



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE CIENCIAS

**IMPACTO DE LAS ZANJAS TRINCHERA SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO EN  
LADERAS MEDIAS DEL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA

**EUNICE LUCERO GALVÁN DÍAZ**

DIRECTORA DE TESIS

DRA. HELENA COTLER ÁVALOS



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

1. Datos del alumno  
Galván  
Díaz  
Eunice Lucero  
53 82 20 59  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
308173758
  
2. Datos del tutor  
Dra.  
Helena  
Cotler  
Ávalos
  
3. Datos del sinodal 1  
Dra.  
Christina Désirée  
Siebe  
Grabach
  
4. Datos del sinodal 2  
Dra.  
Silke  
Cram  
Heydrich
  
5. Datos del sinodal 3  
Dra.  
Lucía Oralia  
Almeida  
Leñero
  
6. Datos del sinodal 4  
M. en C.  
Karl Jürgen  
Hoth  
Von der Meden
  
7. Datos del trabajo escrito  
Impacto de las zanjas trinchera sobre la calidad del suelo en laderas medias del Parque  
Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl  
120 pp.  
2016

“El amor de Genaro es el mundo -decía-. Ahora mismo estaba abrazando esta enorme tierra, pero siendo tan pequeño, no puede sino nadar en ella. Pero la tierra sabe que Genaro la ama y por eso lo cuida.

...Un guerrero siempre está alegre porque su amor es inalterable y su ser amado, la tierra, lo abraza y le regala cosas inconcebibles. La tristeza pertenece sólo a esos que odian al mismo ser que les da asilo.

...Don Juan volvió a acariciar el suelo con ternura.-Este ser hermoso, que está vivo hasta sus últimos resquicios y comprende cada sentimiento, me dio cariño, me curó de mis dolores y finalmente, cuando entendí todo mi cariño por él, me enseñó lo que es la libertad.”

Carlos Castaneda. Relatos de Poder. 1975.

Dedico este trabajo a los próximos estudiantes (sean científicos de la Tierra o no) cuyo amor o intensa curiosidad por los suelos ha despertado ya, esperando que este trabajo les sea de ayuda.

Lo dedico también al legado de todas aquellas personas que se han dedicado a contribuir en el fascinante mundo de las Ciencias del Suelo. Reconocidos y anónimos, han despertado en mí el amor, respeto y admiración hacia el suelo.

## Agradecimientos

Agradezco profundamente a todas aquellas personas que hicieron posible este trabajo.

A la Dra. Pilar Fernández Lomelín del Instituto de Geografía y al M. en C. Manuel Hernández de la Unidad de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencias de la UNAM, por brindarme su asesoría y su gran apoyo en la parte metodológica del trabajo.

A la Dra. Lucy Mora, la maestra Kumiko Shimada, al Sr. Mario Rueda Cruz y a la maestra Iris Suárez del Instituto de Geología de la UNAM, por su amable asistencia en el laboratorio.

A la Dra. Silke Cram, al Dr. Sergio Martínez Trinidad y a la geógrafa Andrea Ramírez Santiago por su colaboración en campo. A mi compañera y amiga Stephanie Chantal por brindarme su apoyo y acompañarme en esta aventura (y las que aún no llegan).

Al personal del Parque Nacional el Geog. Agustín Tagle Urrutia y el Ing. Miguel Ángel Crispín Isidro por las atenciones brindadas en campo.

Al Servicio Meteorológico Nacional por proporcionarme la información necesaria para elaborar mi trabajo.

A la Dra. Helena Cotler, la Dra. Christina Siebe, la Dra. Elizabeth Solleiro, el Dr. Jaime Díaz y el M. en C. Arturo Sánchez por impartir las asignaturas que me hicieron descubrir la fascinación por el extraordinario mundo del suelo.

A la Dra. Helena Cotler y la Dra. Christina Siebe por inspirarme el amor incansable hacia el suelo.

# ÍNDICE

1.	Introducción .....	2
2.	Justificación .....	4
3.	Objetivos .....	5
4.	Hipótesis.....	6
5.	Marco teórico.....	7
	5.2. Calidad y salud del suelo .....	7
	5.2. Indicadores de la calidad del suelo .....	8
	5.3. Degradación y pérdida del suelo.....	11
	5.4. Conservación de suelos.....	13
	5.5. Las zanjas trinchera .....	14
	5.6. Las Áreas Naturales Protegidas.....	16
	5.7. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl .....	18
6.	Caracterización del área de estudio.....	23
	6.1. Localización .....	23
	6.2. Los factores formadores potenciales de los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.....	24
7.	Metodología .....	30
	7.1. Localización de los sitios de estudio.....	30
	7.2. Descripción de la calidad de sitio .....	33
	7.3. Estudio de las zanjas trinchera .....	34
	7.4. Efectos de las zanjas trinchera .....	36
	7.5. Impacto de las zanjas sobre las funciones de los suelos.....	38
	7.6. Presencia de erosión y grado de agregación.....	39
	7.7. Análisis de laboratorio.....	40
	7.8. Análisis Estadístico .....	45
8.	Resultados y Análisis de Resultados.....	46
	8.1. Calidad de sitio .....	46
	8.2. Las zanjas trinchera .....	62
	8.3. Efectos de las zanjas trinchera .....	64
	8.4. Impacto de las zanjas en las funciones del suelo.....	66
	8.5. Presencia de erosión y grado de agregación.....	67
	8.6. Transporte de sedimentos en el bordo.....	70

9.	Discusión .....	73
10.	Conclusiones.....	77
11.	Referencias.....	78
12.	ANEXOS .....	90



## Índice de cuadros

Cuadro 1. Indicadores de la calidad del suelo que reflejan propiedades relacionadas con las funciones del suelo. ....	10
Cuadro 2. Tipos de degradación del suelo. ....	11
Cuadro 3. Tipos de prácticas mecánicas. ....	14
Cuadro 4. Localización de los sitios de estudio. ....	31
Cuadro 5. Tiempo de construcción de las zanjas y empresas que las fomentaron. ....	34
Cuadro 6. Descripción del perfil del pastizal sin zanjas. ....	48
Cuadro 7. Propiedades del perfil determinadas en laboratorio en el sitio de pastizal (PC). ....	49
Cuadro 8. Propiedades del perfil determinadas en la evaluación edafocológica. ....	49
Cuadro 9. Velocidad de infiltración y conductividad hidráulica en el pastizal y precipitación. ....	51
Cuadro 10. Descripción del perfil en el pastizal con zanjas. ....	52
Cuadro 11. Propiedades del perfil determinadas en laboratorio en el sitio de pastizales (PZ). ....	53
Cuadro 12. Propiedades del perfil determinadas en la evaluación edafocológica. ....	54
Cuadro 13. Descripción del perfil en el bosque sin zanjas. ....	56
Cuadro 14. Propiedades del perfil determinadas en laboratorio en el sitio de bosque (BC). ....	56
Cuadro 15. Propiedades del perfil en bosque con base en la evaluación edafocológica. ....	57
Cuadro 16. Velocidad de infiltración y conductividad hidráulica del bosque de pino y precipitación. ....	58
Cuadro 17. Descripción del perfil del bosque con zanjas. ....	60
Cuadro 18. Descripción del perfil del bosque con zanjas. ....	61
Cuadro 19. Propiedades del perfil en bosque con base en la evaluación edafocológica. ....	61
Cuadro 20. Dimensiones y número de zanjas para los sitios de Pastizal subalpino (PZ) y Bosque de pino (BZ) y recomendadas por CONAFOR. ....	62
Cuadro 21. Dimensiones de los bordos en los sitios de estudio. ....	63
Cuadro 22. Impactos de las zanjas trincheras en los sitios de pastizal y bosque. ....	65
Cuadro 23. Prueba ANOVA por fracción de agregados en los sitios de pastizal y bosque. ....	69
Cuadro 24. ANOVA por grupos de agregados en el pastizal y el bosque. ....	69
Cuadro 25. Alturas medidas en las estacas en el primer y segundo periodo para los sitios de bosque y pastizales. ....	70
Cuadro 26. Perfil 1 Pastizal subalpino con zanjas. ....	90
Cuadro 27. Evaluación edafocológica del perfil 1. ....	91
Cuadro 28. Evaluación edafocológica Perfil 1 (continuación). ....	92
Cuadro 29. Perfil 2. Bosque de pino con zanjas. ....	93
Cuadro 30. Evaluación edafocológica del perfil 2. ....	94
Cuadro 31. Evaluación edafocológica del perfil 2 (continuación). ....	95
Cuadro 32. Perfil 3. Pastizal subalpino sin zanjas. ....	96
Cuadro 33. Evaluación edafocológica del perfil 3. ....	97
Cuadro 34. Evaluación edafocológica del perfil 3 (continuación). ....	98
Cuadro 35. Perfil 4. Bosque de pino sin zanjas. ....	99
Cuadro 36. Evaluación edafocológica del perfil 4. ....	100
Cuadro 37. Evaluación edafocológica del perfil 4 (continuación). ....	101
Cuadro 38. Resultados de los indicadores físicos y químicos obtenidos en el laboratorio por muestra. ....	102
Cuadro 39. Textura de los horizontes de cada perfil de suelo. ....	104
Cuadro 40. Porcentaje de agregados por tamaño y grupo de agregados (MA, MeA y $\mu$ A). ....	105
Cuadro 41. Dimensiones de las zanjas y bordos medidos en campo. ....	106
Cuadro 42. Toneladas calculadas de suelo removido de las zanjas en el sitio de pastizal. ....	107
Cuadro 43. Toneladas calculadas de suelo removido de las zanjas en el sitio de bosque. ....	108
Cuadro 44. Precipitación, temperatura y humedad relativa de las EMAs y valores promedio. ....	109

## Índice de figuras

Figura 1. Impacto de la erosión del suelo a diferentes escalas.....	12
Figura 2. Disposición de las zanjas trinchera en la zona de pastizales .....	14
Figura 3. Diagrama de las zanjas trinchera.....	15
Figura 4. Ubicación regional del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y límites geográficos.....	23
Figura 5. Precipitación, temperatura del aire y humedad relativa del sitio de estudio del periodo de octubre del 2014 a septiembre del 2015. ....	26
Figura 6. Diagrama general de la dinámica hidrográfica y el clima en función de la altitud en las laderas del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.....	26
Figura 7. Ejemplos de riqueza florística presente en el Parque Nacional. ....	28
Figura 8. Suelos encontrados en diferentes regiones del Parque Nacional .....	30
Figura 9. Imagen LandSat que muestra la localización de los sitios de estudio. ....	32
Figura 10. Detalle del trabajo realizado en campo.....	33
Figura 11. Diagrama de las zanjas seleccionadas aleatoriamente.....	35
Figura 12. A) Medidas tomadas en la zanja y b) Medidas tomadas en el bordo.....	35
Figura 13. Puntos seleccionados para la prueba de estabilidad de agregados para las muestras en a) El frente de la zanja y b) El bordo de la zanja.....	39
Figura 14. Disposición de las estacas colocadas en el sitio de a) bosque de pino y b) pastizal. ....	40
Figura 15. Análisis de laboratorio.....	45
Figura 16. Zona de pastizal subalpino. ....	46
Figura 17. Perfil de suelo en pastizales sin zanjas (PC).....	48
Figura 18. Velocidad de infiltración en las tres posiciones de la ladera en el pastizal. ....	50
Figura 19. Perfil de suelo en pastizales (PZ). ....	53
Figura 20. Panorama del bosque de pino con pastizal. ....	54
Figura 21. Velocidad de infiltración en las tres posiciones de la ladera en el bosque de pino. ....	58
Figura 22. Perfil de suelo en el bosque de pino (BZ). ....	60
Figura 23. Aspecto de los bordos en a) bosque de pino y b) pastizal .....	63
Figura 24. Densidad aparente y porosidad entre los bordos de las zanjas y los puntos control .....	64
Figura 25. Impacto de la superficie en una hectárea en a) el pastizal subalpino y b) el bosque de pino por zanja y bordo.....	66
Figura 26. Diagrama de barras que muestra la cantidad de COS por sitio que se remueve por la excavación de zanjas.....	67
Figura 27. Distribución de los agregados obtenidos por tamaño de los bordos y frentes de zanja y de los puntos control para a) bosque de pino y b) pastizal.....	67
Figura 28. Agregados macroagregados (MA), mesoagregados (MeA) y microagregados ( $\mu A$ ) en a) bosque y b) pastizal. ....	68
Figura 29. Número de frecuencias registradas en la posición de los bordos (cima, ladera y pie) para los sitios de a) pastizal y b) bosque. ....	71
Figura 30. a) Estacas colocadas en el pastizal y b) en el bosque. Evidencias de movimiento de partículas a partir de c) formación de pedestales, d) y f) sedimentos debajo de la marca inicial de la estaca, e) Acumulación de sedimentos impregnados en las estacas.....	72

# **Impacto de las zanjas trinchera sobre la calidad del suelo en laderas medias del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl**

## **Resumen**

La presente investigación consistió en evaluar el efecto de una práctica de conservación llamada zanjas trinchera sobre la calidad y la conservación de los suelos en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Tales zanjas se excavaron con el objeto de captar y almacenar el agua que precipita para ser infiltrada hasta los mantos freáticos. Es necesario evaluar esta práctica ya que en esta zona no se ha estudiado ningún efecto que ésta pueda tener sobre el suelo, aunado a que las condiciones ambientales son distintas a las que recomienda la organización que las fomentó.

De acuerdo a lo anterior se planteó que las zanjas trinchera podrían tener efectos negativos sobre las propiedades de los suelos, afectando su calidad y con ello la conservación del mismo. Para ello se compararon un sitio con zanjas trinchera y un sitio sin práctica (sitio control) en dos tipos de vegetación dominante: pastizal subalpino y bosque de pino, en sitios con condiciones de altitud, suelos y geoformas invariables. Para estudiar la calidad del suelo de los sitios con y sin zanjas se emplearon diferentes indicadores físicos, químicos y biológicos determinados en campo a través del estudio de perfiles de suelo en cada sitio y de muestras analizadas en laboratorio. Asimismo se identificó la presencia de erosión del suelo con el arrastre de sedimentos del suelo removido por la excavación de zanjas, empleando la técnica de estacas de erosión colocadas en un periodo de cinco meses.

