuán rápidamente el agua penetra en el suelo. El agua que penetra demasiado lentamente puede provocar anegamiento en terrenos planos o erosión por escurrimiento en campos en pendiente.

La velocidad a la cual el agua entra en el suelo es la velocidad de infiltración, la que depende del tipo de suelo; de la estructura del suelo, o grado de agregación; y del contenido de agua en el suelo (Lewery et al., 1996).

El contenido inicial de agua en el suelo, al momento de la medición, afecta la capacidad del suelo de absorber agua adicional. Por esto la velocidad de infiltración es mayor cuando el suelo está seco que cuando está húmedo. Este factor es importante al comparar mediciones de infiltración de suelos diferentes.

Los suelos deberían tener un contenido de humedad similar cuando se realizan las mediciones. La labranza afecta la velocidad de infiltración. Inmediatamente después de la labranza puede manifestarse una mejor infiltración, debido al aflojamiento de costras superficiales o de zonas compactadas. La labranza afloja el suelo.

Sin embargo, la labranza a su vez rompe agregados y deteriora la estructura del suelo creando el potencial para el desarrollo de compactación, encostramiento superficial y pérdida de poros continuos conectados con la superficie. Suelos compactados poseen menos espacio poroso, lo que determina menores velocidades de infiltración. Suelos que tienden a formar costras superficiales, que sellan la superficie del suelo, pueden presentar velocidades de infiltración severamente aminoradas.

De acuerdo a Geissert, Et al. (2013), el drenaje se refiere al agua que filtra a través del suelo después de una lluvia. El agua que se queda retenida después de dos a tres días de drenaje es llamada humedad o capacidad de campo. Después de este lapso, el suelo empieza a perder agua por evaporación, absorción de las raíces y transpiración de las hojas, y si no recibe más agua de lluvia, alcanza un punto de humedad en el cual la planta ya no puede extraer agua y se marchita sin poder recuperarse, llamado punto de marchitez permanente.

2.9. Pendiente

La pendiente del terreno es un componente dentro de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. En términos simples, el grado de inclinación de entrega el componente de gravedad necesario para comenzar el movimiento del flujo concentrado y otorgarle velocidad, mientras que la longitud de la pendiente es un factor que condiciona el volumen de agua que fluye en una ladera determinada (Mancilla, 2008).

Según PASOLAC (2000), la pendiente caracteriza la desviación de la inclinación de la ladera de la horizontal en porcentaje (por ciento) o en grados (°). La pendiente influye en las tasas de erosión de los suelos, y en consecuencia, en

la efectividad de las prácticas de conservación de suelos y agua y en la construcción misma de las prácticas.

Desde el punto de vista técnico-científico, laderas con más del 50 por ciento de pendiente son exclusivamente de vocación forestal. En general la distancia entre las prácticas de conservación está en función de la pendiente. En suelos planos las distancias son mayores y en terrenos inclinados menores.

2.10. Humedad del suelo

El contenido de agua en el suelo tiene un efecto principal sobre la disponibilidad de agua para el crecimiento vegetal. El agua tiene cuatro funciones fundamentales en las plantas (Cisneros, 2003):

- a) Es el mayor constituyente del protoplasma (85 a 95 por ciento)
- b) Es esencial para la fotosíntesis y la conversión de almidones en azúcar
- c) Es el solvente en el cual los nutrientes se mueven en y a través de las partes de la planta y;
- d) Provee de turgidez a la planta para mantenerla en la forma y posición apropiada.

La mayor parte del agua absorbida por las plantas se da a nivel de raíces aunque puede también hacerlo a través de las estomas en mínima proporción.

Para un uso óptimo del agua es necesario conocer cómo se encuentra en y a través del suelo, cómo el suelo almacena agua, cómo la planta lo absorbe, cómo se pierden los nutrientes del suelo por percolación y cómo medir el contenido de humedad y pérdidas de agua.

Existen fuerzas de atracción entre los átomos de hidrógeno del agua y los átomos de oxígeno de las superficies minerales del suelo o de otras moléculas de agua, mantienen agua en el suelo en contra de la fuerza de gravedad.

Esta atracción de los átomos de hidrógeno del agua por los átomos de oxígeno de minerales se conoce como adhesión; la fuerza de atracción de los átomos de hidrógeno del agua por los átomos de oxígeno de otras moléculas de agua se le llama cohesión. Estas fuerzas combinadas se presentan en gran

cantidad, provocando que películas de agua de considerable espesor sean mantenidas en la superficie de las partículas del suelo.

Como las fuerzas que retienen el agua en el suelo son fuerzas de atracción superficial, entre más superficie (más arcilla y materia orgánica) tenga un suelo, mayor es la cantidad retenida de agua.

Los espacios entre las partículas del suelo forman una red de cavidades conectadas entre sí, de una variedad infinita de formas y dimensiones. Al suministrar agua en un suelo seco, ya sea por lluvia o por riego, ésta se distribuye alrededor de las partículas y es retenida por las fuerzas de adhesión y de cohesión; desplaza el aire de las cavidades y finalmente, llena los poros.

Cuando los poros quedan llenos de agua se dice que el terreno está saturado y a su máxima capacidad de retención, debido a esto la película de agua alrededor de las partículas aumenta de espesor hasta que, las fuerzas de cohesión, que sostienen las películas de agua son menores que la fuerza de gravedad, provocando así su filtración. Esta agua que se filtra por acción de la gravedad y que drena libremente se conoce como agua gravitacional o libre.

Si se suspende el suministro de agua en la superficie, ésta continúa colocándose entre dichos poros durante varios días hasta que el agua libre logra filtrarse. Los poros se vuelven a llenar de aire y el agua contenida en los pequeños poros sigue moviéndose por capilaridad, a este tipo de agua se le conoce como agua capilar.

La evaporación en la superficie y la absorción de humedad por las plantas en crecimiento, reducen la cantidad de agua en el suelo hasta el punto que no se observa movimiento de capilaridad. El agua queda aprisionada herméticamente en forma de capas muy delgadas alrededor de las partículas del suelo; no puede ser aprovechada por la planta y empieza a marchitarse. Finalmente, el suelo queda tan seco que causa la muerte de la planta si se demora el suministro de agua al terreno.

La parte restante del agua queda retenida entre las partículas superficiales, especialmente en los coloides del suelo, en forma tal que pierde su estado líquido y se desplaza en forma de vapor. A esta agua se le denomina agua higróscopica.

En realidad no existe una línea divisoria bien definida entre estos tipos de agua en el suelo. La forma y proporción en que se encuentran los tipos de agua depende de la textura, estructura, porosidad, materia orgánica, temperatura, profundidad del suelo, etc.

En general podemos resumir y englobar en términos de disponibilidad los tipos de agua presentes en el suelo en (Cisneros, 2003):

♦ Agua gravitacional. Agua que drena por acción de la gravedad; este drenaje es más rápido en suelos arenosos que en los arcillosos. Esta agua sólo está disponible en mínima proporción en la zona de raíces cuando se mantiene una aireación adecuada y/o cuando deja de ser gravitacional para pasar a ser aprovechable.

♦ Punto de marchitez permanente (P.M.P.). Es el porcentaje de humedad retenida a una tensión aproximada de 15 atm en la cual las plantas no pueden reponer el agua suficiente para recobrar su turgencia y la planta se marchita permanentemente. También el P.M.P. depende de la especie vegetal, de la cantidad de agua utilizada por los cultivos, profundidad de raíces, de la capacidad de retención del suelo, etc.

En términos de tipo de agua el P.M.P. representa al agua no disponible, es decir, agua que se encuentra fuertemente retenida por diferentes fuerzas y que a las plantas se les dificulta su aprovechamiento.

♦ Capacidad de campo (C.C.). Es el porcentaje de humedad que es retenida a una tensión de $1/3$ de atm aproximadamente y es la medida de mayor cantidad de agua que un suelo retendrá o almacenará bajo condiciones de completa humedad, después de haber drenado libremente. Aunque depende del tipo de suelo, después de la saturación, el drenado libre dura aproximadamente entre uno a tres días.

♦ Agua disponible o humedad aprovechable (H.A.). Es el agua que puede ser aprovechada por la planta y se define como la diferencia entre la humedad a capacidad de campo (retenida a una fuerza de 1/3 de atm) y el punto de marchitamiento permanente (humedad retenida a una fuerza de 15 atm aproximadamente).

Cabe resaltar, que el contenido de humedad está muy ligado al tipo de textura del suelo y al contenido de materia orgánica: en suelos con alto contenido de arcilla y de materia orgánica aumenta la retención total de agua, aunque también origina grandes cantidades de agua estrechamente retenidas por adhesión, en suelos de textura media tales como los francos pueden retener grandes cantidades de agua disponible, en estos el agua es retenida más suavemente, en suelos arenosos se retiene muy poca agua total y menos la cantidad de agua disponible.

El contenido de humedad de un suelo puede ser medido por varios métodos entre los que destacan los (Cisneros, 2003):

- a) Métodos directos: Son métodos de campo y/o laboratorio con muestreo y/o secado. Su exactitud depende de la experiencia y habilidad por parte de quien los realiza. Ellos son: método al tacto y método gravimétrico.
- b) Métodos indirectos: son métodos basados en dispositivos utilizados en campo que se han ido perfeccionando e innovando tratando con ello de ser más precisos y de fácil operación. Estos son: tensiómetro, bloques de yeso, aspersor de neutrones, medidor rápido de humedad "Speedy", medidor Watermark, medidor Aquater y termómetro infrarrojo.

2.11. Materia orgánica

La materia orgánica del suelo está constituida por los compuestos de origen biológico y el humus por restos postmortales vegetales y animales que se encuentran en el suelo y que están sometidos a procesos de descomposición, transformación (Fassbender y Bornemiza, 1987).

Benzing 2001, señala que la materia orgánica influye en todos los demás aspectos del suelo: en su estructura, en su capacidad de retener agua, en su aireación, el contenido y disponibilidad de nutrientes, el pH, la CIC, y a largo plazo incluso en la textura.

La mayoría de los suelos agrícolas contienen entre 0.5 y 3 por ciento de materia orgánica, pero el porcentaje en suelos de origen volcánico es muchas veces más alto al igual que en suelos orgánicos.

En cuanto a los beneficios de la materia orgánica sobre la estructura y propiedades físicas de los suelos, se mencionan los siguientes:

- a) En suelos arcillosos, la materia orgánica incrementa la aireación, permite un mejor desarrollo de raíces y facilita la labranza.
- b) Aumenta la infiltración y la capacidad de retención de agua. Lo primero especialmente importante en suelos arcillosos, lo segundo en suelos arenosos.
- c) La estabilización de los agregados del suelo previene la erosión, el sellado superficial y la compactación.
- d) El color oscuro de la materia orgánica absorbe la radiación solar y acelera el calentamiento del suelo.

El procedimiento recomendado en México para la determinación de la materia orgánica del suelo es el AS-07, de Walkley y Black, basado en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado (Diario Oficial, 2002).

2.12. Metodologías participativas

Últimamente se ha escrito mucho sobre la participación de las comunidades en los proyectos y en el desarrollo rural, debido a los pocos o nulos impactos de la mayoría de los proyectos de desarrollo que quedan muy lejos de sus metas iniciales, por falta de participación real de la población para quien va dirigido el proyecto.

Para Alberich (2006), es un método de estudio y acción de tipo cualitativo que busca obtener resultados fiables y útiles para mejorar situaciones colectivas, basando la investigación en la participación de los propios colectivos a investigar.

Así, se trata de que los grupos de población o colectivos a investigar pasen de ser “objeto” de estudio a “sujeto” protagonista de la investigación, controlando e interactuando a lo largo del proceso investigador (diseño, fases, evolución, acciones, propuestas,...), y necesitando una implicación y convivencia del personal técnico investigador en la comunidad a estudiar.

Para Colmenares (2012), la investigación-acción participativa o investigación-acción es una metodología que presenta unas características particulares que la distinguen de otras opciones bajo el enfoque cualitativo; entre ellas podemos señalar la manera como se aborda el objeto de estudio, las intencionalidades o propósitos, el accionar de los actores sociales involucrados en la investigación, los diversos procedimientos que se desarrollan y los logros que se alcanzan.

De acuerdo a Geilfus (1997), la participación no es un estado fijo, sino un proceso mediante el cual la gente puede ganar más o menos grados de participación en el proceso de desarrollo, mediante un proceso gradual que parte de una pasividad casi completa (ser beneficiario) al control de su propio proceso (ser actor del auto-desarrollo).

Para entender este proceso el autor se apoya en la llamada “escalera de la participación que se muestra en la figura 2.2.