Los principales resultados en las propiedades del suelo fueron la disminución en la porosidad del suelo en el bosque de pino y la disminución en la estabilidad de los agregados del suelo del pastizal. Las zanjas promueven, entre otros efectos, la erosión del suelo en los sitios, la exposición de carbono y la pérdida de almacenamiento de carbono, lo que conlleva a un efecto negativo en la calidad del suelo de ambos sitios, influyendo en la conservación del recurso del Parque Nacional.

## 1. Introducción

El suelo cumple con múltiples funciones que son indispensables para la dinámica del ecosistema. Que un suelo pueda llevar a cabo sus funciones de manera óptima según sus características, determina su calidad. Al ser resultado de un conjunto de factores de formación (material parental, relieve, clima y organismos) que se desarrollan en función del tiempo, un tipo de suelo tendrá las características propias de tales factores y con ello capacidades específicas para llevar a cabo sus funciones (Jenny, 1994).

La calidad del suelo está en función de sus propiedades químicas, físicas y biológicas y por tanto será evaluada a través de estas propiedades, las cuales adquieren el término de indicadores de la calidad del suelo (Etchevers, 1999; Siebe et al., 1999).

Al ser un recurso natural no renovable, la degradación y la pérdida del suelo- ocasionadas en gran medida por un manejo inadecuado del recurso- tiene efectos en su calidad y puede desencadenar otros procesos de deterioro ambiental con efectos socio-económicos. Por ello la necesidad de conservar este recurso es primordial en todos los contextos.

La conservación de los suelos definida como toda acción enfocada al uso adecuado de este recurso para que su calidad pueda mantenerse (Van Kooten, 1993; Burnell y Clawson, 2011), es un propósito que se ha intentado conseguir por medio de técnicas aplicadas a diferentes usos del suelo: sea agrícola, de aprovechamiento forestal o urbano. Cada práctica debe considerar las condiciones ambientales y sociales sobre las que se han de implementar.

A nivel nacional sin embargo, las prácticas de conservación -que consisten primordialmente de actividades mecánicas- no llevan a cabo un diagnóstico adecuado de las condiciones del sitio (Cotler et al., 2007), como es el caso de las zanjas trinchera, que resulta la principal obra de conservación que realiza CONAFOR (Cotler et al., 2015), asegurando que retienen sedimentos e infiltran el agua que acumulan (CONAFOR, 2007).

CONAFOR (2007) recomienda esta práctica en sitios con condiciones tales como regiones áridas o semiáridas y templadas con pendientes no mayores a 40%, en laderas sin vegetación o con poca vegetación y en suelos con alta permeabilidad. No obstante no se plantea la posibilidad de que en sitios con características diferentes, las zanjas generen efectos negativos.

En México, los estudios de los impactos de las zanjas trinchera sobre la calidad de los suelos son limitados, siendo escasos los trabajos que plantean el impacto de éstas en la calidad y conservación del suelo tales como en Cotler et al. (2013 y 2015). Dichos estudios se desarrollaron en diversas localidades del país con características ambientales diferentes como el tipo de material parental, climas de muy secos a cálidos-húmedos, vegetación desde matorral espinoso, bosques de pino y encino a pastizales y cultivos de maíz, altitudes de 615 a 2 650 msnm, pendiente de 3° a 16° y suelos con texturas de francas a arcillo limosas. Como principales resultados se apunta a que las zanjas trinchera no mejoran características edáficas importantes sobre la calidad del suelo (Cotler et al., 2013) y que la excavación remueve grandes cantidades de suelo (60-123 ton/ha) que se expone a la erosión (Cotler et al., 2015).

Las zanjas trinchera se han promovido desde el año 2005 en diversas zonas del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl por parte de la CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) y el financiamiento de diferentes organismos del sector privado.

En el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl se han desarrollado diversos tipos de suelos cuyas características ambientales (Aceves, 1967; Castro, 2009; López-López, 2014) son diferentes a las que se recomiendan para implantar zanjas trinchera. Este hecho podría representar un riesgo para la integridad del suelo del Parque Nacional, por lo que es fundamental una evaluación de los efectos de estas prácticas sobre la calidad de los suelos de la región.

## 2. Justificación

La motivación de este trabajo surge del interés de conocer el efecto que ha tenido la construcción de zanjas trincheras sobre los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, las cuales se construyeron bajo diversas condiciones ambientales de pendiente, altitud, tipos de vegetación y suelos.

En esta zona no existe ninguna evaluación completa que muestre la efectividad de estas zanjas sobre su principal propósito que es la captación de agua de lluvia y la recarga de mantos acuíferos, así como tampoco estudios sobre los efectos de esta práctica en otros sistemas como el suelo. Por otra parte el actual Programa de Manejo del Parque Nacional no cuenta con un diagnóstico que detalle algún problema de degradación del suelo.

Ante este hecho y como lo plantea la LGEEPA (art. 30) es necesario desarrollar estudios que posean un enfoque integral de todos los sistemas naturales que se incluyen en el sitio, como un plan más adecuado para visualizar los efectos que puedan desencadenar cualquier tipo de intervención antrópica.

La intención particular de este trabajo es revelar como afecta este tipo de prácticas en uno de esos sistemas naturales: el suelo, analizando el impacto que pueda ocasionar sobre su calidad a través del estudio de las propiedades que reflejen el cambio en las funciones hidrológicas y de reserva de carbono.

Ya que una buena calidad de suelo puede promover una mejor conservación del mismo, los resultados podrían proporcionar información de la conservación del recurso, lo cual es fundamental si se considera el hecho de que la zona de estudio es un Área Natural Protegida cuyo propósito es el de la conservación de los ecosistemas.

### **3. Objetivos**

#### **a. Objetivo general**

El trabajo propuesto tiene como objetivo evaluar el impacto que tienen las zanjas trinchera sobre la calidad y conservación de los suelos en las laderas medias de los volcanes del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl en zonas de pastizales naturales subalpinos y bosques de pino.

#### **b. Objetivos particulares**

- Llevar a cabo una evaluación edafocológica de los suelos de los sitios de bosques y pastizales donde se excavaron zanjas y en sitios donde no se llevaron a cabo estas prácticas de conservación.
- Determinar la cantidad por hectárea y las dimensiones de las zanjas trinchera y compararlas con los lineamientos establecidos del manual de CONAFOR (2012b).
- Valorar los efectos que tendría la excavación de las zanjas trinchera como la cantidad de suelo removido, la superficie de suelo cubierta y el carbono orgánico expuesto.
- Determinar el impacto de las zanjas trinchera sobre la calidad de los suelos en términos del almacenamiento de carbono.
- Evaluar la presencia de erosión del suelo removido y comparar el grado de agregación entre el suelo no perturbado y el suelo removido.

#### **4. Hipótesis**

La remoción de suelo ocasionada por la excavación de las zanjas trinchera tendría un efecto negativo en los suelos de las zonas donde se construyeron dichas prácticas, influyendo en sus funciones de almacenamiento de carbono y agregación de las partículas del suelo, volviéndolos vulnerables a los procesos de erosión y afectando la conservación del mismo recurso.



## 5. Marco teórico

### 5.1. Calidad y salud del suelo

El suelo juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico puesto que en él se infiltra y se retiene el agua, posibilitando la recarga de mantos freáticos. Su sistema poroso, su fracción orgánica y mineral participan en la filtración, amortiguamiento y transformación de sustancias inocuas y nocivas tanto para el suelo mismo como para otros sistemas. Es además el sustento de la vida, lo cual implica enormes significados:

- Es un medio donde se desarrolla la vegetación y por tanto participa sustancialmente en las redes tróficas.
- Es el hábitat de macro y microorganismos
- Proporciona la fuente de alimento para los seres humanos

Desde 1980 con la Estrategia para la Conservación del Mundo (UICN, 1980) y posteriormente en 1992 con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, en Río de Janeiro, con la iniciativa de monitorear una silvicultura sustentable, se consideró en un principio a la *productividad del suelo* como la habilidad de éste para funcionar dentro de un amplio ecosistema donde las funciones podrían incluir la producción de la biomasa, el almacenamiento de carbono y desechos biorremediados (Burger, 1999). De tal forma una alta productividad en los suelos era reflejo de una alta capacidad sustentable.

Posteriormente se introdujo un término más integral denominado calidad del suelo. Karlen et al. (1997) definen a la calidad del suelo como *la capacidad de un suelo de funcionar dentro de los límites del ecosistema natural o manejado, sosteniendo la productividad de la flora y la fauna, manteniendo o mejorando la calidad del aire, el agua, la salud humana y el hábitat.*

Otros autores (Burger, 1999; Doran y Zeiss, 2000) definen calidad del suelo como una expresión de los atributos del suelo dentro de parámetros creados por los factores del sitio (factores formadores) y relativa a las necesidades de las especies biológicas.

La calidad del suelo comprende componentes inherentes determinados por las propiedades físicas, químicas y biológicas (Doran y Zeiss, 2000) que derivan de procesos edafogénicos (Porta, 2008) y las interacciones de dichas propiedades (Ramírez Gutiérrez, 2008), así como componentes dinámicos que son afectados por el manejo o disturbios naturales (Carter, 2002; Porta, 2008; USDA, 2008).

Por otra parte existe el término de *salud del suelo*, que concibe al suelo como un sistema dinámico viviente cuyas funciones son mediadas por la diversidad de organismos vivientes. A diferencia de la calidad del suelo, se define a la salud como *la continua capacidad del suelo para funcionar como un sistema viviente vital, que contiene elementos biológicos que son claves para las funciones del ecosistema dentro de los límites naturales* (Doran & Zeiss, 2000).

## 5.2. Indicadores de la calidad del suelo

Dada la naturaleza compleja del suelo, no se cuenta con estándares oficiales establecidos para evaluar su calidad. Las propiedades que describen a las funciones del suelo no pueden ser medidas directamente, sin embargo pueden emplearse sustituyentes medibles conocidos como *indicadores de la calidad del suelo* (Carter, 2002). Los indicadores pueden ser variables de estado con una unidad de medida o un proceso complejo que involucra un conjunto de variables del suelo. (Burger 1999).

Para elegir los indicadores apropiados deben existir ciertos criterios. Algunos autores (Doran & Zeiss, 2000; Kinyangi, 2007; Porta, 2008) hacen referencia de cómo deben ser estos criterios:

- Fáciles de medir y rápidos en términos de tiempo y dinero.
- Sensibles a las variaciones climatológicas, reflejando la influencia del manejo y los cambios del clima a largo plazo.
- Representativos de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.
- Capaces de medir cambios en las funciones del suelo a escalas de punto y paisaje.
- Deben correlacionar funciones del suelo.

Ya que la calidad del suelo está en función de sus propiedades químicas, físicas y biológicas (Etchevers, 1999; Siebe et al., 1999) los indicadores se clasifican del mismo modo.

**Indicadores físicos.** Corresponden a aquellas propiedades que proveen información de las condiciones físicas relacionadas con la aireación y el estado hidrológico del suelo tales como la textura, estructura, pedregosidad, color, densidad aparente, porosidad y estabilidad de agregados. La infiltración, la capacidad de campo y la conductividad hidráulica son indicadores que resultan de la interacción de los indicadores anteriores.

Se ha analizado que la textura del suelo es fundamental para el control de nutrientes, el intercambio de oxígeno, la retención e infiltración de agua y la disponibilidad para las plantas así como el balance entre los fluidos agua y aire (Schoenholtz, 2000). El contenido de materia orgánica y la estabilidad de agregados son factores que están asociados comúnmente a la capacidad de campo (Bronick y Lal, 2005), así mismo la agregación del suelo está fuertemente influenciada por la materia orgánica del suelo (Grigal, 2000).

**Indicadores químicos.** Atributos tales como el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico, la disponibilidad de ciertos elementos -como el potasio, fósforo y nitrógeno- y la presencia de carbonatos, representan el estado y la dinámica química que se lleva a cabo en el suelo, mayoritariamente en la solución acuosa del suelo.

El pH es un indicador fundamental cuyos valores proporcionan información de la actividad química del suelo cuando se relacionan con otras propiedades. Por ejemplo, un pH de 6.6 a 7.3 es favorable para las actividades microbianas que contribuyen en la disponibilidad de nitrógeno, azufre y fósforo en el suelo. Un pH de 6 a 7 generalmente es muy favorable para el crecimiento de las plantas ya que todos los nutrientes están disponibles (USDA, 1998).

**Indicadores biológicos.** Estos indicadores son más sensibles a los cambios en las condiciones del suelo y a las prácticas de manejo (De la Rosa y Sobral, 2005) y por tanto se consideran como representantes de la calidad dinámica del suelo. Ellos son el contenido de materia orgánica, la biomasa microbiana, la tasa de respiración y actividad enzimática, así como la abundancia, diversidad y estabilidad de las comunidades de organismos (Doran y Zeiss, 2000).

La materia orgánica del suelo juega un papel fundamental en las funciones del suelo. El incremento de carbono en el suelo contribuye a la formación de agregados que a su vez incrementan la capacidad de retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico (Delgado et al., 2013); además eleva la productividad biológica y representa un sumidero de CO<sub>2</sub> atmosférico (Kinyangi, 2007). Por su parte la fauna edáfica, como la materia orgánica, influye sobre la estructura del suelo y juega un papel importante en los procesos de infiltración de agua, al formar galerías que aumentan la porosidad del suelo (Ramírez Gutiérrez, 2008). En el cuadro 1 se presentan algunos indicadores del suelo relacionados con las propiedades y las funciones del suelo.