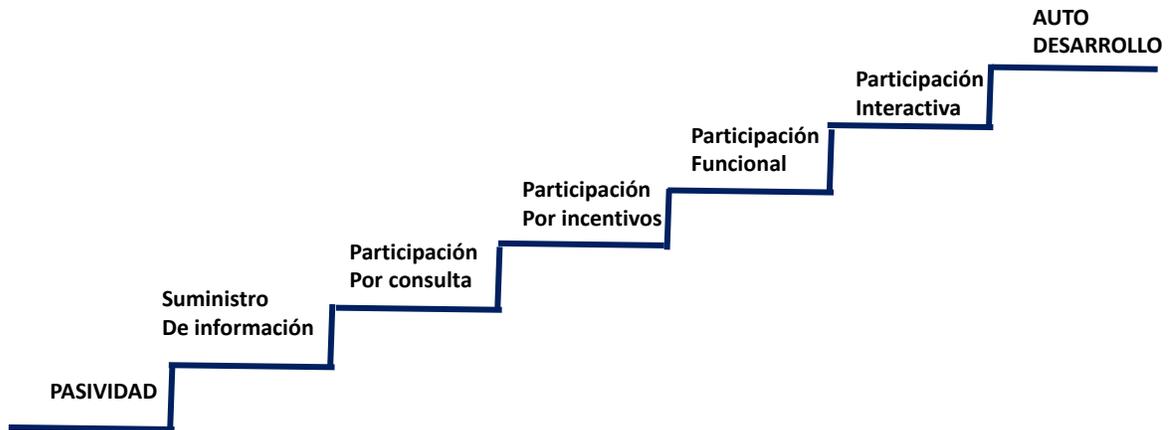


Figura 2.2. La escalera de participación de Gelfius

Se aprecia que lo que determina realmente la participación de la gente, es el grado de precisión que tienen en el proceso, lo cual es válido tanto en las relaciones entre los miembros de la comunidad y la institución de desarrollo, como dentro de las organizaciones comunitarias.

Debido a lo avanzado en que se encuentra la implementación del proyecto “Propuesta integrada de adaptación al cambio climático en la microcuenca la Suiza” el diagnóstico de las propiedades físicas de los suelos se llevó a cabo con una participación interactiva de los productores, que corresponde a la penúltima fase de la escalera de participación.

La población local organizada participó en la formulación, implementación y evaluación de los resultados del estudio de los suelos, lo cual implicó un proceso de enseñanza-aprendizaje sistemático y estructurado, y la toma de control en forma progresiva del proyecto en su conjunto.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Descripción física de la zona de estudio

3.1.1. Localización

La investigación se realizó en la microcuenca “La Suiza” localizada en los Municipios de Montecristo de Guerrero y Mapastepec del Estado de Chiapas México, entre las coordenadas 15° 36´ 0” y 15° 41´ 0” de Longitud Oeste y 92° 44´ 0” y 92° 41´ 0” de Latitud Norte (figura 3.3). Posee una superficie total de 6,437.1 ha, (López, et al., 2012) y se ubica en el parte aguas de la Sierra Madre de Chiapas. El 85.32 por ciento (5190.02 ha) de su territorio se ubica dentro del polígono de la (REBITRI) y se encuentra poblada con aproximadamente 1,300 habitantes, distribuidos en Ejidos y Propiedades privadas.

3.1.2. Clima

En la microcuenca La Suiza predominan los climas templado húmedo con abundantes lluvias en verano –C(m)(w) y semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano A(e)gw (Palacios, 2012). La temperatura promedio anual es de 18 a 22 °C en la parte baja y de 12 a 18 °C en la parte alta.

Dentro de la microcuenca La Suiza no se ubica ninguna estación climatológica por lo que se tomaron como referente los datos de precipitación de la estación Cuxtepeques que es la más cercana el área de estudio. En el cuadro 3.1, se presenta un análisis de los datos registrados durante el período 1961-2000 para algunas variables climáticas (Serrano *et al.*, 2006).

Se observa un valor de 2,041 mm de precipitación promedio anual, teniendo un máximo durante septiembre con 444.9 mm precipitados y 24.1 días con lluvia, la temperatura promedio registra un máximo en mayo de 23.9 °C y la evaporación máxima de registra en abril con 140.6 mm.

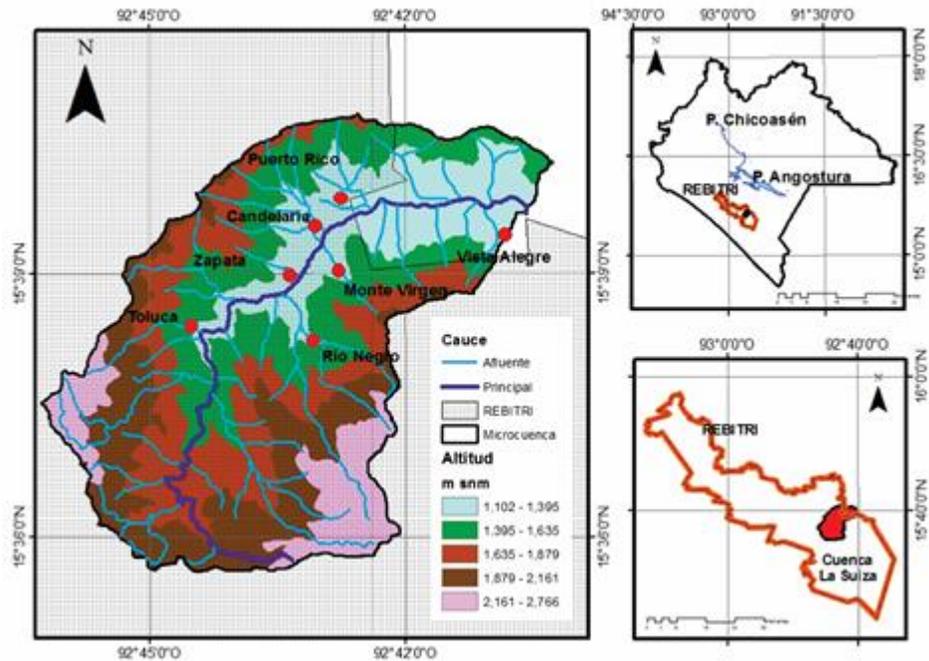


Figura 3.3. Ubicación de la microcuenca La Suiza

Cuadro 3.1. Variables climatológicas de la estación Cuxtepeques

Mes	Temperatura media (°C)	Precipitación (mm)	Número de días con lluvia	Evaporación (mm)
Ene	19.3	5.3	1.6	83.1
Feb	20.3	14.6	1.7	91.3
Mar	21.9	11	1.4	131.1
Abr	23.6	40	3.8	140.6
May	23.9	151.7	12	125.3
Jun	23	379.9	22	103.9
Jul	22.6	350.6	21.7	102.6
Ago	22.7	367	22.6	99.4
Sep	22.3	444.9	24.1	87.7
Oct	21.6	211.8	15.5	78.7
Nov	20.7	54.4	5.6	71
Dic	19.1	10.6	2	61.2
Media	21.75	2041.8	134	1175.9

3.1.3. Fisiografía y topografía

La microcuenca La Suiza se extiende sobre el parte aguas formado por la Sierra Madre de Chiapas ubicado en la provincia fisiográfica Tierras Altas de Chiapas-Guatemala, específicamente en la subprovincia Sierra de Chiapas (Mülleried, 1982).

Esta zona se caracteriza por crestas alargadas por arriba de los 2,000 msnm, macizos montañosos de fuertes pendientes entre los 1,000 a 2,000 msnm y laderas con pendientes moderadas a fuertes por debajo de los 1,000 msnm. El cerro El Triunfo es una de las mayores altitudes en la REBITRI.

Se encuentra en un rango altitudinal de los 1,102 a 2,766 msnm, con base en el Modelo Digital de Elevación distribuido por INEGI.

Estas características topográficas y fisiográficas definen gran parte del comportamiento hidrológico de la cuenca, es decir, por efecto de la pendiente existe una mayor densidad de cauces de primer orden en la parte alta de la cuenca, las cuales a su vez, tienden a ser corrientes violentas y por lo tanto a ejercer un mayor desgaste sobre las paredes del cauce.

Así mismo cuando se tiene una densidad considerable de cauces de primer orden pero una baja cobertura de vegetación los tiempos de concentración son bajos y ello influye en la capacidad de desfogue de la microcuenca.

La topografía también tiene efecto en las variables climáticas, principalmente en la temperatura, tanto del agua como del aire.

3.1.4. Edafología

De acuerdo a la información edafológica de la serie II, 1:250,000 de INEGI (2006), en la figura 3.3 y cuadro 3.4, se presentan las principales formaciones de suelo, las cuales corresponden a los cambisoles y leptosoles con distintos tipos.

Cuadro 3.2. Unidades edafológicas de la microcuenca La Suiza

Clave WRB	Nombre	Textura	Superficie	
			Ha	%
CMcrdy+CMdy+ACha/2	Cambisol crómico	Media	93.76	1.58
CMeucr+LVcr/2R	Cambisol eútrico+luvisol vértico	Media	189.11	3.18
LPdy+CMcrdy+ACcr/2	Leptosol dístico+ cambisol crómico	Media	3288.12	55.30
LPdyh+RGdy+CMcrdy/2	Leptosol dístico+regosol+cambisol	Media	1186.06	19.95
LPdyhu+RGdylep/2	Leptosol dístico+ regosol	Media	1174.00	19.75
LPdyli+RGdylep/2	Leptosol dístico+ regosol	Media	14.60	0.25

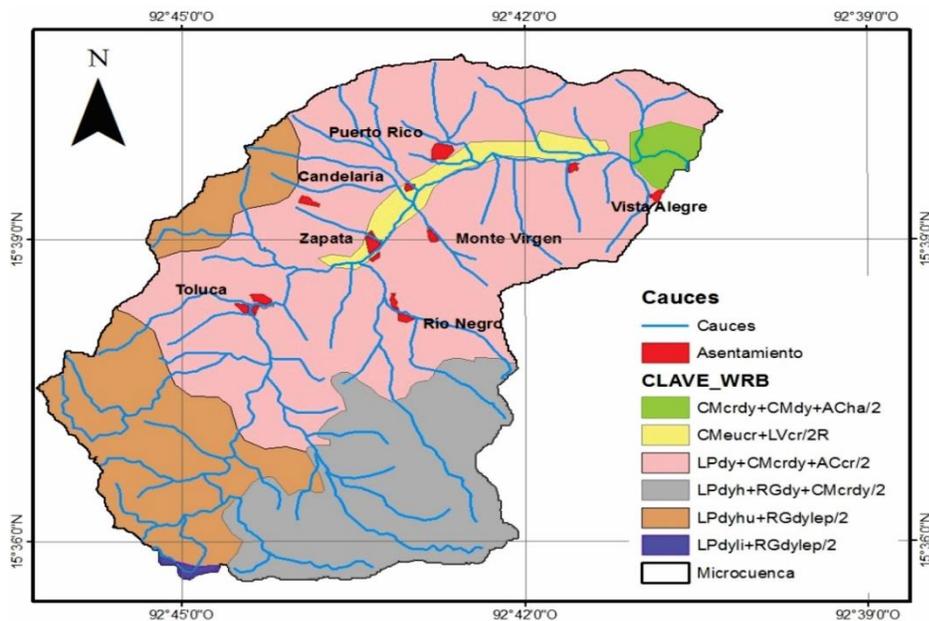


Figura 3.4. Tipos de suelo de la microcuenca la suiza.

El cambisol es una formación donde se distinguen notablemente los horizontes del perfil, ya que son suelos jóvenes con poco desarrollo. El horizonte B presenta una moderada alteración al material original, es decir, existen bajas concentraciones de materia orgánica, hierro y aluminio. Son suelos de bajo espesor, pedregosos y con bajo contenido en bases (FAO, 2014).

En general son suelos con media a baja fertilidad que al perder la cubierta vegetal son muy susceptibles a la erosión (CentroGEO, 2014). Los cambisoles eútricos se distinguen por su capacidad de saturación en bases que puede ir del 50 por ciento al 80 por ciento en los primeros 50 cm a un metro de profundidad del suelo, de todos los cambisoles es el que presenta mayores concentraciones de nutrientes (Bojórquez *et al.*, 2007; FAO, 2002).

La principal características de los cambisoles crómicos es su color rojo a pardo en el horizonte B cuando se encuentra húmedo, está asociado a zonas pedregosas (INEGI, 2009; FAO, 2014).

Por su parte, los leptosoles son suelos delgados limitados por roca dura; generalmente no existe horizonte B. Tienen baja capacidad de retención de agua y nutrientes, sus coloraciones son pardas a pardas amarillentas.