**Cuadro 1.** Indicadores de la calidad del suelo que reflejan propiedades relacionadas con las funciones del suelo.

Indicador	Proceso	Función	Autores
Textura Estructura Densidad aparente Porosidad Estabilidad de agregados Capacidad de campo Conductividad hidráulica	Retención e infiltración de agua Respiración, intercambio de gases Penetración de raíces	Filtro y regulación del ciclo hidrológico. Hábitat de macro y micro fauna	Bautista Cruz et al., 2004. Bronick y Lal, 2005.
Materia orgánica	Almacén de nutrientes, actividad biológica	Productividad biológica. Reserva de carbono y regulación del clima. Faculta las cadenas tróficas.	Karlen et al., 1997. Doran y Zeiss, 2000. Kinyangi, 2007.
pH Conductividad eléctrica Capacidad de Intercambio Catiónico N, P y K disponibles	Actividad biológica y química, Disponibilidad de nutrientes y movilidad de sustancias orgánicas e inorgánicas. Disponibilidad de nutrientes para las plantas. Productividad biológica. Presencia o ausencia de salinidad.	Filtro, amortiguamiento y transformación de sustancias.	Bautista Cruz et al., 2004. Kinyangi, 2007. Karlen et al., 2008.

El concepto de calidad de suelo ha sido introducido para conducir a las acciones de sustentabilidad del suelo a través de la investigación, la planeación y las políticas de conservación para enfrentar las diversas problemáticas que han surgido a causa del mal manejo de los suelos, especialmente aquellos destinados al uso agrícola (Doran y Zeiss, 2000, Doran, 2002 y Bronick y Lal, 2005).

### 5.3. Degradación y pérdida del suelo

Para diversos autores (Hudson, 1993; Oldeman, 2000; Porta, 2003; Porta, 2008) la degradación del suelo es la disminución o pérdida de la utilidad actual y potencial de las propiedades del suelo, refiriéndose como potencial a la capacidad futura del suelo para funcionar. La degradación ha sido ocasionada mayoritariamente de manera inducida por un manejo inadecuado de las actividades antrópicas. La degradación del suelo abarca dos grupos principales como se presentan en el cuadro 2.

**Cuadro 2.** Tipos de degradación del suelo (Oldeman, 1994; Gerrard, 2000; Porta, 2008).

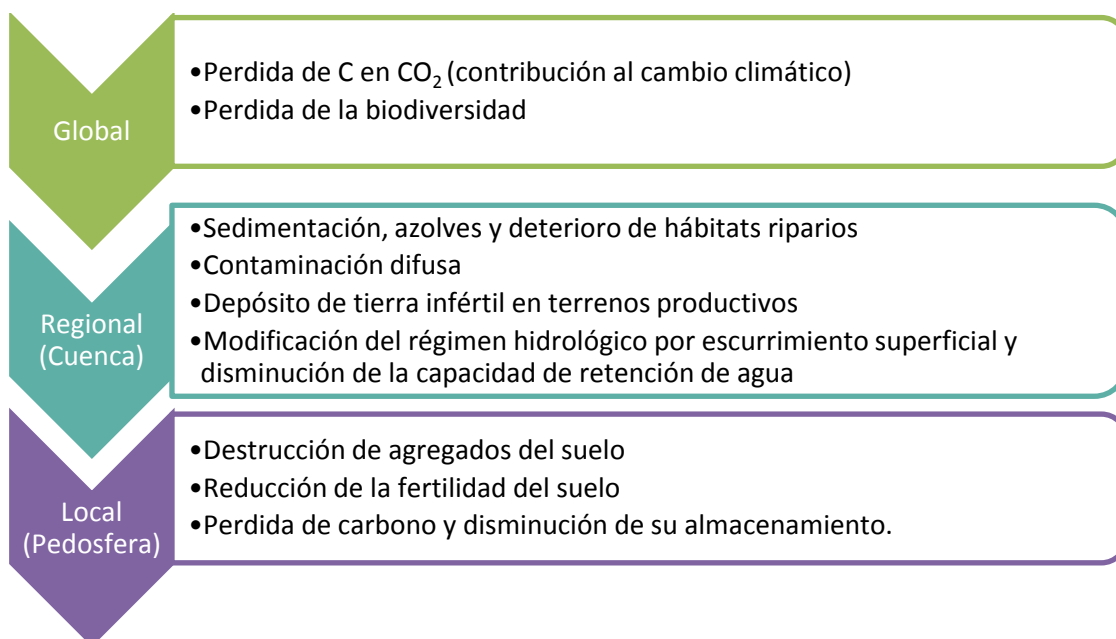
Pérdida del suelo		
Erosión hídrica	Erosión eólica	
Deterioro interno		
Químico	Físico	Biológico
Salinidad, sodicidad Contaminación	Compactación, sellamiento, encostramiento	Disminución de la actividad biológica

#### Erosión del suelo

La erosión consta de la separación de partículas o agregados del suelo y el transporte de las mismas (Millar, 1971; Porta, 2008). La causa de la erosión del suelo se asocia tanto a las condiciones propias del ambiente (relieve, la intensidad, cantidad y energía de la lluvia y el viento) y del suelo (textura, estructura, agregación, erodabilidad) como a los procesos involucrados en las actividades antrópicas, principalmente en la agricultura (Hudson, 1993; Pimentel et al., 1995; Morgan, 1981; Gerrard, 2000; Delgado et al., 2013).

Según el mapa GLASOD (Global Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation) alrededor de 1.96 miles de millones de ha mundiales son afectadas por la degradación del suelo inducida por el ser humano, principalmente por la erosión hídrica y eólica (Oldeman, 2000). En México, SEMARNAT-COLPOS (2003) reportan en su estudio que el 44.9% del territorio nacional se ve afectado por un problema de degradación para el periodo 2001-2002.

La erosión y particularmente la erosión hídrica ocasiona daños a diferentes escalas en los sistemas ambientales.



**Figura 1.** Impacto de la erosión del suelo a diferentes escalas. Elaboración propia con información de: Loredo, 2005; Cotler, 2010 y Delgado et al., 2013.

En el ámbito nacional, algunos autores (Anaya, 1999; Chapela y Mendoza, 1999) concuerdan con que las causas que provocan la degradación del suelo se relacionan no sólo con aspectos técnicos, sino además con aquellos de carácter social y político.

Chapela y Mendoza (1999) menciona que la degradación del suelo en México es entre otros factores, resultado de:

- Instrumentos de política insuficientes que armonicen las necesidades de fomentar la producción primaria con las de proteger el suelo y demás recursos naturales.
- La proliferación de modelos sociales no adecuados a las condiciones naturales de uso local de la tierra.
- Un marco normativo regulatorio insuficiente para controlar los cambios de uso de suelos forestales e incentivar la articulación entre producción y conservación.

Cotler et al. (2007) analizan que los marcos jurídicos contemplan al suelo en tres ámbitos: un bien para la productividad, un recurso natural y un elemento ambiental, de tal forma que cada administración tiene una competencia específica para regular e intervenir y no existe por tanto una sincronía entre ellos, aunado a que en ellos sólo se contemplan *las consecuencias más visibles y no por ello las más importantes*.

#### **5.4. Conservación de suelos**

La conservación de los suelos consiste en toda acción enfocada al uso adecuado de este recurso de manera que su calidad pueda mantenerse (Van Kooten, 1993; Burnell & Clawson, 2011). Este propósito se ha intentado conseguir por medio de técnicas y tecnologías sobre diferentes usos que se le dan al suelo, sea agrícola, de aprovechamiento forestal, urbano o industrial, denominadas prácticas de conservación.

A nivel mundial se han implementado diversos tipos de prácticas de conservación de suelos entre los que se encuentran las agronómicas, que involucran principalmente los tipos de labranza desde la labranza convencional hasta la labranza de conservación (Hudson, 1987; Loredó 2005); las mecánicas, consistentes en realizar movimientos de tierra como las terrazas y las presas (Faustino, 1985; Hagmann, 1996) y las vegetativas, como los sistemas agroforestales (Young, 1989), la rotación de cultivos y los policultivos. Tales prácticas han ido evolucionando de acuerdo al cambio de paradigma de conservación de suelos y las experiencias adquiridas en cada una de ellas (Dumanski y Peiretti, 2013).

#### **Prácticas de conservación de suelos a nivel nacional**

Las primeras acciones de control de la erosión a nivel nacional se llevaron a cabo a partir de 1946 con la creación de la Dirección General de Conservación de Suelo y Agua (Loredó, 2005). Actualmente organismos gubernamentales como la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) y la CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) han puesto en práctica algunas técnicas de conservación de suelos, la primera en suelos de uso agrícola y la segunda enfocada a suelos forestales.

La CONAFOR (2012b) a través de su Gerencia de Suelos ha ejecutado acciones de restauración forestal definidas como *“el conjunto de obras y prácticas destinadas a controlar los procesos de degradación, mantener la productividad potencial de los*

suelos, retención de azolves y captación de agua”. Las prácticas en su mayoría son mecánicas y radican fundamentalmente en realizar movimientos de suelo. Entre las prácticas mecánicas que se aplican se encuentran las siguientes:

**Cuadro 3.** Tipos de prácticas mecánicas. Elaboración propia con datos de CONAFOR (2007).

Control de la erosión en cárcavas		Control de la erosión laminar	
<b>Presas</b>	De mampostería	<b>Terrazas</b>	<b>Zanjas</b>
	De morillos	De muro vivo	Sistema zanja-bordo continuo
	De gaviones	Individuales	Derivadoras de esorrentía
	De piedra acomodada	Sucesivas	Zanjas trinchera

### 5.5. Las zanjas trinchera

Las zanjas trinchera, también llamadas zanjas de infiltración o tinas ciegas, son excavaciones con dimensiones establecidas de 0.4 metros de ancho y profundidad con 2 metros de longitud (Figura 3), trazadas a *tresbolillo* y construidas siguiendo las curvas de nivel como se muestra en la figura 2.



**Figura 2.** Disposición de las zanjas trinchera en la zona de pastizales Imagen tomada en la localidad Altzomoni, Parque Nacional Iztacchuatl-Popocatépetl.



La CONAFOR (2007) recomienda que haya una separación de cada dos metros entre zanja y zanja y una separación entre curvas a nivel de 12.5m altitudinales, teniendo un total de 250 zanjas por ha (CONAFOR, 2012b). Por otra parte Loredo (2005) argumenta que para tener el control más eficiente del escurrimiento, se recomienda dejar entre zanja y zanja una distancia de 0.80m de tal forma que en una línea de 100m se establezcan 55 zanjas. Además deben situarse en la parte superior o media de una ladera (Pizarro, 2004).

El suelo removido de la zanja se compacta a una zona adyacente de ésta en la parte baja de la pendiente y es lo que conforma el “bordo” de la zanja. CONAFOR (2012b) establece una dimensión de 0.6m por ancho y 0.35m de altura en cada bordo. Para retener al bordo se planta un árbol. *Pinus radiata* es una de las especies más utilizadas para el diseño de zanjas. (Pizarro, 2004; Pizarro, 2008).

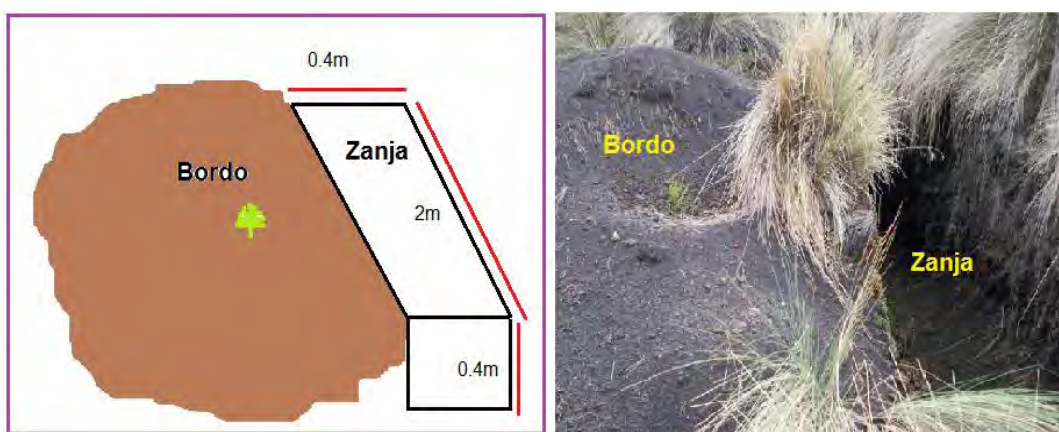


Figura 3. Diagrama de las zanjas trinchera (izquierda) e imagen de una zanja con un pino plantado (derecha).

Los propósitos de las zanjas trinchera de acuerdo a Pizarro (2004), Loredo (2005), CONAFOR (2007) y Rubio-Granados (2009) son:

- *La recarga de mantos acuíferos al incrementar la infiltración de agua. Mantenimiento de la humedad del suelo de áreas localizadas, al captar la escorrentía y almacenar el agua que precipita.*
- *Interceptar los escurrimientos superficiales, reduciendo su velocidad. Controlar y reducir la erosión hídrica reteniendo los azolves.*
- *Auxiliar a la reforestación, favoreciendo el desarrollo de especies forestales y de vegetación natural.*

Antes de establecer esta técnica, se deben considerar muchos factores como la intensidad de la precipitación, la velocidad de infiltración de los suelos y la pendiente. De acuerdo a CONAFOR (2007) y SAGARPA (Rubio-Granados, 2009) se recomiendan en regiones áridas o semiáridas y templadas con pendientes no mayores a 40%, en laderas sin vegetación o con poca vegetación y en suelos con alta permeabilidad relativa.

Este tipo de prácticas se han implementado por parte de organismos gubernamentales como CONAFOR incluso en áreas prioritarias de protección y conservación definidas oficialmente como Áreas Naturales Protegidas en México, a través de la CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas).

## **5.6. Las Áreas Naturales Protegidas**

Como primer acuerdo establecido en la cumbre de la Tierra de Río en 1992, se define un Área Protegida como *“aquella delimitada geográficamente diseñada o regulada para lograr objetivos específicos de conservación in situ de la biodiversidad”* (Arias González, 2012). En el contexto nacional actualmente las Áreas Naturales Protegidas (ANP) se definen como *porciones representativas de los diversos ecosistemas en donde el ambiente original no ha sido sustancialmente alterado y requieren ser preservadas* (Programa Nacional de ANP 2014-2018). Asimismo la LGEEPA (Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente) las define como *las zonas del territorio nacional en las que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que sus ecosistemas y funciones integrales requieren ser restauradas y preservadas* (Art. 44 de la LGEEPA en la Agenda Ecológica Federal, 2014).

Las Áreas Naturales Protegidas (entre federales, estatales, municipales, sociales y privadas) abarcan en conjunto 10% de la superficie terrestre de México, con 1.6% de su Zona Económica Exclusiva (Bezaury y Gutiérrez, 2009). El decreto expedido para determinar una ANP no considera la división política de las zonas (sean municipales o estatales) sino el área ecogeográfica donde se encuentra el ecosistema a proteger (Vázquez Ramos, 1998) y sin embargo tal como indica Bezaury y Gutiérrez (2009) la superficie que abarcan constituye tan sólo el indicador de la expresión territorial con cobertura legal, pero no de la efectividad en el manejo de dichas áreas.

Las ANP cuentan con instrumentos de planeación tales como Programas de Manejo y un Ordenamiento Ecológico del Territorio. El Programa de Manejo es un instrumento que debe hacer una descripción detallada del sitio y sus características, especificando políticas, estrategias y actividades permitidas (Programa Nacional de ANP 2014-2018).

Aunque como indica la LGEEPA el propósito de las ANP es “*preservar los ambientes naturales representativos de las diferentes regiones biogeográficas y ecológicas y de los ecosistemas más frágiles, así como sus funciones para asegurar el equilibrio y la continuidad de los procesos evolutivos y ecológicos* (Art. 45), éstas además desarrollan diversas funciones entre las que se denotan:

- La protección de cuencas, captación y saneamiento de aguas superficiales y subterráneas. Contribuyen a regular la disponibilidad de agua (superficial y subterránea) que tiene un valor asociado a sus usos económicos (Bezaury, 2009).
- La protección y control de la erosión de los terrenos donde se encuentran estas áreas naturales (Vázquez Ramos, 1998).
- La regulación de la composición química de la atmósfera y el clima, al ser sumideros de carbono para la mitigación del cambio climático.

La existencia actual de carbono en las ANP federales y estatales en México es equivalente a seis años de las emisiones producidas en el país en 2004 a un ritmo de 438 megatoneladas de CO<sub>2</sub> e por año (Bezaury, 2009).

Resulta necesario hacer reconocer la existencia y funciones de las ANP, su riqueza biológica y los beneficios directos e indirectos que aportan a la sociedad, para que cada vez más se apoye su conservación (Bezaury y Gutiérrez, 2009) y visitantes o poblaciones cercanas analicen si su comportamiento contribuye o no a su conservación (Arias González, 2012).

### **Parques Nacionales**

Entre las categorías que forman las ANP de carácter federal se ubican los Parques Nacionales. En la cumbre de Río 1992 se construyó el concepto de un Parque Nacional como un *Área Protegida manejada principalmente para la protección de los ecosistemas y la recreación* (Arias González, 2012). Actualmente a nivel nacional los Parques Nacionales son considerados como “*representaciones biogeográficas a nivel*

*nacional, de uno más ecosistemas que se signifiquen por su belleza escénica, su valor científico, educativo, valor histórico, existencia de flora y fauna” (LGEEPA, Art. 50).*

En México en 1917 se decreta el primer Parque Nacional conocido como el Desierto de los Leones con la intención de *proteger el curso de 14 manantiales* (Vázquez Ramos, 1998). En 1940 se crean 40 Parques Nacionales bajo el gobierno de Lázaro Cárdenas de los cuales actualmente 27 siguen vigentes y en total existen 66 Parques Nacionales abarcando 1 398 517 hectáreas (Programa Nacional de ANP 2014-2018).

Dentro de los Parques Nacionales existen teóricamente ciertas restricciones a los visitantes que asisten con fines de recreación o investigación ya que según refiere la LGEEPA (Art. 50) *“sólo podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la protección de sus recursos naturales, el incremento de su flora y fauna y en general, con la preservación de los ecosistemas y de sus elementos”.*

## **5.7. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl**

### **Historia del Parque Nacional**

Derivado de un deterioro progresivo de los bosques de la Sierra Nevada por la explotación intensiva de recursos forestales, se empiezan a implementar medidas regulatorias en lo que actualmente conforma el Parque Nacional. En 1930 los bosques de las haciendas de Zoquiapan y Río Frío -ubicadas en el Estado de México- e Ixtlahuacan –ubicada en Puebla-, considerados en principio como Reserva Forestal, se declaran Parque Nacional (Chávez, 1996; Hernández y Granados, 2006).

Tres años después, ante la continua explotación forestal en toda la Cuenca del Valle de México y la falta de aplicación de los decretos planteados, se declara Zona Protectora Forestal a los terrenos de las vertientes y planicies de la Cuenca. Con el objeto de precisar y extender las áreas del Valle de México destinadas a protección, en 1935 se decretó Zona Protectora Forestal a la parte oriental de la Sierra Nevada, conteniendo los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, la vertiente sur de la serranía de Tlaxco y la montaña La Malinche (Hernández y Granados, 2006).

Debido a la carencia de acciones encaminadas a la conservación y manejo de los recursos de dichas áreas, finalmente en noviembre de 1935 por un decreto de Lázaro Cárdenas, se declara Parque Nacional a las montañas Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Considerados según el Decreto como Reservas Forestales de la Nación (DOF, 1935) la visión de este integraría más que sólo el recurso forestal:

“Las montañas Iztaccíhuatl y Popocatepetl constituyen la división de cuencas hidrográficas, sostienen el régimen hidráulico si están cubiertas de bosques como deben estarlo para evitar la erosión de sus terrenos en declive... Se hace de todo punto necesario que estas montañas sean protegidas en sus bosques, pastos y yerbales que formen una cubierta suficientemente protectora del suelo y de las demás condiciones climáticas y biológicas... Importa a todo trance proteger su suelo contra la degradación, manteniendo o restaurando sus bosques en perfecto estado y sus praderas...” (DOF, 1935).

Dos años más tarde se integran al Parque Nacional los terrenos de la hacienda Zoquiapan y Anexas (DOF, 1937; Vázquez Ramos, 1998). Anteriormente la sección Iztaccíhuatl-Popocatepetl y la sección Zoquiapan y Anexas se consideraban como Parques aislados; sin embargo en Programas de Manejo posteriores al 2001 se caracterizaron como una sola unidad debido a que forman parte de un mismo corredor biológico (Miguel-Jiménez, 2013). Cabe mencionar que en junio del 2010 la UNESCO declara Reserva de la Biosfera Los Volcanes (INECOL, 2010) en la zona donde se localiza el Parque Nacional.

En principio el Parque Nacional estaba conformado por 89 800 ha, estableciendo un límite inferior con base a una curva de nivel de 3 000 msnm y como línea límite una distancia de 100 metros a los cultivos y poblados aledaños (DOF, 1935). De forma contradictoria a los motivos que lograron constituir este territorio como Parque Nacional, en 1948 por un decreto dictado bajo el gobierno de Miguel Alemán, se establece en él una Unidad Industrial de Explotación Forestal (UIEF) para beneficio de una fábrica de papel, modificando el límite inferior a 3 600 msnm y reduciendo su superficie a 25 679 ha (DOF, 1935; DOF, 1948; Chávez, 1996). Después de más de cuatro décadas de explotación de los recursos forestales en los terrenos del Parque Nacional, se extingue la UIEF por un acuerdo decretado en 1992. Sin embargo no se determinó la recuperación de las hectáreas originales (DOF, 1935; CONANP, 2013).

De acuerdo al último Programa de Manejo (CONANP, 2013), actualmente el Parque Nacional abarca una superficie de 39 819.086 ha de las cuales el Estado de México posee el 71.09%, Puebla el 27.81% y Morelos el 1.1% del territorio.

Por su proximidad a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el Parque Nacional sufre los efectos de la contaminación atmosférica a través de la lluvia ácida y los depósitos de contaminantes atmosféricos que provocan una tasa baja de sobrevivencia de la regeneración natural de los bosques, pérdida de hojas y bandeo clorótico (CONANP, 2013).

Por otra parte existe una gran presión sobre el recurso de agua subterránea por las necesidades cada vez más demandantes de los habitantes de los valles que circundan la Sierra Nevada. Por ejemplo, Delgado (2014) expone que en el valle de Puebla, de una recarga de 339.6 millones de m<sup>3</sup> anuales de agua subterránea, se concede un volumen de 285.48 millones de m<sup>3</sup> al año y un volumen de extracción real de 307 millones de m<sup>3</sup> al año.

### **Deforestación y cambio de uso de suelo**

Las pérdidas y transformaciones de la cobertura vegetal que ha sufrido el Parque Nacional son el resultado de diversas actividades permitidas a través de concesiones en los terrenos de esta ANP. En un estudio realizado por el Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS) (2008) para la CONANP, se determinó el cambio de uso de suelo y vegetación en el Parque Nacional a partir del uso de imágenes LandSat de las cubiertas de suelo de los años 2000 y 2007. En él se detectaron cambios en un total de 511.7 ha de toda la superficie del Parque, siendo los bosques de pino denso donde se manifestaron los cambios más relevantes, perdiendo un total de 300.41 ha. Por otro lado los pastizales aumentaron su cobertura por 140.41 ha a causa del pastizal inducido.

El deterioro de la región ha sido causado por actividades antrópicas ligadas a la extracción de los recursos naturales, tales como la tala clandestina, los incendios forestales inducidos y el crecimiento urbano, que expresan las necesidades de sobrevivencia de las poblaciones humanas aledañas, cuya presión ambiental y al mismo tiempo su nula intervención sobre las políticas ambientales, imposibilitan el manejo de la región desde un enfoque sustentable.

Pese al principio rector de conservación y protección del territorio, la problemática actual recae en las actividades permitidas dentro del Parque a través de la concesión de autorizaciones, mismas actividades que carecen de un control legal y fundamentos técnicos para su aplicación.

### **Acciones de manejo en el Parque Nacional**

Entre los años 2003 y 2005 el Fondo para el Patrimonio Natural de México anuncia que se plantaron casi 4 millones de plántulas de *Pinus hartwegii* (85%), *P. montezumae* (5%), *P. ayacahuite* (5%) y *Abies religiosa* (5%) en 5 000 ha del Parque Nacional con el respaldo económico de las empresas Fomento Ecológico Banamex, Grupo Bimbo, Reforestemos México, VW de México, los gobiernos de los Estados de México y Puebla y la participación de los organismos SEMARNAT, CONANP, CONAFOR Y CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (López y Durán, 2009).

Así mismo, la empresa Coca-Cola, bajo la consigna de “*buscar reabastecer toda el agua que utilizamos en nuestras bebidas y procesos...*”, desde 2008 lanzó el Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua, el cual proponía sembrar 30 millones de árboles en cinco años. Finalmente se aseguró que en cuatro años el Programa plantó 31 millones de árboles logrando una restauración de más de 32 mil hectáreas (Delgado, 2014).

Por otra parte la CONAFOR crea el Programa de Restauración Forestal (CONAFOR2012a), con la finalidad de “*restaurar y reforestar áreas degradadas de las microcuencas en zonas prioritarias, mitigar la erosión del suelo y el azolve de cuerpos de agua, incrementando la infiltración, la calidad y la producción de agua para las principales zonas urbanas aledañas*”. Entre dichas áreas se contempla el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl en un programa nombrado “Programa Especial para la restauración de las microcuencas en zonas prioritarias del Izta-Popo”. De acuerdo a tal programa el área con una superficie potencial a restaurar de 159 304 ha tiene un grado de degradación ligera de 55.54%, moderada de 9.28% y extrema de 1.06%. Con la finalidad de lograr una producción forestal se incluiría a las especies de pino *Pinus hartwegii*, *P. montezumae*, *P. ayacahuite*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. teocote* y *P. religiosa*, teniendo un total de 3 036 800 organismos plantados.

Desde 1996 se estableció el Programa de Manejo para el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (Chávez, 1996) con la intención de *caracterizar su contenido y riqueza natural y cultural, diagnosticar las problemáticas existentes y plantear estrategias a tiempos de corto, mediano y largo plazo*. Años más tarde, en 2009 se emite un nuevo Programa de Manejo (CONANP, 2013) el cual incluye una serie de *Subprogramas de Conservación* que establecen objetivos y actividades dirigidos a resolver problemáticas derivadas del diagnóstico del Parque Nacional, los cuales no determinan plazos ni fechas precisas para realizar tales actividades. Este Programa de Manejo contempla como un diagnóstico “la disminución de la superficie de infiltración por pérdida de bosque”. Dicha problemática se aborda en el *Componente de conservación de agua y suelos (Subprograma de Restauración)* (CONANP, 2013), en el cual se menciona la construcción de zanjas como un proyecto de “*cosecha de agua*” donde *no se han determinado criterios de conservación y recuperación de cuerpos de agua*.

Como primera intervención por parte de Pronatura, en el año 2000 se construyeron 24 000 zanjas en una superficie de 38 ha en la zona de Paso de Cortés (Cota et al., 2011) concluyendo en el 2005 con la última etapa de construcción de zanjas en esta zona a cargo de grupo Bimbo (Ramírez-Santiago, 2016).

Desde el 2005 grupo Televisa inició la construcción de zanjas en las zonas aledañas al cerro Alzomoni, como mitigación del impacto ambiental de las aguas residuales que se producían en las antenas de transmisión. Para dicho proyecto se generó una Manifestación de Impacto Ambiental (véase MIA “Planta de Tratamiento de Aguas Negras de las Instalaciones de Televimex ubicadas en el cerro Alzomoni”), mas no para las zanjas excavadas en la zona. Ya hacia el 2013 concluyendo con la participación de VW, la construcción de zanjas en esta zona abarcó un total de 191 ha (ibídem).

En 2007 se formaliza la intervención de las empresas en el Parque Nacional con la creación del Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua, formado por la Asociación Civil Pronatura México, Coca-Cola de México, la CONANP y la CONAFOR, a través del financiamiento de Coca-Cola de México. De acuerdo a este programa se contempló la plantación de un árbol de pino en cada bordo por cada zanja excavada de las especies *Pinus ayacahuite* y *Pinus montezumae* (DOF, 2013).