Son comunes en zonas de topografía accidentada con alta susceptibilidad a la erosión (FAO, 2014). El término dítrico significa enfermo o infértil y proviene del griego “dy”, por lo que al ser suelos tan delgados son poco atractivos para cultivos y se recomienda mantenerlos bajo bosque. Los leptosoles dítricos presentan una saturación en bases menor al 50 por ciento en los primeros 5 cm (Luege, 2005; Doran, 1996).

3.1.5. Geología

La historia geológica de Chiapas ha evolucionado a partir del Ordovícico-Silúrico (Paleozoico) hasta el Holoceno (figura 3.5). La zona de la microcuenca La Suiza corresponde al Batolito de Chiapas con rocas graníticas con metamorfismo y anortositas escasas (Castro-Mora, 1999) además, en la porción noreste y sureste del polígono I El Triunfo, predominan las calizas-areniscas del Paleozoico Superior (INE & SEMARNAP, 1999).

Conforme a la información del INEGI, la formación geológica dominante es el granito (INEGI, 2005) (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Unidades geológicas de la micro cuenca La Suiza

Clase	Tipo	Área (Ha)	% de representación
Ígnea intrusiva	Granito	2848.78	47.91
Sedimentaria	Caliza-Arenisca	2577.63	43.35
Ígnea intrusiva	Toba ácida	519.23	8.73

El granito es una roca ígnea intrusiva, es decir, de origen magmático. Debido a que en su formación se mezclan distintos minerales, aparece como una roca con moteados de diversos colores. Su dureza es de siete en la escala de Mohs, lo cual la posiciona como una roca dura por lo que es resistente al desgaste, es decir, difícil de meteorizar.

Es prácticamente impermeable por su baja porosidad (Zumberge, 1974). Los suelos originados por este material parental son ácidos, con bajo contenido de arcillas, de magnesio y de calcio (Benzing, 2001).

La toba ácida es una roca ígnea extrusiva, su origen es volcánico, en este caso son principalmente formadas por la acumulación de cenizas por lo que son rocas porosas con poca resistencia y rigidez. Debido a su alto contenido en sílice son ácidas (Stauffer, 1963).

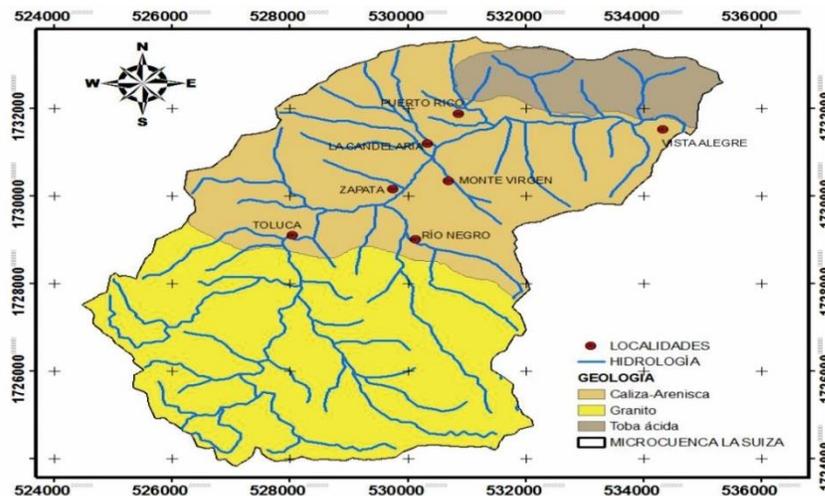


Figura 3.5. Geología de la microcuenca La Suiza

Las rocas calizas-arenisca son rocas sedimentarias de tipo clástico, es decir, se componen de fragmentos o clastos de distintas rocas y minerales, generalmente se conforman por una matriz de conglomerado, en éste caso las partículas de granulometría arena y un material cementante como calcitas y dolomitas, que son partículas más finas.

Las calizas se componen de carbonato de calcio y magnesita, mientras las areniscas, de cuarzo, por lo cual estas rocas son de color blanco. Su origen es en los mares cálidos de regiones tropicales que al emerger quedan expuestas a los efectos erosivos. Son rocas poco consolidadas ya que tienen un grano medio a grueso lo que las hace altamente permeables. Este tipo de clastos es básico, sin embargo existen clastos de arenisca cuyo cementante es silíceo por lo que en este caso tienden a pH ácidos (Zumberge, 1974; Stauffer, 1963).

3.2. Materiales y equipo

En el campo fueron: Pala, cava hoyo, cubetas, etiquetas, bolsas de plástico, ligas, GPS modelo Garmin serie 3120703023, flexómetro, hojas de campo, lápices, costales, anillos de D.A e infiltración.

3.3. Metodología

En la figura 3.6. Se presentan las siete etapas utilizadas en la metodología con la cual se desarrolló este estudio, mismas que se describen a continuación.

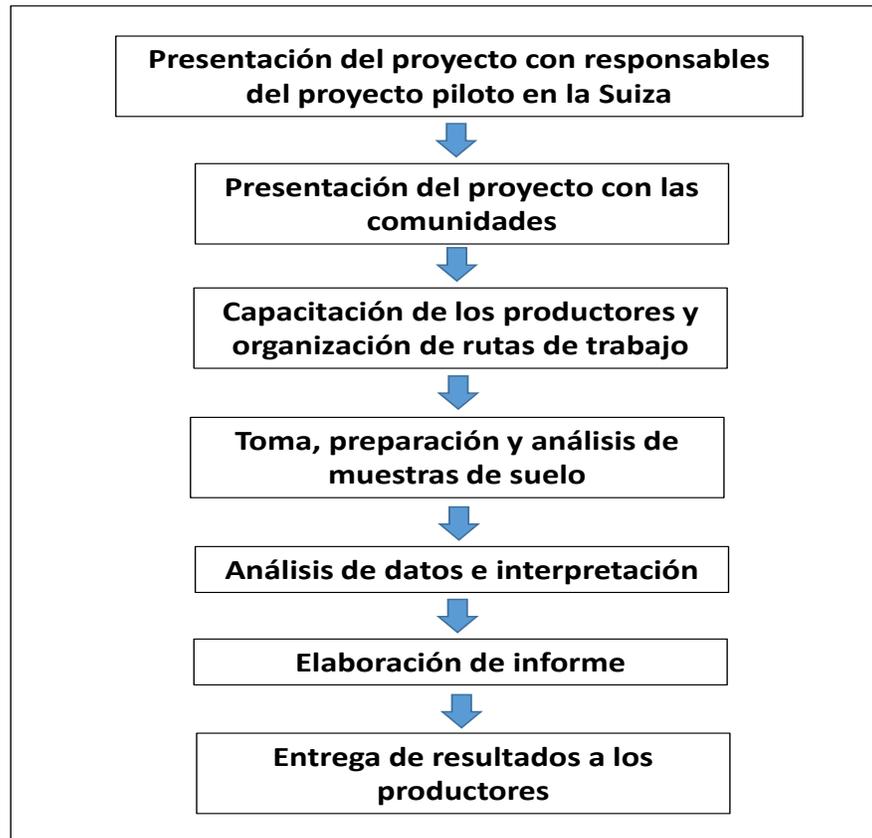


Figura 3.6. Metodología aplicada en el estudio

3.3.1. Presentación del proyecto con responsables del proyecto piloto en la suiza.

Consistió en hacer una presentación de la propuesta del estudio con representantes del INIFAP, FONCET y TNC con el propósito de validar la pertinencia del proyecto, metodología, sus costos y tiempos de implementación.

La reunión se realizó el día 26 de junio del 2014 y en la misma, el proyecto fue aceptado y el FONCET-TNC se comprometieron a sufragar los gastos operativos del proyecto y el INIFAP asumió el papel de asesor técnico del tesista durante la ejecución.

3.3.2. Presentación del proyecto con las comunidades

Consistió en presentar en cada una de las cinco comunidades el proyecto con el propósito de lograr la aceptación y participación de los productores durante su ejecución.

En cada una de las reuniones se presentaron:

1. Los objetivos del estudio
2. La importancia de la participación de los productores
3. Las propiedades de los suelos a medir
4. El procedimiento del muestro
5. La calendarización de los cursos de capacitación previo al muestreo

Todas las comunidades aceptaron el proyecto y aceptaron participar durante su ejecución previa capacitación.

3.3.3. Capacitación de los productores y organización de rutas de muestreo

a) Talleres de capacitación:

Consistió en impartir un curso de capacitación a los productores de cada comunidad con el objetivo de desarrollar sus capacidades en muestreo y análisis de los suelos (cuadro 1).

Los temas abordados fueron:

- Objetivos del curso
- Importancia del suelo en la agricultura
- Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos
- Como realizar el muestreo de suelo
- Equipos y materiales para el muestreo

Cuadro 3.4. Datos de los cursos de capacitación impartidos

Comunidad	Fecha del curso	Asistentes
Puerto Rico	15 de Julio del 2014	40
Río Negro	20 de Agosto del 2014	14
Vista Alegre	24 de Agosto del 2014	30
Toluca	15 de Septiembre del 2014	20
Monte Virgen	22 de Septiembre del 2014	20
	Total	124

b) Organización de las rutas de muestreo

Esta actividad consistió en elaborar con la participación de los productores de cada comunidad, las rutas de muestreos en función de la ubicación de las parcelas de café. Con base a las rutas se cuantifico que el estudio se realizaría en un total de 146 predios y se procedió a elaborar un calendario de muestreo considerando que en promedio se podían visitar 6 parcelas por día.

Los productores de cada ruta se organizaron para llevar los materiales para el muestreo y se acordó que todos apoyarían en la tomas de las muestras de todas las parcelas de la ruta.

3.3.4. Toma, preparación y análisis de muestras de suelo

a) Tomas de muestras

Para la toma de datos los productores se organizaron en grupos y se definieron rutas de muestreo en función de la ubicación de las parcelas de café. En cada predio el propietario elaboró un croquis de su parcela que sirvió de referencia para la ubicación de cinco puntos de muestreos, los cuales se distribuyeron de tal manera que permitiera tomar una muestra compuesta lo más representativa posible de la parcelas (figura 3.7).

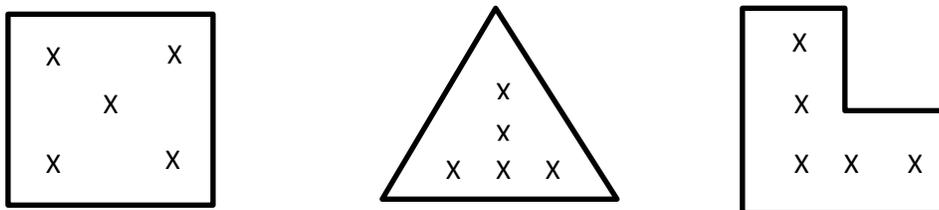


Figura 3.7. Ilustración de los puntos de muestro según el terreno

En todos los predios se tomaron las coordenadas del centro de la parcela con apoyo de un Geo-posicionador Satelital (GPS).

b) Preparación de las muestras de suelo

A cada muestra se le asignó una etiqueta con el nombre de la comunidad, nombre del productor, nombre del predio, fecha y profundidad de muestreo.

c) Secado de muestras

Sé realizó el secado de 146 muestras de suelo de D.A en horno a 100°C por 24 horas con la finalidad de secar la muestra totalmente y con ello poder realizar el estudio de las propiedades físicas del suelo.

Realizándose este proceso de secado en las instalaciones de INIFAP en un cuarto de trabajo adecuado para dicha labor.

3.4 Propiedades de los suelos estudiadas

En 146 predios cultivados de café se estudiaron las siguientes variables:

3.4.1. Textura

Esta variable fue determinada por el método del tacto recomendado por USDA (1999) y Lafitte (1993), de acuerdo a la guía mostrada en la figura 3.8.