Ya en 2009 el Parque Nacional tenía excavadas 162 500 zanjas en una superficie de 250 ha en los terrenos de Bienes Comunes de Amecameca a cargo de Pronatura (Cota et al., 2011; Delgado, 2014).

Tanto el Programa de Manejo como el Programa Nacional de Reforestación, no incluyen realmente un diagnóstico y tampoco un objetivo específico sobre el estado y la calidad de los suelos para su conservación.

Aunque actualmente ya no se excavan zanjas en esta zona, como se estipuló en los criterios de ejecución del Programa Nacional Forestal 2016: “*para la obra zanja trinchera...se exceptúan los predios ubicados en el Eje Neovolcánico*” (DOF, 2016), más de 3 700 hectáreas del Parque Nacional -3 786.77 ha según Ramírez-Santiago (2016)- fueron alteradas por la construcción de las zanjas trinchera.

## 6. Caracterización del área de estudio

### 6.1. Localización

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl- Zoquiapan y Anexas al contener a dos de los volcanes más grandes del país, se localiza en la porción centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana.

Se posiciona entre los siguientes límites extremos escritos en coordenadas geográficas (Figura 6.3):



Límite Norte: 543979 m Este 2099049 m Norte Zona 14Q

Límite Este: 539463 m Este 2130868 m Norte Zona 14Q

Límite Oeste: 523341 m Este 2130868 m Norte Zona 14Q

Límite Sur: 543979 m Este 2099049 m Norte Zona 14Q



**Figura 4.** Ubicación regional del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y límites geográficos. Imagen Landsat (2013) tomada de Google Earth.

## **6.2. Los factores formadores potenciales de los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl.**

### **Material parental**

Debido a su actividad volcánica, la litología está dominada por depósitos piroclásticos y coladas de lava de composición andesítica-dacítica, así como de andesitas formadas en el Mioceno y basaltos andesíticos en el Plioceno, siendo este último periodo donde se define su formación actual (Miguel, 2013; Valderrábano, 2013).

Derivados de las últimas cinco erupciones desde hace 25 000 y hasta 400 años (Miguel, 2013), la producción de pómez de caída y flujos de ceniza cubren la mayor parte de la Sierra Nevada (López, 2014).

### **Relieve**

El territorio se conforma por dos macizos montañosos: la Sierra Nevada al centro y sur y la Sierra de Río Frío al norte. Con una extensión de 100 km de longitud norte-sur, la Sierra Nevada divide a las cuencas endorreicas de México y Puebla, con sus mayores elevaciones conformadas por los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl -segunda y tercera cumbres más altas del país respectivamente-. La serranía de Aqualco une ambos volcanes en un sitio conocido como Tlamacaxco o Paso de Cortés. Por su parte la Sierra de Río Frío cuenta con elevaciones que van desde 3 020 a 4 120 msnm, siendo los cerros Tláloc y Telapón los más altos (CONANP, 2013).

Según Martínez Rosales (2003), más del 60% de la superficie del Parque son pendientes escarpadas (15° a más de 20°), 22% son pendientes fuertemente inclinadas (5° a 15°) y 17% ligeramente inclinadas (0° a 5°). El relieve accidentado da origen a múltiples morfologías como cañadas que van de 25 a 50° y laderas con pendientes suaves de entre 2 y 10° que dan origen a los lomeríos intermontanos. Así mismo por la formación de abanicos aluviales se derivan lomeríos de topografía llana y valles intermontanos (Chávez y Trigo, 1996; CONANP, 2013).

La topografía del volcán Iztaccíhuatl es resultado de la superposición de flujos de lava andesítica que han sido interrumpidos por erosiones glaciales. El talud de la parte sureste del Iztaccíhuatl presenta algunos cerros cuya altitud va de 3 500 a 3800 msnm.

La dinámica hidrológica es un agente muy importante en la formación de relieve exógeno, ya que los procesos de tipo fluvial y glacial han modificado significativamente las laderas inferiores de los volcanes a través del depósito y la erosión (Chávez y Trigo, 1996).

La superficie del territorio es potencial para establecer áreas de flujos convergentes y divergentes que a su vez determinen áreas de alta o baja infiltración (López, 2014).

### **Hidrografía**

El parteaguas de la Sierra Nevada forma la cuenca de México y la cuenca del Alto Balsas. Al norte de la Sierra Nevada las aguas tributarias desembocan a las subcuencas Chalco y Lago de Texcoco, al sur la subcuenca del río Nexapa y al oriente la subcuenca del río Atoyac, ambas tributarias de la cuenca del río Balsas (CONANP, 2013). La mayoría de los escurrimientos son originados por el deshielo de los glaciares del volcán Iztaccíhuatl, a su vez la red fluvial es controlada por la geomorfología del territorio.

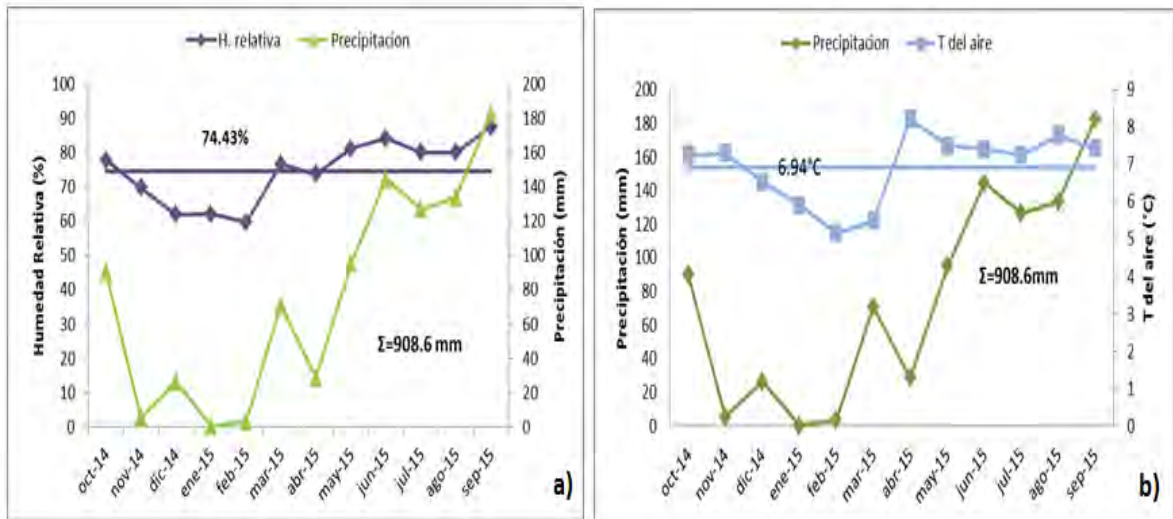
Por debajo de los 4 400 msnm la nivación actúa esporádicamente, en cambio el escurrimiento fluvial es más intenso, superando los 1000 mm anuales (Castro, 2009; Ayala-Campos, 2011). Las corrientes superficiales numerables durante la época de lluvias producen una gran infiltración que alimenta las corrientes subterráneas lo que favorece la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen buena parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y del Valle de Puebla-Tlaxcala (Delgado, 2014).

### **Clima**

La topografía de la región le confiere una gran variedad de climas que van desde templado húmedo a frío y muy frío de tal manera que la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68°C por cada 100m (Ayala-Campos, 2011).

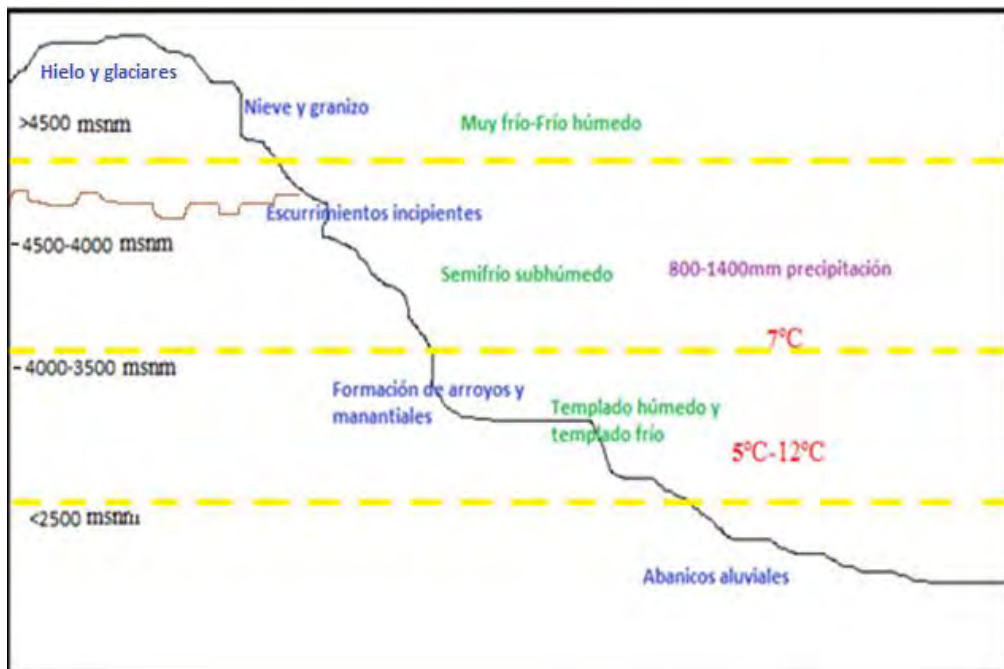
Castro (2009) describe que se manifiestan oscilaciones de temperatura a través del año entre 5°C y 18°C con una temperatura media anual de 11.1°C, cuyos valores más bajos se presentan en los meses de diciembre a febrero y los más altos de abril a agosto.

Con la intención de procurar una mejor descripción de las condiciones ambientales, se muestra en la figura 5, dos gráficos que abarcan los periodos en que se realizó el muestreo y caracterización del sitio, el cual se describe en el apartado de metodología.



**Figura 5.** Precipitación, y humedad relativa (a) y precipitación y temperatura del aire (b) del sitio de estudio del periodo de octubre del 2014 a septiembre del 2015. Nota: Se muestran los valores medios anuales de la temperatura del aire y la humedad relativa así como el total de precipitación anual. Se tomó el promedio de datos por mes (registro de cada 10 minutos). Gráficos elaborados con información de las Estaciones Meteorológicas Automáticas: *Izta-Popo* y *Altzomoni* del Servicio Meteorológico Nacional.

La figura 6 es una abstracción del comportamiento de la temperatura, el clima y la hidrografía, como respuesta a la altitud y a la topografía.



**Figura 6.** Diagrama general de la dinámica hidrográfica y el clima en función de la altitud en las laderas del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Elaboración propia con datos de la descripción del texto.

Aunado a estos factores, la vegetación favorece la existencia de microclimas por los estratos arbóreos que influyen en la cantidad de incidencia de luz solar y humedad que aportan al resto de la vegetación herbácea y al suelo.

## **Vegetación**

La distribución de la vegetación en el Parque Nacional es el resultado de factores oroclimáticos, es decir presenta un marcado arreglo altitudinal determinado por las especies dominantes, sin dejar de considerar asociaciones y transiciones entre comunidades vegetales:

**Bosque de encino.** Se ubica en un intervalo de 2 800 msnm a 3100 msnm formando frecuentemente doseles bajos de 5 a 12m de altura primordialmente por especies del género *Quercus* como *Q. laurina*, *Q. rugosa*, *Q. reticulata* y *Q. crassipes* (Martínez-Rosales, 2003). En ese mismo rango convergen asociaciones de dichas especies con especies del género *Abies*, *Juniperus* y *Arbutus* (Ayala-Campos, 2011).

**Bosque de oyamel.** Ubicado entre los 2 400 y 3 500 msnm, estos bosques se limitan a cañadas o barrancas más o menos profundas, dominando la especie *Abies religiosa*. No obstante figuran asociaciones de especies de los géneros *Quercus*, *Pinus* (*P. montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. leiophilla*), *Abies* y *Alnus* a los 3 400 msnm conformando bosques mixtos (Miguel, 2013).

**Bosque de pino.** En un intervalo altitudinal de 3 200 a 4 100 msnm de la Sierra Nevada, la zona de pino representa una franja entre la pradera de alta montaña y los bosques de oyamel-pino (Miguel, 2013). A los 3 600 msnm se establece el bosque de *Pinus hartwegii* que como especie tolerante a bajas temperatura y nevadas, señala el límite de la vegetación arbórea a los 4 000 msnm con su límite superior más bajo en el Popocatepetl que en el Iztaccíhuatl (Aceves, 1967). En las partes más bajas de su área de distribución forma asociaciones con zacatonal denso y hacia las partes más elevadas conforma un bosque achaparrado (Ayala-Campos, 2011).

**Pastizales.** El límite superior del pastizal alpino se sitúa alrededor de 4 300msnm, aunque algunas especies de plantas crecen más allá de 4 500 msnm. Las gramíneas (de hasta 1m) que crecen en amplias macollas le dan el nombre a la comunidad vegetal de “zacatonal”.

Se distinguen tres asociaciones del zacatonal alpino (Rzedowski, 2006):

- a) De 3 700 a 3 800msnm domina la especie *Muhlenbergia quadridentata*.
- b) De 3 800 a 4 200msnm domina *Calamagrostis toluensis* y *Festuca toluensis*.
- c) De 4 200 a 4 300msnm por *Festuca livida* y *Arenaria bryoides*.

Diferentes autores han estudiado la importancia de los pastizales en la regulación hidrológica, a través de la captación y almacenamiento e infiltración de agua en el suelo (Davie et al, 2006; Mark y Dickinson, 2008; Pearce et al., 1984).



**Figura 7.** Ejemplos de riqueza florística presente en el Parque Nacional. Fotografías tomadas en los sitios.

La vegetación forestal en el sitio juega un papel importante en la protección del efecto erosivo de la lluvia, el cual se acentúa por la presencia de fuertes pendientes (Villalobos, 1999). Así mismo constituye el hábitat de diferentes especies de fauna, como el teporingo (*Romerolagus diazi*), especie amenazada endémica del Eje Volcánico Transversal que sólo habita en los zacatonales con asociación de bosque de pino abierto a una altitud de 2 800 a 4 500msnm (Bell et al., 1985; Hoth et al. 1987; Fa y Bell, 1990.).