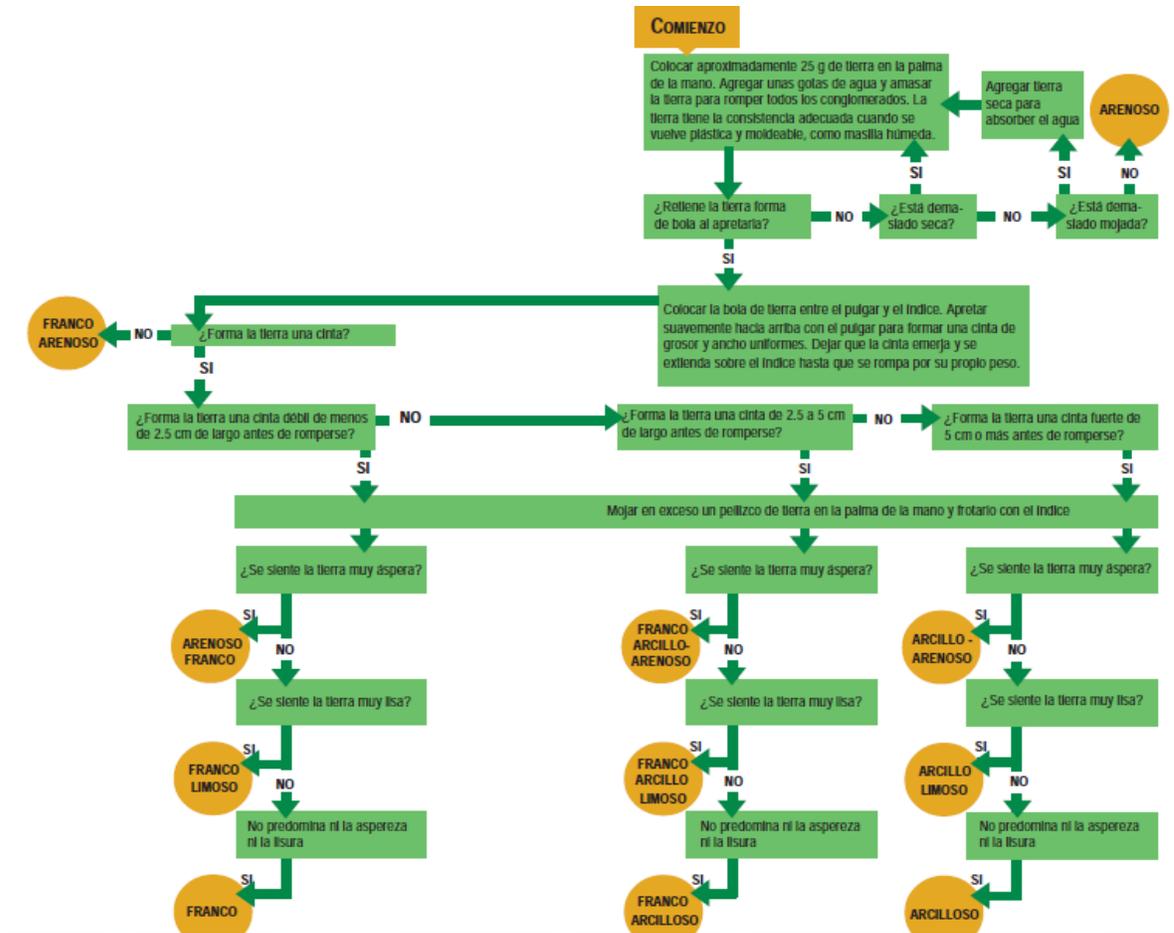


Figura 3.8. Determinación de textura del suelo por el método del tacto.

Adicionalmente a 49 muestras se les determinó con mayor precisión los porcentajes de arena, limo y arcilla por medio del método Boyoucos en el laboratorio del Colegio de Posgraduados de Chapingo.

3.4.2 Densidad aparente

Esta variable se determinó por el método del cilindro recomendado por USDA (1999) que ocupa los siguientes materiales: Anillo de 3 pulgadas (7.62 cm) de diámetro, mazo, bloque de madera, pala, cuchillo, bolsas de plástico, marcadores, balanza y horno para secado de muestras.

Los cálculos realizados con los datos fueron:

$$\text{Contenido de agua del suelo (g/g)} = \frac{\text{PSH} - \text{PSS}}{\text{PSS}}$$

$$D_a \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{PSSg}}{\text{VScm}^3}$$

Vs= volumen de suelo

Da= Densidad aparente

La interpretación de los datos de densidad aparente se realizó con base a los datos del cuadro 3.5, propuesta dentro del método de USDA (1999).

Cuadro 3.5. Valores de densidad aparente según tipo de textura y su efecto en el crecimiento de las raíces. USDA (1999).

Textura del suelo	Densidades aparentes (gr/cm ³)		
	Ideales	Que pueden afectar el crecimiento radicular	Que restringen el crecimiento radicular
Arena, areno-franco	< 1.60	1.69	>1.80
Franco-arenosa, franco	< 1.40	1.63	>1.80
Franco-arcilla-arenosa, franco, franco arcillosa	< 1.40	1.60	> 1.75
Limosa, franco-limosa	< 1.30	1.60	> 1.75
Franco-limosa, franco, arcillo-limosa	< 1.40	1.55	> 1.65
Arcillo-arenosa, arcillo-limosa, algunas franco-arcillosas (35- 45% de arcilla)	< 1.10	1.39	> 1.58
Arcillosa (>45% de arcilla)	< 1.10	1.39	> 1.47

3.4.3. Porosidad en (%)

Se determinó a través de la fórmula:

$$\text{Pt (\%)} = \frac{\text{Dr} - \text{Da}}{\text{Dr}} * 100$$

Donde:

Pt = porosidad total (%)

Dr = densidad real (gr/cm^3)

Da = densidad aparente (gr/cm^3)

Para interpretar el resultado se consideraron los criterios propuestos por Flores y Alcalá (2005) señalados en la cuadro 3.6 siguiente:

Cuadro 3.6: Clasificación del porcentaje de porosidad

Porosidad total (%)	Interpretación
< 30	Muy baja
30 - 40	Baja
40 - 50	Media
50 - 60	Alta
> 60	Muy alta

3.4.4 Humedad

Se estimaron los siguientes indicadores de humedad:

$$\text{Espacio de poros ocupado por agua (\%)} = \frac{\text{contenido de agua en volumen} \times 100}{\text{Porosidad del suelo}}$$

$$\text{Contenido de agua en volumen (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Contenido de agua en el suelo g/g}}{x Da \text{ (g/cm}^3\text{)}}$$

Para la interpretación de los resultados se consideró que los macro poros son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces y los micro poros son los que retienen agua y parte de la cual es disponible para las plantas. Es decir, a mayor contenido de humedad en el suelo mayor presencia de microporos en el suelo.

3.4.5. Velocidad infiltración

Esta variable se determinó por el método del cilindro recomendado por USDA (1999) que ocupa los siguientes materiales: Anillo de 6 pulgadas de diámetro, envoltura plástica, botella plástica o probeta graduada de 500 ml, agua destilada y cronómetro.

Los cálculos realizados con los datos fueron:

Velocidad de infiltración (min/cm): $\text{Tiempo (min)}/2.54 \text{ cm}$

La interpretación de los datos de infiltración se realizó con base a los datos del cuadro 3.7, propuesto dentro del método de USDA (1999). Las clases son de permeabilidad históricamente usadas en el reconocimiento edafológico del Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Las clases son estimadas a partir de propiedades del suelo y se refieren a una velocidad de infiltración estable.

Cuadro 3.7. Velocidades y clases de infiltración. USDA (1999)

Velocidad de infiltración (minuto por centímetro)	Clases de infiltración
<1.18	Muy rápido
1.18-3.94	Rápido
3.94-11.81	Moderadamente rápido
11.81-39.37	Moderado
39.37-118.11	Moderadamente lento
118.11-393.70	Lento
393.70-15,748.03	Muy lento
>15,748.03	Impermeable

3.4.6. La Profundidad del suelo y del horizonte húmico

La profundidad total del suelo se determinó realizando un perfil del suelo hasta una profundidad de 70 cm, si al llegar hasta esta profundidad no se encontraba la roca madre se consideró como un suelo profundo.

La profundidad del horizonte húmico se determinó midiendo directamente con un flexómetro el espesor que tenía la capa oscura del suelo, desde la superficie hacia abajo.

Para la interpretación de los datos se consideró lo siguiente:

- Si la roca madre no se encontraba a una profundidad de 70 cm se consideraba un suelo profundo.
- Si el horizonte húmico era mayor o igual de 30 se consideró como un suelo bueno para el cultivo de café.

3.4.7. Pendiente del terreno (%)

Se determinó directamente en el terreno, dividiendo entre 2 el desnivel de la parcela que se presentaba en una distancia horizontal de 200 cm.

Con fines de interpretación, se consideró que los cultivos anuales y la ganadería no deben practicarse en terrenos con pendientes mayores de 15 por ciento, el cultivo de café en pendientes menores o iguales a 30 por ciento y los bosques en pendientes mayores a 30 por ciento (Cubero, 2001).

3.4.8. Materia orgánica

Se determinó en el laboratorio por el método recomendado por la NOM-021-SEMARNAT-2000 denominado AS-07, de Walkley y Black, basado en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado (Diario Oficial, 2002). Para la interpretación de los resultados se usaron los criterios que se señalan a continuación:

Cuadro 3.8. Clasificación de la materia orgánica

Clase	Materia Orgánica (%)
Muy bajo	<4.0
Bajo	4.1-6.0
Medio	6.1-10.9
Alto	11.0-16.0
Muy alto	>16.1

3.5. Análisis de datos

Los datos fueron capturados en una matriz de Excell y el procesamiento estadístico de los datos consistió en determinar lo siguiente:

- a) La media aritmética como una medida de centralidad de los datos.
- b) La varianza, desviación estándar y coeficientes de variación para conocer la medida de la dispersión de los valores con respecto a la media.
- c) El coeficiente de correlación entre dos variables para conocer la relación entre ambas.
- d) El cuadrado del coeficiente de correlación (R^2) de momento del producto Pearson para conocer la proporción de la varianza de una variable y que puede atribuirse a la varianza de una variable x.

3.5.1 Entrega de resultados a los productores

El día martes 12 de mayo del 2015 junto con autoridades locales (comisariados ejidales de cada una de las cinco comunidades) y con la presencia del M.S.c Walter López Báez junto con su apoyo técnico se realizó la entrega de resultados a cada productor (un total de 49 productores), en donde con apoyo de

un taller didáctico se les enseñó a interpretar los análisis de laboratorio. Logrando con esto una mejor credibilidad de los productores con este tipo de proyectos teóricos- prácticos, además de una satisfacción por parte de cada uno de ellos al ya contar con un análisis de laboratorio de la más alta calidad y entendimiento.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Integración de base de datos georreferenciada

Con los datos de las coordenadas de los predios analizados se construyó una base de datos georreferenciada, diferenciando con colores a cada una de las localidades y dentro de cada localidad los productores se diferenciaron con los iniciales de su nombre y apellidos (figura 4.9).

El color Amarillo corresponde a los productores de la localidad de Puerto Rico, el verde a los de Vista Alegre, el rojo a los de Monte Virgen, el azul a los de Río Negro y el rosa a los de Toluca.

Esta base fue entregada a los productores como un insumo estratégico para los procesos de planificación y gestión de proyectos para el cultivo de café.



Figura 4.9. Ubicación de los predios estudiados en la microcuenca La Suiza

4.2. Textura

Considerando los resultados de laboratorio de 49 muestras analizadas en el laboratorio, en el cuadro 4.9 y figura 4.10, se observa que en promedio los suelos presentan 43 por ciento (± 11.48) de arena, la 28.37 por ciento (± 7.93) de arcilla y 28.6% (± 6.14) de limo. Los suelos tienen un mayor porcentaje de arena ya que el 86% (n= 42) de ellos contienen más de 33% de arena, habiendo inclusive suelos con valores de hasta 72.5 por ciento.

Cuadro 4.9. Porcentaje de arena , limo y arcilla en los suelos estudiados

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Est.	C. V. (%)
Arena (%)	43.04	12.9	72.52	11.48	26.67
Limo (%)	28.6	9.3	45.1	6.14	21.47
Arcilla (%)	28.37	13.12	54.4	7.92	27.92

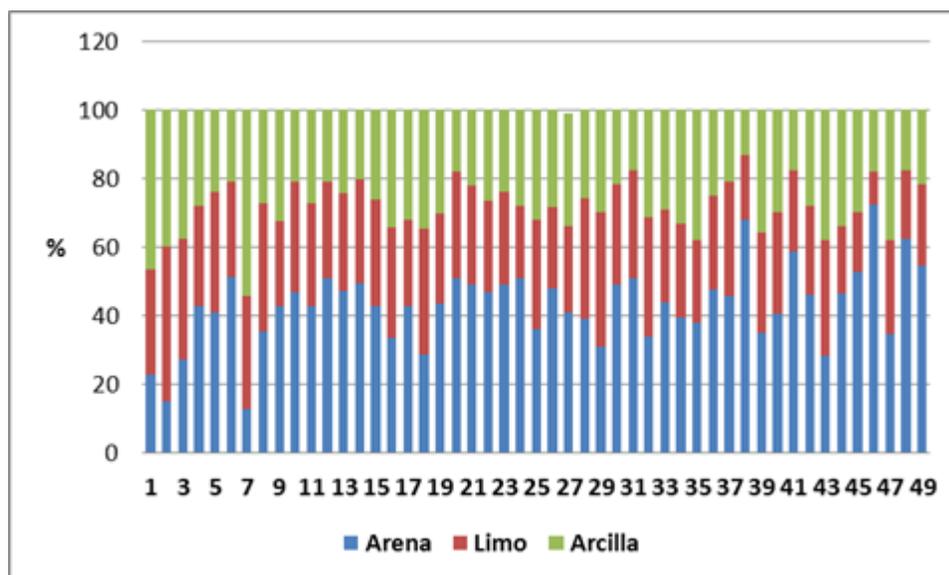


Figura 4.10. Porcentaje de arena , limo y arcilla en los suelos estudiados

Usando la clasificación propuesta en la figura 4.11 se observa que el 87% (n=43) de las parcelas se ubican como suelos francos en las modalidades de franco arcilloso, francos y francos arcilloso arenosos.

De acuerdo a Valencia (1998), los suelos francos son los que presentan las mejores condiciones físicas para el cultivo de café.

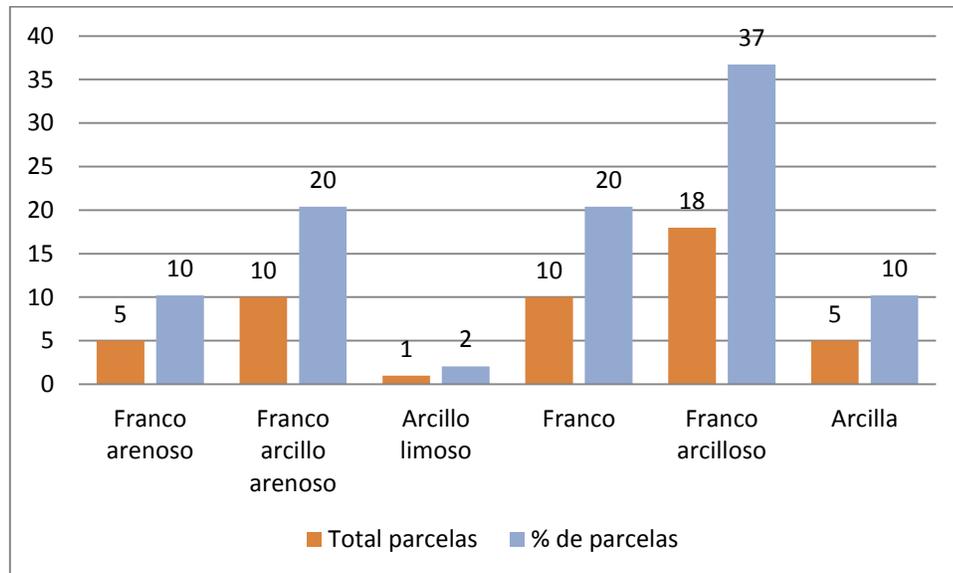


Figura 4.11. Clasificación de suelos según textura

4.3. Profundidad del suelo

Tanto la profundidad total del suelo como la profundidad del horizonte húmico se analizaron sobre la base de 146 parcelas de café estudiadas.

a) Profundidad del horizonte húmico

En el cuadro 4.10 y figura 4.12 se observa que el 57.5 % (n=84) de los suelos la profundidad del horizonte húmico es mayor de 30 por ciento, en el 32.8 por ciento se encuentra entre 20-29 cm y en el 9.5 por ciento entre 10-19 cm de profundidad. Considerando lo señalado por Geissert, Et al. (2013), de que mayor la densidad de raíces absorbentes del cafeto, cerca del 90 por ciento del total, se presentan en los primeros 30 cm de profundidad del suelo, se concluye que el 57.5 por ciento de las parcelas estudiadas se encuentran en estas condiciones. Inclusive hubieron parcelas en donde la profundidad del horizonte húmico alcanzo hasta los 65.6 cm.

Cuadro 4.10. Estadísticas de profundidad (cm) del horizonte húmico

Variable	Profundidad (cm) del horizonte húmico			
	10-19	20-29	> 30	Total
No. Parcelas	14	48	84	146
%	9.59	32.88	57.53	100
Valor mínimo	9.4	20.2	30	
Valor máximo	19.6	29.8	65.6	
Promedio	16.56	31.01	39.14	
Desviación estándar	2.91	2.69	8.55	

El otro grupo integrado por el 42.5 por ciento (n=62) de las parcelas presentan un horizonte húmico con una profundidad menor a los 30 cm, encontrándose sitios en donde la profundidad es de sólo 9.4 cm. De hecho el 9.5 (n=14) de las parcelas presentó profundidades menores a los 19 cm.

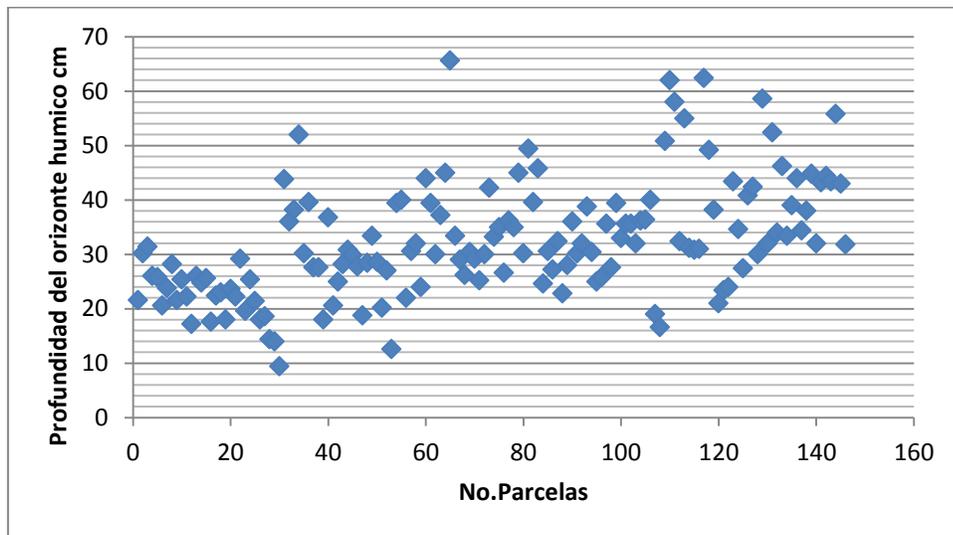


Figura 4.12. Profundidad (cm) del horizonte húmico en suelos estudiados

b) Profundidad total del suelo

En el cuadro 4.11 se presenta una clasificación de los suelos según profundidad. Se observa que el 75 por ciento (n=109) de las parcelas presentan suelos con una profundidad total entre 50-100 cm clasificados como moderadamente profundos. Existe otro grupo que incluye al 25 por ciento (n=37) restante de las parcelas que se clasifican como suelos superficiales por porque presentan profundidades entre los 25-50 cm.

Cuadro 4.11. Estadísticas de profundidad (cm) total del suelo

Variable	Clasificación según profundidad del suelos		
	Superficial (25-50 cm)	Moderadamente profundo (50-100 cm)	Total
Casos	37	109	146
%	25.34	74.66	100.00
Promedio	41.94	61.56	
Valor máximo	50	70	
Valor mínimo	30.6	50.2	
Desv. estándar	5.48	5.89	

Es muy probable que tanto la profundidad total del suelo como el espesor del horizonte húmico estén directamente relacionadas con las tasas de erosión hídrica que ocurren en la microcuenca la Suiza. De acuerdo a López *et al.*, (2012), el 39 por ciento del área de la microcuenca presenta una erosión de severa y muy severa con tasas de pérdida de suelo por arriba de las 50 ton/ha/año que corresponde a las partes media y baja en donde se cultiva café y maíz (figura 4.13).

Según los productores, los suelos más deteriorados donde se cultiva café fueron anteriormente cultivados con maíz con quema de residuos y sin prácticas

de conservación. Es probable que en esta situación se encuentren las 37 parcelas que presentaron suelos con profundidades menores a 50 cm.

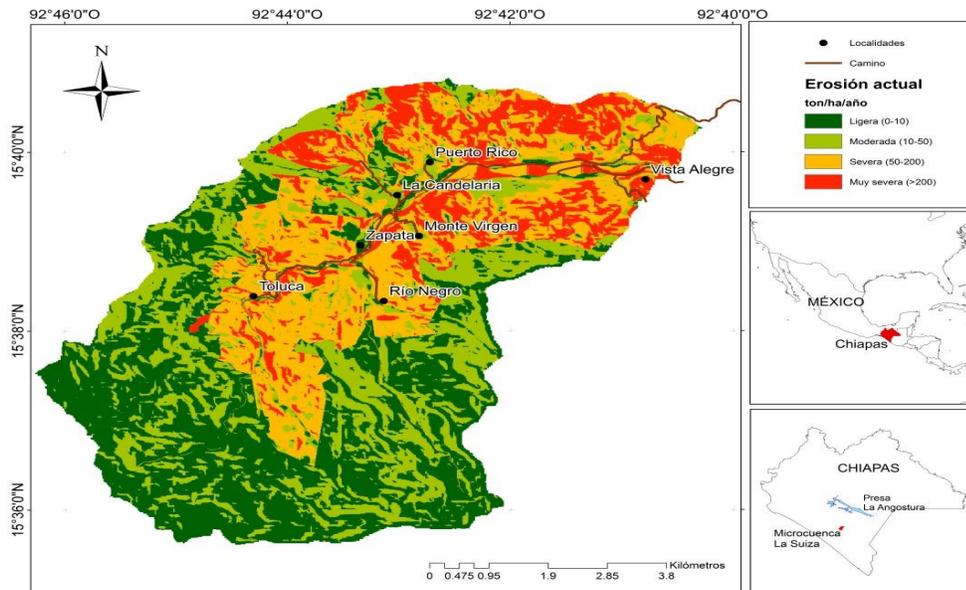


Figura 4.13. Mapa de erosión hídrica actual en la microcuenca La Suiza (López *et al.*, 2012)

4.4. Densidad aparente

En el cuadro 4.12 se presentan los resultados de densidad aparente de manera general para los 146 suelos estudiados y también separando los suelos en función de la presencia de piedras.

El promedio general de densidad aparente fue de $0.90 \text{ gr/cm}^3 (\pm 0.18)$ con un coeficiente de variación (C. V.) de 19.78 por ciento, el valor máximo fue de 1.58 y el mínimo de 0.40 gr/cm^3 . Para los suelos sin presencia de piedra (que equivalen al 25.4 por ciento del total de las parcelas analizadas), el promedio de densidad aparente fue de $0.91 (\pm 0.17)$ con un valor mínimo de 0.51 y un máximo de $1.4 (\text{gr/cm}^3)$ y con coeficiente de variación de 18.90 por ciento.

Para los suelos con presencia de piedra (que representan el 74.6 por ciento del total de las parcelas analizadas), el promedio de densidad aparente fue de

0.90 (± 0.18) con un valor mínimo de 0.40 y un máximo de 1.6 (gr/cm^3) con un coeficiente de variación de 20.10 por ciento.

Cuadro 4.12 Resultados de densidad aparente (gr/cm^3)

Tipo de suelo	Valores de densidad aparente (gr/cm^3)				C. V. (%)
	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Est.	
Todos los suelos (n=146)	0.90	0.40	1.58	0.18	19.78
Suelos sin presencia de piedra (n=37)	0.91	0.51	1.40	0.17	18.90
Suelos con presencia de piedra (n=109)	0.90	0.40	1.60	0.18	20.10

No se observó diferencia estadística entre los valores de densidad aparente de los suelos con piedras en comparación con los suelos sin presencia de piedra (Prob. $F = 0.7461$). En la figura 4.14 se muestran los valores de densidad aparente en los suelos con y sin presencia de piedras.