Pese a la riqueza y abundancia florística presente en el territorio (figura 7), entre 1976 y 2000 se han perdido 5 372 ha de bosque conservado, es decir 11.66% del total de su superficie, aunado a ello se han modificado 5 256 ha con pastizal inducido en 24 años. (Gaceta del Gobierno, 2007).

## **Tiempo: Suelos formados**

El conjunto de factores anteriormente descritos actuando en un periodo determinado, generan una diversidad de suelos con propiedades emergentes, cuya génesis y desarrollo están en función de la magnitud de dicho periodo. En el Parque Nacional se han desarrollado suelos con características distintas que se describen a continuación conforme a las principales unidades denominadas de acuerdo a la WRB (2014); sin descartar por ello el hecho que entre cada unidad existen subunidades de suelos diferenciados por rasgos pedogenéticos que les confieren características únicas.

**Andosoles.** Es la unidad más representativa de suelos de la región, puesto que los depósitos abundantes de cenizas, tefras y vidrio volcánico son el material parental más distribuido. Estos suelos muestran partículas de tamaño más grande que otros suelos, relacionándose posiblemente con materiales coloidales amorfos (Vallejo, 1968). En general los más jóvenes se localizan en la cercanía del volcán Popocatepetl por el depósito reciente de ceniza de hace 450 años y los de mayor antigüedad al norte del Iztaccíhuatl (López-López, 2014). Dadas las propiedades físicas y químicas de los andosoles, en general tienen una gran capacidad para retener agua (Castro-Alonso, 2009).

**Fluvisoles.** Son suelos jóvenes formados en cañadas y lomeríos a partir de los depósitos fluviales. Esta condición ambiental les confiere una textura dominante gruesa y un bajo contenido de materia orgánica (Ayala-Campos, 2011).

**Cambisoles.** Estos suelos surgidos mayoritariamente del intemperismo de rocas volcánicas, poseen una formación estructural y diferenciación de los horizontes muy discernibles. Su alto grado de desarrollo se expresa entre otros aspectos en el contenido de arcilla, que aunado al grado estructural, reflejan una alta captación de humedad (Chávez y Trigo, 1996).

**Regosoles.** Formados a partir de materiales no consolidados de grano fino, en altitudes por debajo de los 3 900 msnm (Chávez y Trigo, 1996), estos suelos tienen un incipiente desarrollo de perfiles y por tanto un escaso desarrollo de minerales y materia orgánica.

**Leptosoles.** Estos suelos son someros y poco desarrollados debido a que su génesis tiene lugar en zonas de alta erosión, aunado a que el clima, la altitud y la poca vegetación dificultan su desarrollo y por ello conservan las características del material parental que son en este caso las rocas volcánicas (Ayala-Campos, 2011).



**Figura 8.** Suelos encontrados en diferentes regiones del Parque Nacional: a) Andosol mólico melánico vítrico, b) Andosol mólico melánico silándico en la cuenca de Alcalica por López (2014), c) Cambisol en sitio “Cruce El 8” por Valderrábano (2013), d) Andosol silándico mólico en bosques de *Abies* en la región de Tlálloc y e) Andosol vítrico mólico en bosques de *Pinus* en la región del Popocatepetl por Peña (2013).

## 7. Metodología

### 7.1. Localización de los sitios de estudio

Con la finalidad de estudiar si el efecto de las zanjas sobre la calidad de suelos, difiere entre coberturas vegetales distintas; se seleccionaron dos sitios con vegetación dominante, la cual consistió en pastizal natural subalpino y una asociación de bosque de pino con gramíneas amacolladas. Se consideró en principio para la elección de estos sitios, que no estuviesen perturbados en el sentido de no ser frecuentados por visitantes, estando lejanos a caminos o veredas.

Como segundo criterio, se localizaron zonas que tuvieran zanjas trinchera y en un área próxima (no mayor a 200m) a la misma altitud, una zona donde no hubiese zanjas como los sitios control. Con ello se obtuvieron cuatro sitios de estudio:

- Pastizal subalpino con zanjas (PZ)
- Pastizal subalpino control (PC)
- Bosque de pino con zanjas (BZ)
- Bosque de pino control (BC)



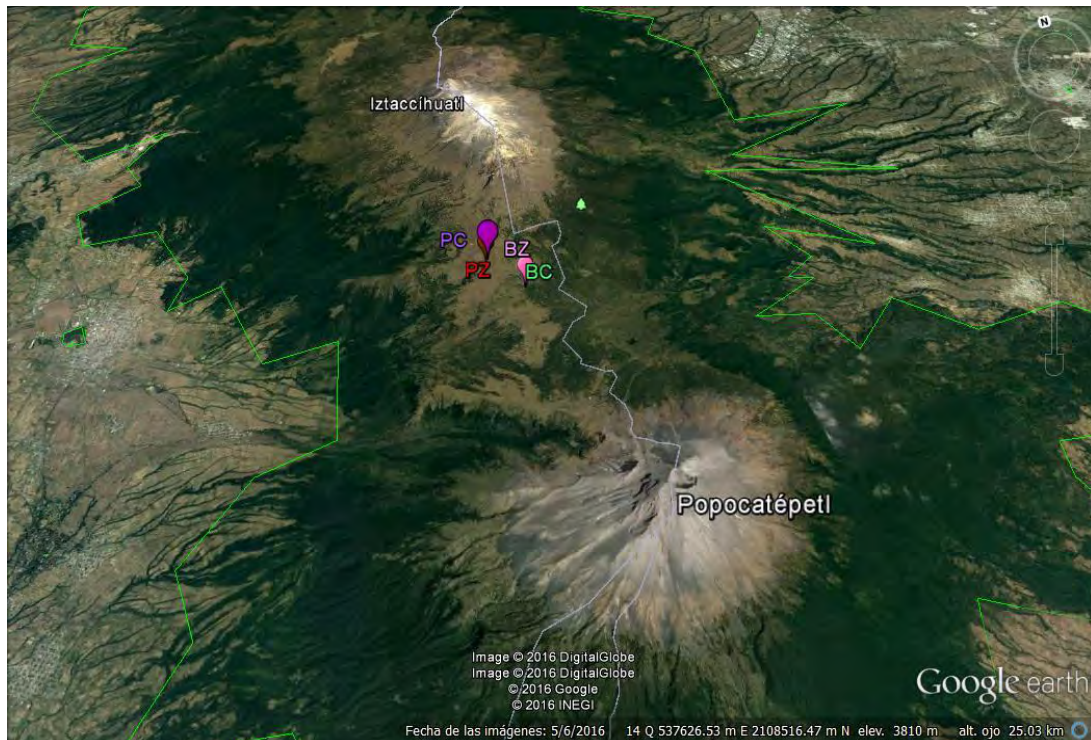
La caracterización y muestreo de los sitios con zanjas se realizó en el mes de marzo y de los sitios sin zanjas en el mes de abril del año 2015. Las características ambientales como la vegetación, la morfología, la exposición y la posición fisiográfica son semejantes entre sitios con zanjas y sitios control.

Los sitios con pastizal natural subalpino se encuentran en la localidad Altzomoni (a aproximadamente 640m al SE del cerro Altzomoni), y los de bosque de pino se encuentran en la localidad Las Quintas (a aprox. 1.68km al NE del Paso de Cortés), ambos situados en el municipio de Amecameca, en el Estado de México dentro del Área Natural Protegida Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Los sitios de estudio se ubican en un rango altitudinal entre 3 700 y 3 900 msnm (cuadro 4) dispuestos en una geomorfología local que se compone de lomas y valles de un paisaje intermontano, ubicado a 3.85 km al Suroeste del volcán Iztaccíhuatl. Los sitios están orientados al Oeste y Suroeste. La unidad de relieve en el cual están situados es la ladera media, con una pendiente de 26 a 35°, definiendo una pendiente escarpada moderada de acuerdo al modelo de Dalrymple (Siebe et al., 1996).

**Cuadro 4.** Localización de los sitios de estudio.

Sitio	Localidad	Altitud (msnm)	Coordenadas UTM		Vegetación dominante
			Este	Norte	
Pastizal con zanjas	Altzomoni	3 858	536638	2113302	Pastizal subalpino
Pastizal sin zanjas	Altzomoni	3 873	536786	2113466	Pastizal subalpino
Bosque con zanjas	Las Quintas	3 793	536786	2112052	Bosque de pino
Bosque sin zanjas	Las Quintas	3 793	536776	2112076	Bosque de pino



**Figura 9.** Imagen LandSat que muestra la localización de los sitios de estudio. Perímetro verde: límites del Parque Nacional. Fuente: Google earth. 2016.

### Pastizal subalpino

El sitio está dominado por gramíneas de montaña del género *Festuca*, *Calamagrostis* y *Muhlenbergia*. Especies tales como *Calamagrostis toluensis* *Muhlenbergia quadridentata* y en mayor proporción *Festuca toluensis* (llamados comúnmente zacatonales) se encuentran formando macollos de un tamaño de 80cm a 1m de altura, cubriendo la mayor superficie del suelo y contribuyendo a la agregación del mismo. Además se observan algunas especies de líquenes y musgos como cubierta vegetal.

### Bosque de pino

En este sitio la vegetación dominante es bosque de pino de la especie *Pinus hartwegii*. Esta vegetación forma una asociación con pastizales amacollados del género *Calamagrostis* y *Festuca* debido a la cota altitudinal en la que se encuentran. El dosel no es muy cerrado, lo que permite la generación de otro tipo de vegetación de especies tales como *Lupinus montanus* y *Ribes ciliatum*, así como la presencia de líquenes al propiciarse las condiciones necesarias de humedad por efecto de la sombra del dosel. Los pastos amacollados cubren casi toda la superficie del estrato arbustivo, sin embargo

el aporte continuo de acículas de pino y hojas de pastos generan una capa considerable de mantillo.

Se determinó una distancia muy cercana entre los sitios con zanjas y los sitios sin zanjas para ambos tipos de vegetación, sin rebasar los 200m de distancia a la misma altitud.

## 7.2. Descripción de la calidad de sitio

Se llevó a cabo la descripción de un perfil por sitio, obteniendo la descripción de cuatro perfiles en total. Dicha descripción se realizó a través de los métodos de evaluación contenidos en el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe et al., 2006).

Una vez descrito el perfil se tomaron muestras inalteradas por horizonte con cilindros de acero, para llevar a cabo en laboratorio las determinaciones de densidad aparente, densidad real, porosidad y contenido de carbono orgánico total. Así mismo se tomaron muestras alteradas por horizonte de cada perfil para desarrollar en laboratorio las pruebas de textura, pH y conductividad eléctrica. Tales pruebas se detallan en el apartado *Análisis de laboratorio*.



**Figura 10.** Detalle del trabajo realizado en campo: a) Descripción de los perfiles, b) Pruebas determinadas en campo, c) Toma de muestra para determinación de estabilidad de agregados en laboratorio y d) Montaje de estacas de erosión. Marzo-Abril, 2015.

Se determinó además la velocidad de infiltración del suelo en condiciones de saturación con un infiltrómetro de doble anillo (Turf Tec International) a tres diferentes posiciones (posición alta, media y baja) de la misma ladera elegidas aleatoriamente en los sitios sin zanjas. Se tomaron las lecturas de tiempo en minutos por cada nivel (milímetro descendido), hasta alcanzar una velocidad de infiltración constante. Para calcular el promedio de la velocidad de infiltración del suelo se consideró el nivel acumulado y se tomaron en cuenta las tres últimas lecturas. Los resultados se reportan en milímetros por minuto.

### 7.3. Estudio de las zanjas trinchera

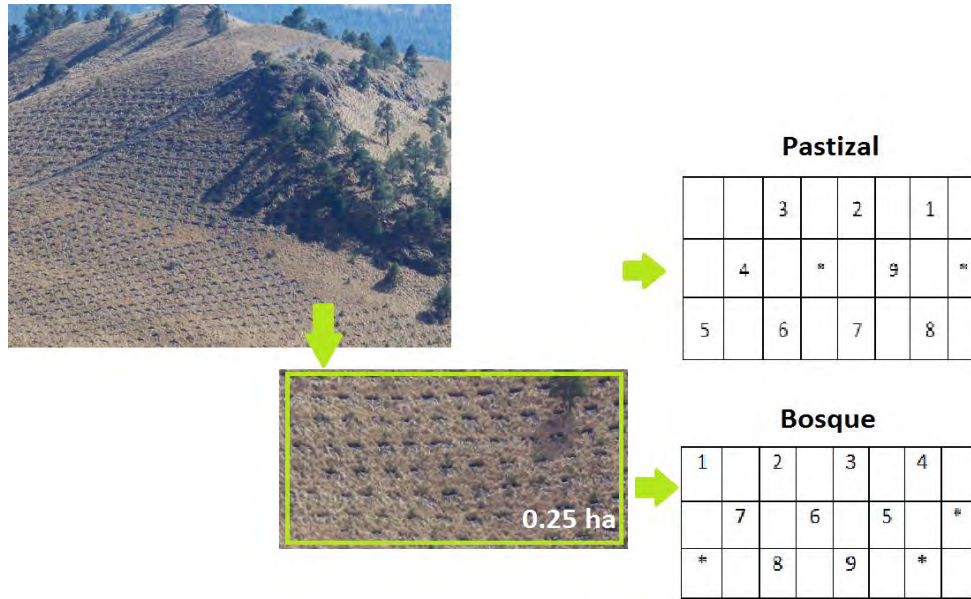
De acuerdo a la información proporcionada por el personal de la CONANP en las instalaciones del Parque Nacional, se presentan a continuación los siguientes datos relacionados con las zanjas en cada sitio.