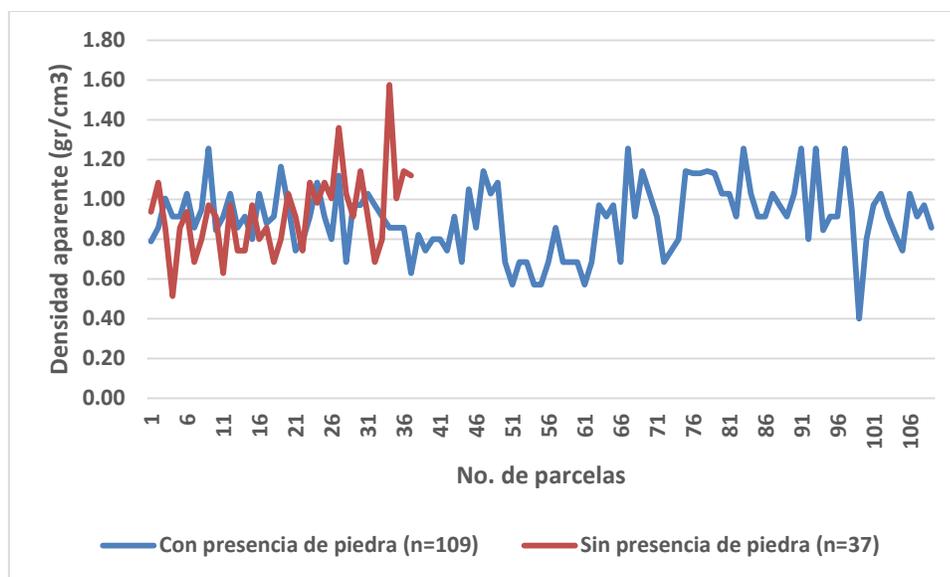


Figura 4.14. Valores de densidad aparente con y sin piedras

En el cuadro 4.13 se observa que la presencia de piedras presenta una alta variabilidad en los suelos, en cuanto a la proporción del volumen (C.V. de 92 por ciento) y del peso (C.V. de 59.6 por ciento) que ocupan en el suelo. El volumen

ocupado por las piedras en promedio representa el 13 por ciento del volumen total del suelo con un rango que oscila entre los 0.67 y 88.89 por ciento. Por su parte el peso de las piedras en promedio equivale AL 26.19 por ciento del peso total del suelo con un rango entre el 1.45 y el 75 por ciento.

Cuadro 4.13. Presencia de piedra en los suelos estudiados (n=109)

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Est.	C. V. (%)
Volumen de piedra (%)	13.00	0.67	88.89	11.97	92.00
Peso de piedra (%)	26.19	1.45	75.00	15.61	59.60

Comparando los datos de densidad aparente obtenidos en este estudio con los criterios recomendados por Valencia (1998) para el cultivo de café, se concluye que sólo el 48.6% (n=71) de los suelos presentan densidades aparentes entre los 0.7 y 0.9 (gr/cm³) consideradas ideales para el cultivo de café. El 15.7 por ciento (n=23) de las parcelas presentan suelos muy sueltos con densidades aparentes por debajo del rango ideal y el 35.6 por ciento (n=52) densidades aparentes por arriba del mismo (Cuadro 4.14).

Cuadro 4.14. Clasificación de las parcelas según datos de densidad aparente

Concepto	Densidad aparente (gr/cm³)		
	< 0.7	0.7-0.9	>0.9
No. De parcelas	23	71	52
(%)	15.7	48.6	35.6

En el cuadro 4.15 se presenta un análisis de los datos de densidad aparente y la textura del suelo en función de los criterios propuestos por USDA (1999) sobre la restricción al crecimiento de las raíces. Se observa que el 85.7 por ciento (n=42) de los suelos estudiados presentan valores de densidad aparente ideales para el crecimiento de las raíces en acorde a la textura que poseen. El restante 14.3% (n=7) presentan densidades aparentes que pueden afectar el crecimiento de las raíces.

Cuadro 4.15. Clasificación de las parcelas según datos de densidad aparente

Textura del suelo	Densidad aparente ideal (g/cm ³) para el crecimiento radicular	Parcelas	
		No.	%
Franco arenosa	<1.40	1	2.38
Franco	<1.60	13	30.95
Franco arenosa	<1.40	2	4.76
Franco-arcilla-arenosa	<1.40	7	16.67
franco- arcillosa	<1.40	16	38.10
Arcillo-arenosa, arcillo-limosa	<1.10	1	2.38
Arcillosas	<1.10	2	4.76
Total		42	100.00

Estos resultados es muy probable que se deban a las mejores condiciones físicas que presentan los suelos provenientes de cenizas volcánicas, los cuales poseen en general buena textura (francos) y estructura (granular), buena profundidad efectiva (40-60 cm), buen drenaje interno, buena capacidad de retención de humedad (Arila, 2015).

4.5. Infiltración

En el cuadro 4.16 se aprecian los resultados de los datos de infiltración con base en los parámetros utilizados por USDA (1999).

- a) Con respecto al primer parámetro, el tiempo promedio requerido para que se infiltrará un centímetro de agua fue 2.05 (± 1.47) minutos, con un rango muy amplio que varió entre los 0.03 y 45.33 minutos, expresado en un alto coeficiente de variación de 71.4 por ciento.
- b) Con respecto al segundo parámetro, en promedio se infiltraron 175.33 (± 1.47) cm de agua por hora, con un valor mínimo de 1.32 y un máximo de 2,286 cm/hr. El coeficiente de variación fue de 38.98 por ciento.

Cuadro 4.16. Estadísticas de infiltración

Estadístico	Infiltración	
	Min/cm de agua	Cm de agua/hora
Media	2.05	175.33
Desviación. Estándar	1.47	68.34
Mínimo	0.03	1.32
Máximo	45.33	2286.00
C. V. (%)	71.40	38.98

En la figura 4.15 y cuadro 4.17 se observa que la presencia de piedras en el suelo tiene un efecto positivo estadísticamente significativo (Prob. $F=5.38024E-41$) sobre la velocidad de infiltración. El tiempo promedio requerido para la infiltración de un centímetro de agua en los suelos con presencia de piedras es de 0.87 minutos, mientras que en los suelos sin piedras el tiempo se eleva hasta los 5.6 minutos.

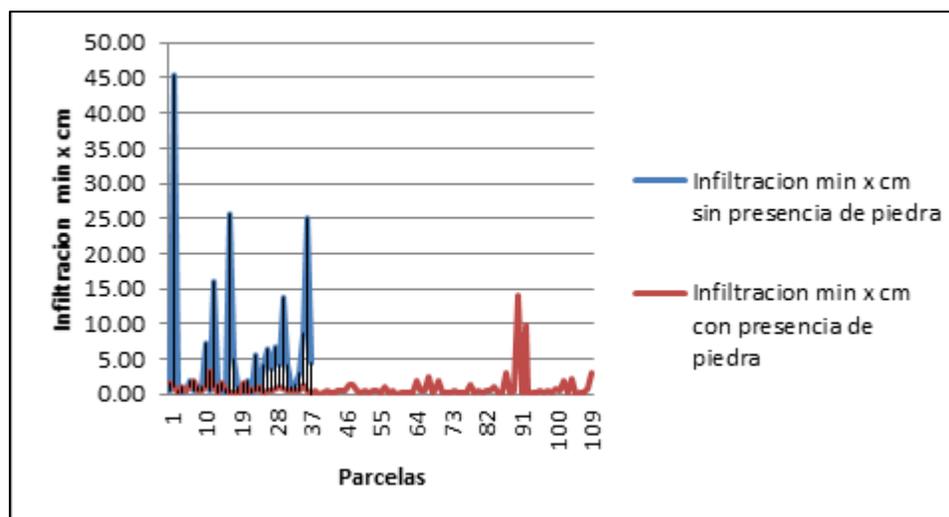


Figura 4.15. Velocidad de infiltración con y sin presencia de piedras en el suelo

Cuadro 4.17. Velocidad de infiltración con y sin presencia de piedras en el suelo

Velocidad infiltración (min/cm) según tipo de suelo		
Estadística	Con presencia de piedra (n=109)	Sin presencia de piedra (n=37)
Promedio	0.87	5.6
Max	14.17	45.3
Min	0.03	0.2
Desv stand	1.69	9.2
Prueba F	5.38024E-41	

En el cuadro 4.18 se presentan los datos agrupados de acuerdo a las clases de infiltración propuestas por USDA (1999) para el reconocimiento edafológico. El 88.3 por ciento (n=129) de las parcelas se ubican en las clases de infiltración de rápido y muy rápido con valores menores a los 3.94 min/cm de agua infiltrada. La rápida velocidad de infiltración está relacionada con el mayor porcentaje de arena que presentan los suelos en su textura y por la presencia de piedras.

Cuadro 4.18. Velocidades y clases de infiltración

Estadístico	Clases de infiltración según infiltración (min/cm)				
	Muy Rápido <1.18	Rápido 1.18-3.94	Moderadamente rápido 3.94-11.81	Moderado 11.81-39.37	Moderadamente lento 39.37-118.11
Total parcelas (n=146)					
No.	105	24	11	5	1
%	71.92	16.44	7.53	3.42	0.68
Parcelas con presencia de piedras (n=109)					
No.	91	16	1	1	
%	83.49	14.68	0.92	0.92	0.00
Parcelas sin presencia de piedras (n=37)					
No.	14	8	10	4	1
%	37.84	21.62	27.03	10.81	2.70

Se observa que en los suelos con presencia de piedra el 98.17 por ciento de las parcelas se ubican en las clases rápida y muy rápida infiltración, mientras que en los suelos que no tienen presencia de piedras sólo el 59.46 por ciento se ubican en estas clases.

4.6. Porosidad del suelo

En el cuadro 4.19 y figura 4.16 se muestran los resultados del porcentaje de porosidad de los suelos en los escenarios con y sin presencia de piedras. En promedio el por ciento de porosidad osciló entre el 65.04 y 66.08 por ciento con un coeficiente de variación (C.V.) entre 9.6 y 11.7 por ciento y se observa que la presencia de piedras no influye estadísticamente (Prob. F= 0.1510) sobre el por ciento de porosidad de los suelos.

Cuadro 4.19. Porcentaje de porosidad con y sin presencia de piedra en el suelo

Estadístico	% de porosidad/tipo se suelo	
	Suelos sin presencia de piedra (n=37)	Suelos con presencia de piedra (n=109)
Promedio	65.04	66.08
Valor máximo	80.61	84.92
Valor mínimo	40.53	52.59
Desv. estandar	7.63	6.34
C. V. (%)	11.7	9.6
Probabilidad de F	0.1510	

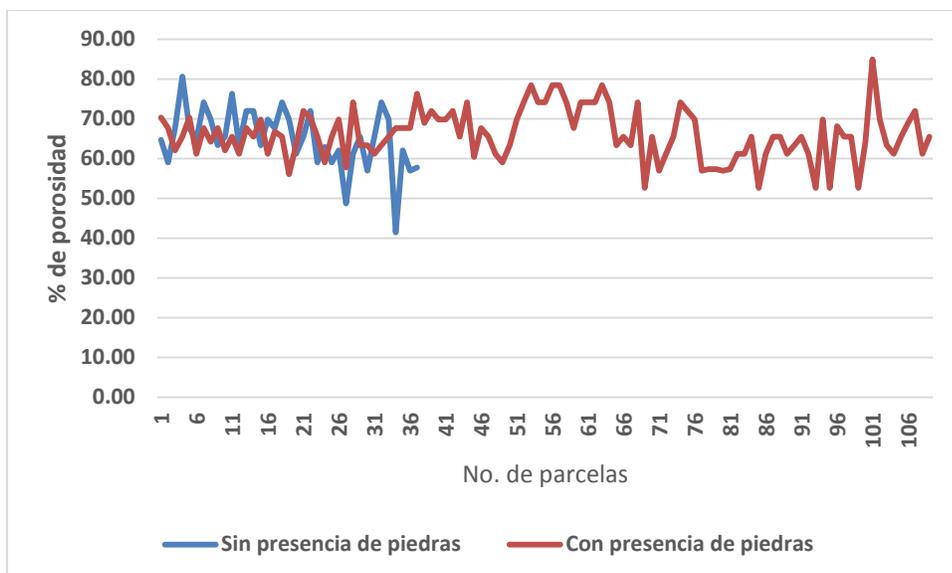


Figura 4.16. Porosidad (%) con y sin presencia de piedras en el suelo

Utilizando los criterios propuestos por Flores y Alcalá (2005), en el cuadro 4.20 se presenta una clasificación de los suelos de acuerdo al porcentaje de porosidad. Se observa que el 98.6% (n=144) de los parcelas se ubicaron en las clases de alta y muy alta porosidad con valores por arriba del 50 por ciento de porosidad.

Cuadro 4.20. Clasificación de los suelos según por ciento de porosidad

Porosidad (%)	total Clase	Parcelas	
		No.	%
<30	Muy baja	0	0
31-40	Baja	0	0
41-50	Media	2	1.37
51-60	Alta	21	14.38
>60	Muy alta	123	84.25
Total		146	100

De hecho el 84.25 por ciento (n=123) de las parcelas se ubicaron en la clase de muy alta porosidad con valores por arriba del 60 por ciento de porosidad.