**Cuadro 5.** Tiempo de construcción de las zanjas y empresas que las fomentaron.

Sitio	Año de construcción	Empresa	Tiempo transcurrido desde su construcción
<b>Bosque</b>	2005	Bimbo	11 años
<b>Pastizal</b>	2008	Televisa-VW	8 años

Se realizaron las mediciones siguientes en los sitios con zanjas trinchera:

Se estimó la cantidad de zanjas en una superficie de 0.25 ha a través de la delimitación de un cuadrante seleccionado aleatoriamente de 50 x 50 m en cada sitio con zanjas. La cantidad obtenida se proyectó a una hectárea. Dentro de ese cuadrante se midió la disposición espacial entre las zanjas a partir de la distancia entre zanjas en el sentido vertical y horizontal entre nueve zanjas cercanas seleccionadas al azar en un cuadrante de 16m por 6m considerando tres curvas de nivel. La Figura 11 muestra un diagrama de las zanjas que fueron medidas.



**Figura 11.** Diagrama de las zanjas seleccionadas aleatoriamente. En un cuadrante para el sitio de pastizal y el sitio de bosque. Los asteriscos indican la presencia de zanjas pero que no se consideraron.

### Dimensiones de las zanjas

Posteriormente se tomaron las dimensiones de esas nueve zanjas midiendo la longitud, ancho y profundidad de cada zanja, así como el área cubierta por el bordo de la zanja, midiendo el máximo del largo y ancho de cada bordo (Figura 12).



**Figura 12.** a) Medidas tomadas en la zanja: Ancho, Largo y Profundidad y b) Medidas tomadas en el bordo: Largo y Ancho.

#### 7.4. Efectos de las zanjas trinchera

Se llevó a cabo un muestreo aleatorio simple, tomando una muestra de tres zanjas aleatorias por sitio para determinar su densidad aparente, el porcentaje de porosidad y dos muestras para determinar el porcentaje de carbono orgánico total. Como muestras control se tomaron tres muestras superficiales por sitio en los sitios de bosque de pino sin zanjas y pastizal subalpino sin zanjas, para medir densidad aparente y el porcentaje de porosidad. Se utilizaron los valores de los horizontes de los perfiles de los sitios sin zanjas para obtener la cantidad de carbono orgánico total.

Según Cotler et al. (2013; 2015) existen diversos efectos derivados de la excavación de zanjas. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- i) **Volumen de suelo extraído.** La excavación de una zanja implica una cantidad de remoción y pérdida de suelo.
- ii) **Superficie de suelo cubierta por el bordo de la zanja.** Al extraer el suelo y colocarlo a un lado de la zanja excavada, una cierta área de la parte superficial del suelo queda cubierta por los sedimentos del bordo.
- iii) **Carbono orgánico expuesto.** La remoción del suelo implica una exposición de carbono orgánico total de los ahora sedimentos que conforman al bordo.

A partir de las medidas de las zanjas y los resultados obtenidos en laboratorio, se calcularon algunos de los efectos producidos por la excavación de las zanjas.

##### i) Suelo removido.

La cantidad de suelo extraído por la excavación de una zanja se obtuvo a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Suelo removido (ton)} = [\text{DA (gcm}^{-3}\text{)}] \times [\text{Volumen de zanja (cm}^{-3}\text{)}] \times [1/1\ 000\ 000]$$

(Cotler et al., 2015).

Donde

DA: Densidad aparente

$$\text{Volumen de zanja (cm}^{-3}\text{)} = [\text{Ancho de zanja (cm)}] \times [\text{Largo de zanja (cm)}] \times [\text{Profundidad (cm)}]$$

El volumen de la zanja se obtuvo a partir del ancho y el largo de la zanja, sin embargo para la profundidad se tomó el espesor de los horizontes del perfil de cada sitio con zanjas (PZ y BZ), tomando en cuenta solo los horizontes que llegaban hasta la profundidad de cada zanja. De igual modo la densidad aparente se determinó por cada horizonte del perfil.

Los valores del suelo removido por cada horizonte, se sumaron para obtener el suelo removido a la profundidad de la zanja. Finalmente se calculó el promedio del volumen de suelo removido de las nueve zanjas medidas.

## ii) Suelo cubierto.

El área que ocupan los bordos de las zanjas cubre una superficie de suelo que comprende al horizonte superficial y la cubierta vegetal, donde existe una mayor dinámica del suelo con otros medios. Tal efecto se calculó de la siguiente manera.

$$\text{Suelo cubierto (m}^2\text{)} = \text{Ancho del bordo (m)} \times \text{Largo del bordo (m)}$$

Tomando en cuenta el promedio del ancho y del largo de los bordos de las nueve zanjas medidas.

Para observar la proporción que afecta en superficie tanto el suelo removido por las zanjas como el suelo que cubren los bordos, se calculó el porcentaje de impacto en ambos por hectárea.

## iii) Carbono orgánico expuesto.

El suelo que se extrajo al excavar la zanja y que conforma los sedimentos del bordo, posee una cantidad de carbono que queda expuesta. Esta fue calculada a partir de la siguiente forma:

$$C_{\text{org expuesto}} \text{ (ton)} = [C_{\text{org total}} (\%)/100] \times [\text{Suelo removido (ton)}] \text{ (Cotler et al., 2015)}$$

Una vez teniendo los valores del suelo removido por sitio, se utilizó el promedio de los valores de carbono orgánico total de cada bordo.

Estos tres efectos fueron calculados a una hectárea a partir del número de zanjas contadas por hectárea en cada sitio para visualizar el impacto en una superficie mayor.

### 7.5. Impacto de las zanjas sobre el almacenamiento de carbono de los suelos

La cantidad de carbono orgánico contenida en una superficie es indicativa del carbono que puede almacenarse y reservarse en el ciclo del carbono. (Hudson, 1994; Reeves, 1997; Cruz-Flores & Etchevers-Barra, 2011; Vela-Correa et al 2012).

Con la excavación de las zanjas trinchera, la cantidad de carbono en superficie disminuye y por ende el almacenamiento y reserva de carbono.

En principio se determinó la cantidad de COS en una hectárea en cada sitio sin zanja, multiplicando el porcentaje de carbono orgánico, densidad aparente y espesor de cada horizonte de los perfiles de los sitios sin zanjas, sumando finalmente los valores de todos los horizontes.

$$\begin{array}{llll}
 [\text{H 1 Corg. (\%)/ 100}] & [\text{H 1 DA (gcm}^{-3}\text{)}] & [\text{H 1 Espesor (cm)}] & \times (0.001) \times (10\ 000) \\
 [\text{H 2 Corg. (\%)/ 100}] & [\text{H 2 DA (gcm}^{-3}\text{)}] & [\text{H 2 Espesor (cm)}] & \times (0.001) \times (10\ 000) \\
 [\text{H3C org. (\%)/ 100}] & [\text{H 3 DA (gcm}^{-3}\text{)}] & [\text{H 3 Espesor (cm)}] & \times (0.001) \times (10\ 000) \\
 [\text{H4C org. (\%)/ 100}] & [\text{H 4 DA (gcm}^{-3}\text{)}] & [\text{H 4 Espesor (cm)}] & \times (0.001) \times (10\ 000) \\
 [\text{H5C org. (\%)/ 100}] & [\text{H 5 DA (gcm}^{-3}\text{)}] & [\text{H 5 Espesor (cm)}] & \times (0.001) \times (10\ 000) \\
 & & \Sigma \text{ Hi...Hn=} & \text{COS total (tonCha}^{-1}\text{)}
 \end{array}$$

Para determinar la cantidad de COS que pudo perderse se utilizó el cálculo de suelo removido y se multiplicó por el porcentaje de carbono por horizonte de los perfiles de los sitios con zanjas.

$$\begin{array}{ll}
 [\text{Suelo removido H1 (ton)}] & [\text{Corg. H1 (\%)/100}] = \text{Corg. H1(ton)} \\
 [\text{Suelo removido H2 (ton)}] & [\text{Corg. H2 (\%)/100}] = \text{Corg. H2 (ton)} \\
 [\text{Suelo removido H3 (ton)}] & [\text{Corg. H3 (\%)/100}] = \text{Corg. H3 (ton)} \\
 [\text{Suelo removido H4 (ton)}] & [\text{Corg. H4 (\%)/100}] = \text{Corg. H4 (ton)} \\
 [\text{Suelo removido H5 (ton)}] & [\text{Corg. H5 (\%)/100}] = \text{Corg. H5(ton)} \\
 & \Sigma \text{ Corg. Hi...Hn}
 \end{array}$$

$$[\text{Promedio Zanja 1 } (\Sigma \text{ Corg. Hi...Hn}) \dots \text{Zanja 9 } (\Sigma \text{ Corg. Hi...Hn})] \times \text{zanjas}$$



Se multiplicó por el número de zanjas por sitio para obtener la cantidad total de carbono perdido en toneladas en una hectárea.

Finalmente se hizo una diferencia del contenido de COS que queda en una hectárea al excavar las zanjas.

$$\text{COS inicial} - \text{COS removido por zanjas} = \text{COS final}$$

## 7.6. Presencia de erosión y grado de agregación

### Estabilidad de agregados

Empleando envases tipo *Tetra Brik* se tomaron muestras inalteradas por sitio (PZ y BZ) de 3 bordos y 3 del lado opuesto al bordo denominados “Frente de zanja” (Ver inciso a Figura 13) y tres muestras superficiales en los sitios control (PC y BC), teniendo un total de 18 muestras para determinar la estabilidad de agregados en laboratorio con el método de Yoder modificado.



**Figura 13.** Puntos seleccionados para la prueba de estabilidad de agregados para las muestras en a) El frente de la zanja y b) El bordo de la zanja. Marzo, 2015.

### Movilidad y transporte de sedimentos

Para identificar si el suelo extraído que conforma el bordo de la zanja puede ser susceptible a erosión, se estimó su movilidad a través de las estacas de erosión (*erosion stakes* o *erosion pins*) (Bell & Fischer, 1993; Hudson, 1993) colocadas en los bordos de las zanjas. Las estacas consisten en varillas de madera de 30 cm de longitud y 3 cm de diámetro, con uno de los extremos en punta. Siguiendo el sentido de mayor pendiente

del bordo, se clavaron tres estacas por bordo: en la cima del bordo, la parte media o ladera del bordo y el pie del bordo (Figura 14). Cada una fue marcada a nivel de la superficie donde fueron enterradas y se registró la longitud entre dicho nivel y el otro extremo. Para observar efectos considerables de erosión, se mantuvieron por un periodo de cinco meses entre abril y agosto, dentro de los cuales se incluyó el periodo de lluvias que va de abril a octubre. Finalmente se midieron los cambios en altura por arriba y por debajo de la marca inicial como indicativos de la acumulación y pérdida de suelo respectivamente.



**Figura 14.** Disposición de las estacas colocadas en el sitio de a) bosque de pino y b) pastizal. Abril, 2015.

### **7.7. Análisis de laboratorio**

Se seleccionaron los siguientes parámetros físicos y químicos como indicadores cuantitativos de la calidad y salud del suelo:

#### **Densidad aparente (DA)**

El método se realizó de acuerdo al procedimiento León y Hernández (2005a). Las muestras inalteradas de los horizontes del perfil, el control y bordo de la zanja fueron pesadas en una balanza analítica de precisión de 0.1 g y fueron secadas en horno a 60°C por 24 horas. Posteriormente fueron pesadas y tamizadas con un tamiz de 2mm de diámetro para retirar piedras de las muestras. El volumen y peso medido de las piedras extraídas se restaron a los valores de densidad aparente para obtener una densidad aparente corregida del suelo.

## Densidad real (DR)

Siguiendo el procedimiento de Hernández (2007), se tomaron 5 gramos de cada una de las muestras, para evaluar la densidad real mediante el método del picnómetro, que consiste en medir el volumen de agua desplazado por un volumen de suelo conocido dentro de un frasco volumétrico. Posteriormente se pesaron los picnómetros en cada uno de los tratamientos (picnómetros secos vacíos, con muestras de suelo seco, saturados con agua destilada y picnómetros con agua destilada) y se tomó la temperatura del agua destilada en los picnómetros para obtener la densidad exacta del agua destilada.

La densidad real se obtuvo a través de la siguiente fórmula (Hernández, 2007):

$$\rho_r = \rho_a * [(P_s - P_v) / ((P_s - P_v) - (P_{sa} - P_a))]$$

Donde  $\rho_r$ : Densidad real del suelo

$\rho_a$ : Densidad del agua destilada

$P_s$ : Peso del suelo seco

$P_v$ : Peso del picnómetro

$P_{sa}$ : Peso del suelo saturado con agua destilada

$P_a$ : Peso del picnómetro con agua destilada

## Porosidad del suelo

La porosidad es resultado de un conjunto de factores físicos y químicos, tales como la textura y estructura del suelo, el contenido de materia orgánica, minerales y la dinámica e interacción de los mismos. Esta propiedad es determinante para que exista el intercambio de gases para una capacidad de aireación óptima y flujos de agua que integran al ciclo hidrológico y sustentan la biota edáfica.

A partir de los datos obtenidos de la densidad aparente y real de las muestras, se calculó el porcentaje de porosidad a través de la siguiente fórmula (León y Hernández, 2005<sup>a</sup>):

$$\text{Porosidad [\%]}: (1 - (DA/DR)) \times 100$$

Donde DA: Densidad Aparente y DR: Densidad Real

## Estabilidad de agregados

La estabilidad de los agregados en el suelo se refiere a la capacidad de resistencia que tienen éstos ante diversas fuerzas de disgregación: fuerzas externas como el agua y el viento como agentes erosivos e internas como el contenido de sales de sodio en la solución del suelo.

El tamaño de agregados debe conceder una aireación y humedad óptima, puesto que agregados muy grandes restringen el paso por las raíces y agregados muy pequeños favorecen la formación de costras (FAO, 2000).

Esta propiedad se determinó con el método de Yoder modificado con base en el procedimiento de Pérez-Bolaños (2015) el cual consistió en sumergir en agua destilada una muestra inalterada dentro de una pila de tamices, humedeciendo un poco la muestra antes de ser sumergida. Colocados en orden descendente, se eligieron los tamices de 8, 2, 1, 0.45 y 0.25 mm de diámetro, con el objeto de incluir a agregados de diversos tamaños.