4.7. Humedad del suelo

En el Cuadro 4.21 y figura 4.17 se presentan las estadísticas y los datos del contenido de agua volumen (gr/cm^3) por tipo de suelo, en donde se observa un efecto estadístico altamente significativo de la presencia de piedras sobre el contenido de humedad en el suelo. Los suelos sin piedra en promedio tuvieron $0.08 \text{ gr}/\text{cm}^3$ más de agua y presentaron menor variabilidad en los datos que los suelos sin piedra.

En los suelos sin piedra el valor mínimo de contenido de agua encontrado fue de $0.24 \text{ gr}/\text{cm}^3$, valor 12 veces mayor al valor mínimo encontrado en los suelos con piedra de 0.02.

Cuadro 4.21. Contenido de agua en volumen (gr/cm^3) por tipo de suelo

Estadístico	Contenido de agua volumen (gr/cm^3)/ tipo de suelo	
	Con presencia de piedra (n=109)	Sin presencia de piedra (n=37)
Promedio	0.36	0.44
Valor máximo	0.75	0.70
Valor mínimo	0.02	0.24
Desv. Stand	0.14	0.09
C. V. (%)	38.8	20.4
Prob. De F	0.0028	

El menor contenido promedio de humedad en los suelos con piedras es probable que se deba al mayor contenido de macroporos que originan las piedras y que provoca una mayor infiltración del agua en el suelo.

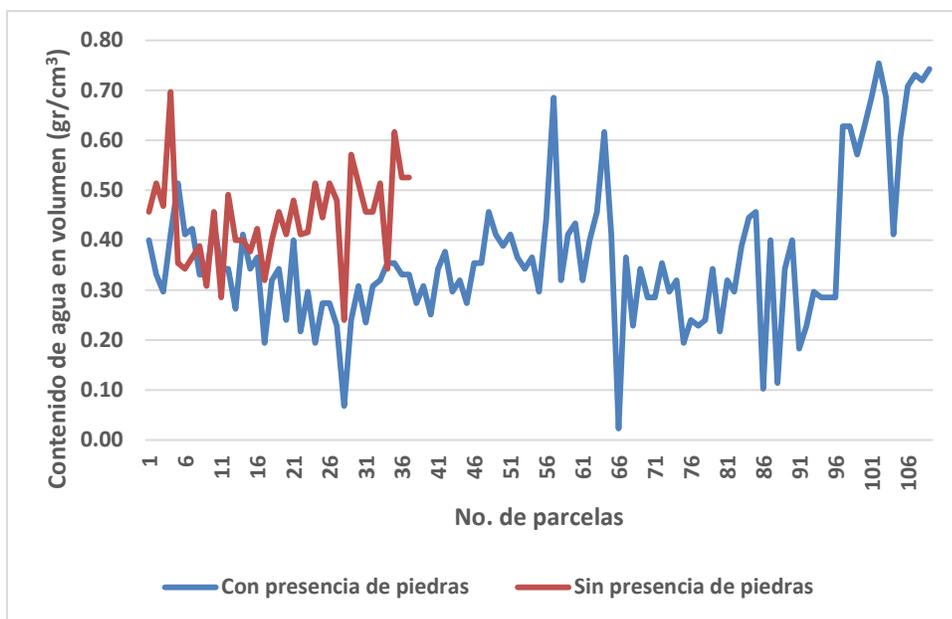


Figura 4.17. Contenido de agua en volumen (gr/cm^3) en parcelas

En cuanto al por ciento de espacios de poros ocupados por agua los suelos presentaron un promedio de 53.69 por ciento (± 20.32) con un rango entre 3.08 y 101.45 con un coeficiente de variación de 37.8 por ciento (cuadro 4.22 y figura 4.18). No se observó un efecto estadístico significativo (Prob. De F= 0.3338) de la presencia de piedras sobre el % de espacio de poros ocupado por agua, probablemente debido a que tampoco se observó un efecto estadístico sobre el por ciento de porosidad.

Cuadro 4.22. Espacios de poros ocupados por agua (por ciento) por tipo de suelo

Estadística	Espacio de poros ocupado por agua (%) / tipo de suelo	
	Con presencia de piedra (n=109)	Sin presencia de piedra (n=37)
Promedio	48.82	69.03
Max	99.34	101.45
Min	03.08	37.42
Desv stand	19.16	16.63
Prueba F	0.3338	

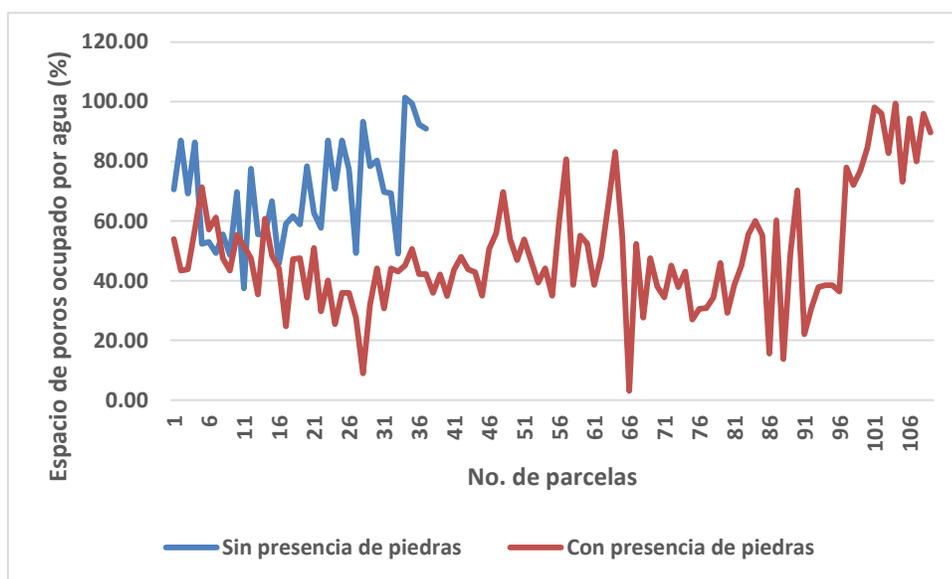


Figura 4.18. Espacios de poros ocupados por agua (por ciento) en parcelas

4.8. Materia orgánica

En las 49 muestras de suelos que se analizó el contenido de materia orgánica se obtuvo un valor promedio de 8.59 por ciento (± 4.75) con un rango entre 2.9 y 21.81 por ciento y un coeficiente de variación de 55.2 por ciento. Utilizando los criterios señalados por NOM-021-SEMARNAT-2000 en el cuadro 4.23 se presenta una clasificación de las parcelas en función del su contenido de materia orgánica. Se observa que al alrededor del 70 por ciento de las parcelas presentan un contenido de medio a muy alto de materia orgánica.

Cuadro 4.23. Contenido y clases de materia orgánica en los suelos

Clase	Materia Orgánica (%)	Parcelas	%
Muy bajo	<4.0	5	10.20
Bajo	4.1-6.0	11	22.45
Medio	6.1-10.9	24	48.98
Alto	11.0-16.0	5	10.20
Muy alto	>16.1	4	8.16
	Total	49	100

4.9. Pendiente del terreno (%)

En la figura 4.19 se muestran los valores de la pendiente por parcela. El valor promedio fue de 42.71 (± 16.29) con un valor mínimo de 10 y un máximo de 99.5 por ciento, con una coeficiente de variación de 38.14 por ciento. Cabe señalar que el 73.2 por ciento ($n=107$) de las parcelas de café están ubicadas en pendientes mayores de 30 por ciento recomendadas exclusivamente para uso forestal (Cubero, 2001).

En estas condiciones de uso, además de perderse los servicios eco sistémicos generados por el bosque, el cultivo de café no es sostenible, la menos que se acompañe de un sistema integral de conservación, ya que el suelo al combinarse con las fuertes precipitaciones, está expuesto a un ritmo elevado de degradación especialmente por erosión hídrica.

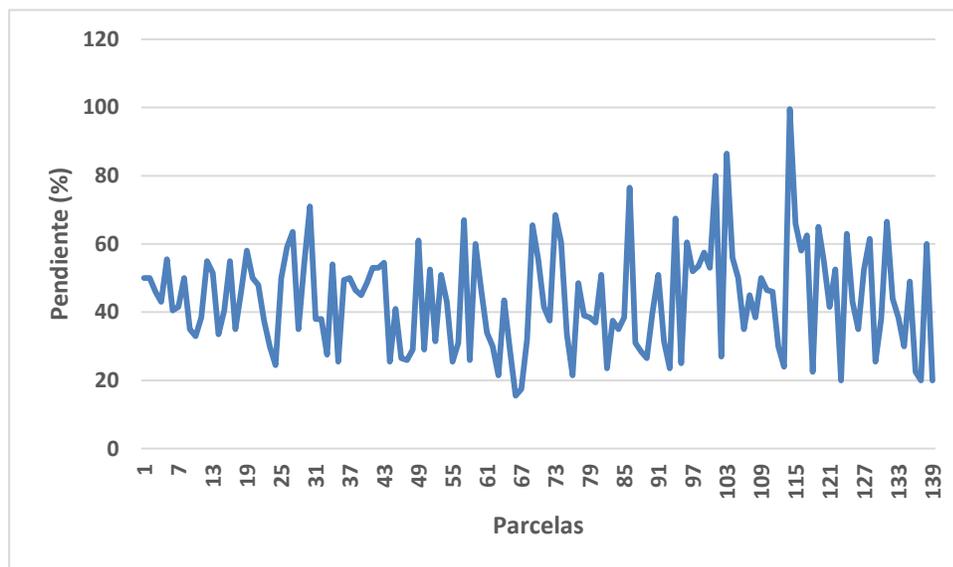


Figura 4.19. Pendiente del terreno (por ciento) en parcelas

4.10. Relaciones entre propiedades

En el cuadro 4.24 se presentan los coeficientes de correlación (R) y de determinación (R^2) que muestran el grado de asociación entre las propiedades físicas del suelo. Se observa que la densidad aparente y el por ciento de porosidad fueron las únicas variables que mostraron una alta asociación ($R=0.947$ y $R^2=0.946$) y en términos estadísticos fue altamente significativa (Prob F=.0000).

Cuadro 4.24. Influencia de la densidad aparente sobre otras propiedades del suelo

Densidad aparente versus:	Coefficiente de correlación R	Coefficiente de determinación R^2	Valor crítico de F
Porosidad (%)	0.947	0.946	0.000
Espacio de poros con agua (%)	0.104	0.011	0.214
Materia orgánica	0.124	0.015	0.394
Peso de la piedra	0.323	0.104	0.000
Volumen de piedra (%)	0.197	0.039	0.017
Infiltración (min/cm)	0.234	0.055	0.004
Contenido de agua (gr/cm^3)	0.175	0.030	0.035

En la figura 4.20 se observa que a medida que aumenta la densidad aparente del suelo disminuye su por ciento de porosidad. Si la densidad aparente resulta de dividir el peso del suelo seco sobre un volumen conocido, y si en las muestras estudiadas el volumen fue constante entonces la variabilidad de la densidad aparente provino de la variabilidad del peso del suelo. Es sabido que entre más peso tiene el suelo en mismo volumen más compactación existe entre las partículas y menos espacio poroso.

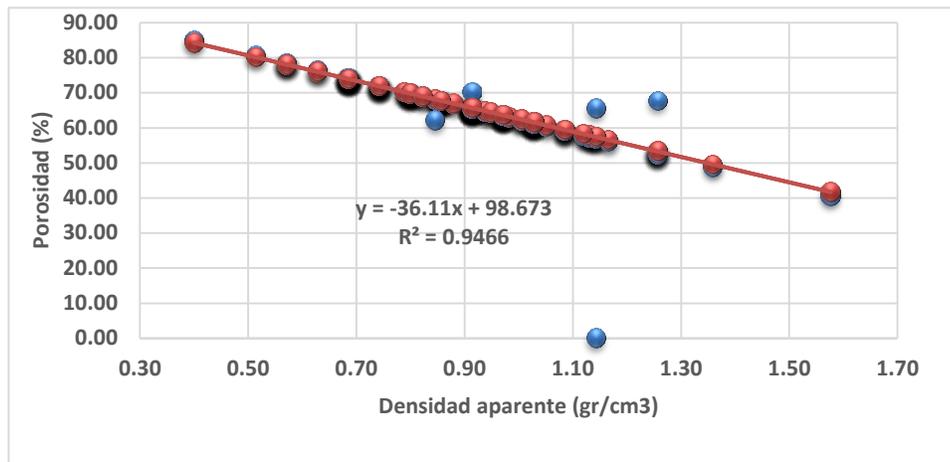


Figura 4. 20. Relación entre densidad aparente y porosidad del suelo (por ciento)

En el cuadro 23 se observa que la materia orgánica no tiene ningún efecto sobre la infiltración, porosidad y contenido de agua en el suelo. Esto probablemente es debido a los niveles altos de materia que tienen la mayoría de los suelos, lo cual no permitió observar diferencias entre ellos.

Cuadro 4.25. Influencia de la materia orgánica sobre otras propiedades de los suelos

Materia orgánica versus:	Coefficiente de correlación R	Coefficiente de determinación R²	Valor crítico de F
Infiltración (min/cm)	0.059	0.003	0.686
Porosidad (%)	0.155	0.024	0.284
Contenido de agua (gr/cm ³)	0.018	0.000	0.898

V. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten aceptar la hipótesis originalmente planteada de que si existen diferencias entre las propiedades físicas de los suelos en la microcuenca la Suiza.

Presentando cada parcela suelos con textura franca en las modalidades de franco arcilloso, francos y franco arcilloso arenosos, considerados como ideales para el cultivo de café. 74.6 por ciento de los sitios tuvieron presencia de piedra en los primeros 10 cm que tiene un efecto sobre algunas propiedades.

Aunque un 75 por ciento de las parcelas tienen suelos moderadamente profundos con el horizonte húmico mayor a los 30 cm que es la zona con mayor densidad de raíces del café, se detectó un grupo de parcelas (25 por ciento) con suelos pocos profundos en donde el horizonte húmico alcanza una profundidad menor a los 30 cm, situación directamente relacionada con las altas tasas de erosión hídrica, ya que el 73 por ciento de las parcelas de café están ubicadas en terrenos con pendientes mayores a 30 por ciento. Se identificó que las parcelas de café con suelos menos profundos fueron previamente cultivadas con maíz con quema de residuos y sin prácticas de conservación.

En general, el 85.7 por ciento de las parcelas tienen una densidad aparente ideal para el crecimiento de las raíces de las plantas en función a la textura. Sin embargo, criterios particulares para el cultivo de café, solo reconocen como ideales al 50 por ciento de los predios. La presencia de piedras no influyó estadísticamente en los valores de densidad aparente.

Aunque el 88.3 por ciento de las parcelas se ubican en las clases de infiltración de rápido y muy rápido, el tiempo promedio requerido para la infiltración de un centímetro de agua en los suelos sin piedras es 6.4 veces más que en los suelos con presencia de piedras y estadísticamente significativo. La rápida velocidad de infiltración, está relacionada con el mayor porcentaje de arena que presentan los suelos en su textura y por la presencia de piedras.

El 98.6 por ciento de las parcelas se ubicaron en las clases de alta y muy alta porosidad con valores por arriba del 50 por ciento de porosidad y no se observó efecto estadístico por la presencia de piedras.

Se observó un efecto estadístico altamente significativo negativo de la presencia de piedras sobre el contenido de humedad en el suelo, ya que los suelos sin piedra en promedio tuvieron 0.08 gr/cm^3 más de agua y presentaron menor variabilidad en los datos que los suelos con piedra, de hecho, sin piedras el valor mínimo de contenido de agua encontrado fue de 0.24 gr/cm^3 , valor 12 veces mayor al valor mínimo encontrado en los suelos con piedra de 0.02. Al parecer los macroporos que genera la presencia de piedras son los responsables de la mayor infiltración del agua en el suelo, que trae como resultado un menor contenido de humedad.

La densidad aparente y el por ciento de porosidad fueron las únicas variables que mostraron una alta asociación ($R=0.947$ y $R^2=0.946$) con muy alta significancia estadística.

Debido a los contenidos medio y alto de materia orgánica que poseen la mayoría de los suelos, no se detectó ningún efecto sobre la infiltración, porosidad y contenido de agua en el suelo.

En general se puede señalar que los suelos estudiados presentan buenas condiciones físicas debido a su origen volcánico, ya que presentan buena textura (francos) y estructura (granular), buena profundidad efectiva, buen drenaje interno, buena capacidad de retención de humedad, aunque requieren acciones de conservación de suelos por ubicarse en zonas de orografía accidentada.

VI. BIBLIOGRAFÍA.

- Aguilera N. 1989 Tratado de Edafología de México, Tomo I, Facultad de Ciencias Universidad Nacional Autónoma de México. Benavides, S.T.1977. Metodos de levantamientos de suelos. Notas de clase. CIAF, Bogotá (inédito).
- Alberich Nistal, T. (2006): "La Agenda 21 de la Cultura. Un instrumento para el desarrollo" Extensión Universitaria. Universidad Jaume I. Castellón.
- AMECAFE. 2010. Padrón nacional cafetalero. Asociación Mexicana de la Cadena Productiva del Café, A.C. México. Cartografía digital.
- Arla, P. (2015). Factores que determinan la productividad del cafetal. In *Textura y estructura* (p. 67).
- Arshad, M.A., B. Lowery, and B. Grossman. 1996. Physical tests for monitorin soil quality. P.123-142. In: J.W. doran and A.J. Jones (eds.) Methods for assessing soil quality. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ.49. SSSA.
- Benzing A. 2001. Agricultura Orgánica. Fundamentos para la Región Andina. Neckar-Verlag, Villingen-Schwenningen. Alemania. 682 p.
- Bojórquez I., A. Hernández, D. García, O. Nájera, F. Flores, A. Madueño, R. Bugarín. 2007. Características de los suelos cambisoles y fluvisoles en la llanura costera norte del estado de Nayarit, México. *Cultivos Tropicales*, vol. 28, núm. 1, 2007, pp. 19-24.
- Buckman Harry and N.C. Brady, 1966. The Nature and Properties of Soils. The Macmillan company. 590 pp.
- Castro-Mora, J. 1999. Estructura geológica del estado de Chiapas. Instituto de Geofísica, UNAM.

Centro GEO. 2014. Edafología: Cambisoles.
http://www.centrogeo.org.mx/ciberatlas/chapala/lagoyentorno/paisa_ecolo/cambisoles.htm. Revisado en mayo de 2014.

Cisneros, A. R. 2003. Apuntes de la materia de riego y drenaje. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado y Area Agrogeodésica. 164 p.

Colmenares E, A. (2012). Metodologías participativas. En Investigación-Acción Participativa: Una Metodología integradora del Conocimiento y la Acción Latinoamérica. Vol 1, p 4.

Conservación Internacional. 2011. Estrategia del sector cafetalero para la adaptación, mitigación y reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático de la Sierra Madre de Chiapas. 80 p.

Cubero, F. 2001. Clave de bolsillo para determinar la capacidad de uso de las tierras. 1° ed. San José. CR. ACCS. MAG. ARAUCARIA. 200. 19 p.

Diario Oficial. 2002. Interpretación de Resultados de Materia Orgánica. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreos y análisis. DOF del día martes 31 de diciembre de 2002. México. 85 p.

FAO. 2014 Propiedades del suelo. Propiedades químicas. En portal de suelos. Consultado en <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-quimicas/es/>.

FAO. 2015. Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. Nota sobre el 2105: año internacional de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 4 p.

FAO. 2015a. Portal de suelos de la FAO. Propiedades Físicas del suelo. Consultado en: <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/es/>.

Fassbender, H.W; Bornemiza, E. 1987. Química de suelos. San José, Costa Rica., IICA. 420p.

Flores D. L., Alcalá M. R. 2005. Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos. Departamento de Edafología. Instituto de Geología. UNAM. 56 p.

Geilfus F. 1997. 80 herramientas para el desarrollo rural participativo: diagnóstico, planificación, monitoreo, evaluación. IICA. SAGARPA. México. 208 p.

Geissert D., Barois I., Mólgora A., Mokondoko P., Maas K., Manson R. (2013). Manual para el manejo sustentable del suelos en cafetales de sombra. FORDECYT. CONACYT. Café In Red. FUNTEC. Jalapa. Veracruz. México. 51.pag.

Instituto Nacional de Ecología (INE) & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). 1999. Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera El Triunfo. http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/triunfo.pdf . Revisado en mayo de 2014.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Conjunto de datos vectorial Geológicos, Serie I (Conjunto Nacional).Escala 1: 250 000.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2009. Diccionario de datos Edafológicos. www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reccnat/edafología/?_file=. Revisado en mayo de 2014.

Küpper A.1981. Factores climáticos y edáficos cultura cafeira.in nutricao eadubacao do cafeeiro.Ed.E.Malavolta,T.Yamada e J.A.Guidolin. Instituto da Potassa & Fosfato,Piracicaba. 27-89pp.

Lafitte H.R. 1993. Identificación de problemas en la producción de maíz tropical. Guía de campo. México, D.F.: CIMMYT. 122 p.

- López-Báez, W., R. Magdaleno-González, I. Castro-Mendoza. 2012. Riesgo a deslizamientos de laderas en siete microcuencas de la Reserva de la Biósfera El Triunfo. Libro Técnico No. 7. Campo Experimental Centro de Chiapas, INIFAP. Ocozocoautla, Chiapas, México. 208 p.
- López B. W., Castro M. I., Camas G. R., Villar S. B., López M. J. 2013. El manejo de cuencas como herramienta para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. Folleto Técnico No. 19. Campo Experimental Centro de Chiapas, INIFAP. Ocozocoautla, Chiapas, México.
- López B. W., Palacios H. b., Castro M. I., Salinas C. E., Santos R.R. 2015. Diagnóstico de los servicios ecosistémicos en la Reserva de la Biósfera El Triunfo, Chiapas, México. Nota de Investigación. Campo Experimental Centro de Chiapas. 20 p.
- López B. W., Castro M. I., Santos R.R. 2014. Propuesta integrada de adaptación al cambio climático en la Sierra Madre de Chiapas, México. Desplegable informativo No.3. Campo Experimental Centro de Chiapas. INIFAP.
- López B. W., Castro M. I., Salinas C. E., Santos R.R. 2015. La microcuenca la Suiza en Montecristo de Guerrero, Chiapas. Desplegable informativo No.4. Campo Experimental Centro de Chiapas. INIFAP.
- Lowery, B., M.A. Arshad, R. Lal, and W. J. Hickey. 1996. Soil water parameters and soil quality. In: J.W. Doran and A. J. Jones (eds.) Methods for assessing soil quality. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 49.SSSA, Madison, WI. Pp.143-157.
- Madison, WI. Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics. 2nd. Ed. Academic Press, London.
- Mancilla, E. G. 2008. Uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en el Campo Forestal. Uso y Conservación de Suelos. Apuntes Docentes. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 64 p.

- Mülleried F. K. 1982. Geología de Chiapas. Colección de libros de Chiapas. Serie Básica de Publicaciones del Gobierno del estado de Chiapas. 2ª Edición. Tuxtla Gutiérrez.
- PASOLAC. 2010. Guía técnica de conservación de suelos y agua. Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central. El Salvador, C. A. 222 p.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo M., Roquero De Laburu C., 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente, Tercera edición; Impreso en España, Ediciones Mundi-prensa, pp.929.
- Quijano j. (2008). Importancia del análisis del suelo cafetaleros (PROCAFE). In Textura de los suelos.
- Schroth, G.; Laderach, P.; Dempewolf, J.; Philpott, S.; Haggar, J.; Eakin, H.; Castillejos, T.; Garcia, J.; Soto, L., Hernández, R.; Eitzinger, A.; Villegas, J. 2009. Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, México. Springer Science + Business Media B.V. 2009, Mitig Adapt Strateg Glob Change- DOI 10.1007/s11027-009-9186-5.
- Serrano-Altarimano. V.; Díaz-Padilla, G.; López-Luna, A.; Cano-García, M.A.; Báez-González, A. D. y Garrido-Ramírez, E.R.; 2006. Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Chiapas. (Período 1961-2003). INIFAP. SAGARPA: Libro Técnico No. 1. Ocozocoautla, Chis., México. 186 p.
- Stauffer, A. 1963. Geología: Principios y procesos. 5ª Edición. Ediciones del Castillo S. A. España, Madrid. 491 p.
- USDA. 1999. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Departamento de Agricultura. Instituto de Calidad de los Suelos. 88 p.
- Valencia A. G. 1998. Fisiología, nutrición y fertilización del café. International Plant Nutrition Institute. IPNI. 10 p.

Volke -Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J.A., de la Rosa Pérez, D.A., 2005. Suelos Contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación, Secretaria de Medio ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Impreso en México. Pp 19-31.

Wooding G., 1967. Los Suelos, Su Origen, Constitución y Clasificación, Ediciones Omega S.A. Barcelona. McGraw-Hill Interamericana quinta edición 2005 impreso en México. Pp. 31-739.

Zumberge, J. H. 1974. Geología elemental. 1ª Edición. Continental S.A. México. 355 p.