Previamente se pesaron 5g de cada muestra y se secaron a 105°C por 24 hrs con la finalidad de conocer su contenido de humedad y añadir dicho peso a la muestra. Por tanto para cada muestra se sumergieron 100g más el peso incluido por corrección de humedad.

La pila de tamices en cada prueba se sumergió a 45 revoluciones por minuto en un periodo de 10 min. Las fracciones retenidas en cada tamiz, fueron secadas a 105°C por 24 hrs y pesadas. Los resultados de cada fracción se reportaron en porcentaje.

Para las fracciones retenidas en los tamices de 2 y 1mm, se realizó un ajuste por el contenido de arenas debido a que las partículas de arena pueden confundirse con agregados de menor tamaño. Para tal efecto, se sometieron a un baño ultrasónico por 5 minutos, se llevaron a los tamices correspondientes y finalmente las piedras y arenas retenidas se restaron a dichas fracciones.

Se tomó una muestra en 3 bordos y 3 frentes de zanjas en los sitios PZ y BZ y 3 muestras superficiales de los sitios PC y BC, teniendo un total de 18 muestras. Este método se llevó a cabo en el laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM.

### **Carbono orgánico total (Corg)**

El carbono orgánico como elemento fundamental y mayoritario de la materia orgánica del suelo (MOS), al estar distribuido en las diferentes fracciones de la MOS; conforma la fuente y reservorio de energía para los microorganismos del suelo.

Los elementos carbono y nitrógeno constituyen la relación C/N, cuya proporción determina el potencial del suelo para transformar la MOS y mineralizar el nitrógeno, que se traduce en la disponibilidad de estos elementos para los organismos del edafón.

Para esta determinación se seleccionaron las muestras inalteradas de los horizontes de los perfiles y 2 muestras de los bordos, teniendo un total de 11 muestras, las cuales se analizaron por duplicado. Se pesaron 5 g de cada una y se trituraron con un mortero de ágata para que fuesen homogéneas. Se obtuvo el contenido de carbono total en porcentaje, empleando el analizador elemental CNHS/O Perkin Elmer 2400 series II del laboratorio del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM.

Las muestras alteradas de los horizontes de los perfiles fueron secadas a temperatura ambiente y tamizadas para realizar las pruebas siguientes:

### **Conductividad eléctrica (CE)**

La concentración de iones en el suelo medida a través de la conductividad eléctrica, es una medida indirecta del nivel de salinidad de un suelo.

En una solución de suelo en relación 1:5, se pesaron 10g de suelo en frascos de vidrio y se le adicionaron 50 mL de agua desionizada. Por cada muestra, se generó un duplicado. Una vez tapados y agitados los frascos, se filtraron las muestras con papel filtro No. 42. Finalmente se leyó la conductividad eléctrica con el equipo Hanna modelo HI991300.

### **Potencial de Hidrógeno (acidez y alcalinidad)**

En términos generales el pH refiere el estado de acidez o alcalinidad que tiene un suelo. Sin embargo, el valor del pH implica una serie de respuestas a nivel químico y biológico: desde la disponibilidad de nutrientes para las plantas, la movilidad y reacción de iones en solución, la disolución de gases, la transformación de compuestos químicos e incluso la inocuidad y activación de metales pesados. A su vez tales valores varían conforme la dinámica de esos escenarios químicos y biológicos.

Este parámetro fue determinado en el mismo extracto empleado para la determinación de conductividad eléctrica, es decir también se llevó a cabo por duplicado. Una vez calibrado el potenciómetro con las soluciones buffer 4 y 7, se tomaron las lecturas con el mismo equipo empleado para la conductividad eléctrica.

Los métodos anteriormente descritos (excepto la determinación de C orgánico y estabilidad de agregados) fueron llevados a cabo en el laboratorio B de Geografía Física del Instituto de Geografía.

### **Textura**

La proporción de las partículas fundamentales del suelo (arena, limo y arcilla) que determina la textura del mismo, es una propiedad fundamental que interviene en el espacio poroso, la retención e infiltración de agua y la agregación del suelo, así mismo es un indicio de la composición mineral, el material de origen y el nivel de pedogénesis.

Esta propiedad fue determinada a través del Método de Bouyoucos (León y Hernández, 2005b). Se determinó la textura por duplicado de todos los perfiles por horizonte. Debido a que en campo se comprobó que el suelo no contenía carbonatos, el único pre-tratamiento que se realizó fue la destrucción de materia orgánica con peróxido de hidrógeno al 8%. Una vez destruida la materia orgánica, se realizó la dispersión de partículas de las muestras a través de hexametáfosfato de sodio con un tiempo de agitación de 12 horas, sometiéndose después a un baño ultrasónico por cinco minutos para asegurar su dispersión. Esta prueba fue llevada a cabo en la Unidad de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencias de la UNAM.



**Figura 15.** Análisis de laboratorio: a) Lectura de pH, b) Densidad real, c) y d) Filtrado de muestras para el método de conductividad eléctrica, e) y f) Determinación de textura con el método de Bouyoucos, g) Equipo empleado en el método de Yoder modificado y h) Tamices para diferentes fracciones en la determinación de estabilidad de agregados.

## 7.8. Análisis Estadístico

A través de la prueba t de Student se generó un análisis de varianza entre los resultados de los bordos con las muestras control para los parámetros densidad aparente, porosidad, y estabilidad de agregados.

Se llevó a cabo una prueba de ANOVA de dos vías para hallar diferencias entre los grupos de los bordos, frentes y control de las muestras empleadas para determinar la estabilidad de agregados.

## 8. Resultados y Análisis de Resultados

### 8.1. Calidad de sitio

A continuación se muestran los resultados de la caracterización de los sitios con y sin zanjias, así como la descripción de las propiedades de los suelos.

#### 8.1.1. Pastizal subalpino



**Figura 16.** Zona de pastizal subalpino. En los recuadros de la imagen se indican los sitios y sin zanjias. Fotografía Marzo, 2015.

### Propiedades del suelo en el pastizal sin zanjias

Localidad: Altzomoni, municipio de Amecameca, estado de México

UTMx: 536786 E

UTMy: 2113466 N

Altitud: 3 873 msnm

A 180 m aprox. al noreste del sitio con zanjias.

Fecha de descripción: Abril 11, 2015.

Paisaje: Valle intermontano

Posición fisiográfica: Ladera media    Forma: Ladera rectilínea convexa VL

Exposición: 270° Oeste    Pendiente: 15-20° Sencilla escarpada moderada

Clasificación de suelo: Andosol húmico melánico



## Condiciones ambientales del sitio

Clima: “Cb(m)(w)ig” templado húmedo y frío.

Estado del tiempo: ET3 (Sin precipitación en las últimas 24hrs.)

Temperatura media anual: 6.94 °C

Precipitación media anual: 1359 mm

Material parental: Depósito de material volcánico

Uso de suelo y vegetación: Pastizal. Zacatonales amacollados.

El suelo es profundo, oscuro y con una pedregosidad mínima consistente de piedras y cantos medianos. No tiene presencia de carbonatos pero si contenido de alófanos. La señal de aluminio activo que refleja la presencia de alófanos, así como algunos depósitos volcánicos identificados en algunos horizontes, fueron rasgos observados en el perfil como elementos característicos de los suelos formados a partir de materiales volcánicos. Se identificaron tres procesos diferentes de pedogénesis.

El tamaño y cantidad de poros y su estructura en general en bloques subangulares producen en conjunto un drenaje interno adecuado. Esta proporción de poros a su vez puede favorecer el intercambio efectivo de gases y aireación de las raíces de las gramíneas cuya penetrabilidad se alcanza inclusive en horizontes subsuperficiales.

Pese a que el grado de estructuración en los primeros horizontes es débil y en particular el primer horizonte que presenta una estructura granular, existe una alta estabilidad de agregados ligada con la densidad de raíces moderada y muy alta en estos horizontes.

**Cuadro 6.** Descripción del perfil del pastizal sin zanjas

Horizonte	Profundidad (cm)	Características
Ah	0-13	Color 5YR 2/1 (negro). Estructura granular mediana de grado débil, rompen a subangulares medios. Densidad aparente baja. Alta estabilidad de agregados. Densidad de raíces muy alta. Pocos poros muy finos intersticiales (inped y exped).
A	13-28	Color 7.5 YR 2/1 (negro). Bloques subangulares medianos de grado débil, rompen a subangulares finos. Densidad aparente baja. Moderada estabilidad de agregados. Densidad de raíces muy alta. Poros comunes finos vesiculares y tubulares (inped y exped).
2Ah	28-37	Color 7.5 YR 2/1 (negro). Bloques subangulares medianos de grado moderado, rompen a subangulares finos. Densidad aparente baja. Baja estabilidad de agregados. Densidad de raíces moderada. Pocos poros muy finos vesiculares (inped).
AB	37-52	Color 7.5 YR 2/1 (negro). Bloques subangulares gruesos de grado moderado, rompen a subangulares finos. Densidad aparente baja. Moderada estabilidad de agregados. Densidad de raíces baja. Muy pocos poros finos vesiculares (inped y exped).
3Ah	52->95	Color 7.5 YR 2/1 (negro). Bloques angulares y subangulares gruesos de grado moderado, rompen a subangulares finos. Densidad aparente baja. Moderada estabilidad de agregados. Densidad de raíces muy baja. Poros comunes muy finos vesiculares (inped y exped).



**Figura 17.** Perfil de suelo en pastizales sin zanjas.

**Cuadro 7.** Propiedades del perfil determinadas en laboratorio en el sitio de pastizal (PC)

Horizonte (cm)	DA (gcm <sup>-3</sup> )	Porosidad (%)	C <sub>org</sub> T (%)	pH	CE (μScm <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura
0-13	0.94	40.40	3.27	6.23	42.5	10.88	18.28	70.84	CA
13-28	0.99	57.39	2.49	6.90	32.5	9.52	18.64	71.84	CA
28-37	0.69	70.00	2.88	6.91	31	15.52	16.64	67.84	CA
37-52	0.62	71.18	2.59	6.95	25	13.44	17	69.56	CA
52->95	0.61	73.32	3.93	6.93	20	13.44	18.64	67.92	CA

DA: Densidad aparente. C<sub>org</sub>T: Carbono orgánico total. CE: conductividad eléctrica. CA: textura franco arenosa.

Los suelos en este sitio son de textura franco-arenosa, son ligeramente ácidos, de baja densidad aparente y de una porosidad medianamente abundante. El porcentaje de carbono orgánico total variable entre horizontes en todo el perfil exhibe un cambio en los procesos pedogenéticos probablemente interrumpidos por la deposición continua de material volcánico.

**Cuadro 8.** Propiedades del perfil determinadas en la evaluación edafocológica

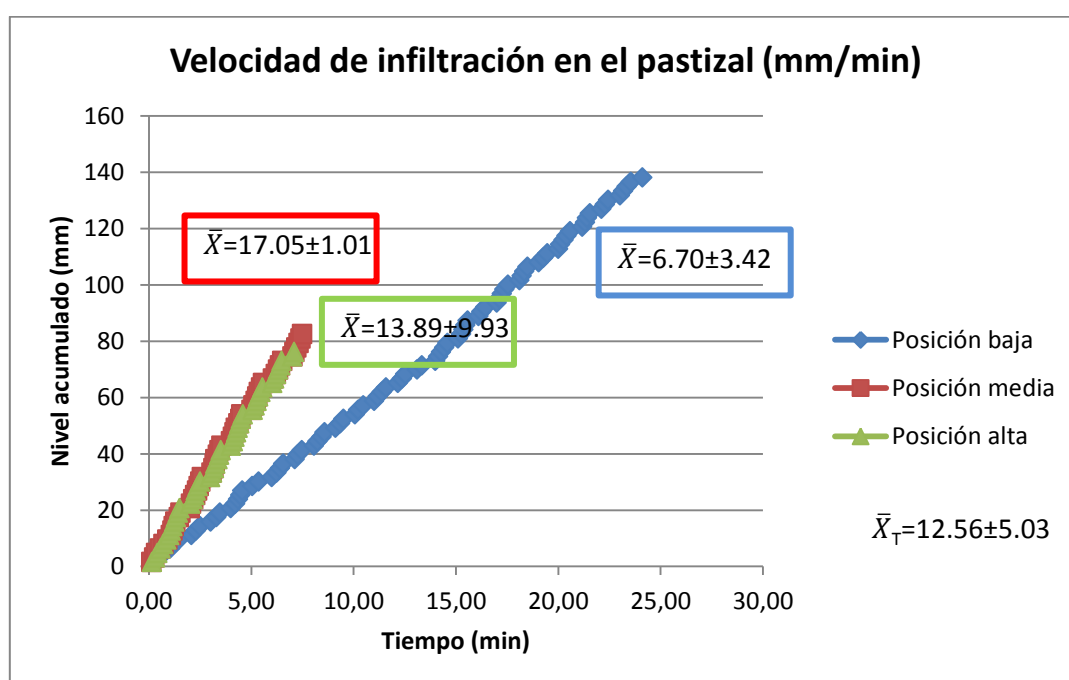
Horizonte (cm)	Conductividad hidráulica (cmd <sup>-1</sup> )	dCC (Lm <sup>-2</sup> )	CC (Lm <sup>-2</sup> )	M.O. (%)	N <sub>dis</sub> (gm <sup>-2</sup> )	P <sub>mo</sub> (gm <sup>-2</sup> )
<b>0-13</b>	40-100	35.10	54.60	5.64	1.71	68.43
<b>13-28</b>	100-300	27.00	79.50	4.29	1.60	63.86
<b>28-37</b>	40-100	24.50	38.31	4.96	0.78	31.05
<b>37-52</b>	100-300	26.64	77.76	4.47	1.05	41.85
<b>52-&gt;95</b>	100-300	78.75	229.88	6.78	4.46	178.36
<b>Total:</b>	Alta a muy alta	192 (alta)	480 (alta)	Media alta	9.59 (media alta)	383.55 (muy alta)

Nota: dCC: Agua disponible para las plantas. CC: Capacidad de campo. M.O.: Materia orgánica. N<sub>dis</sub>: Nitrógeno disponible. P<sub>mo</sub>: Fósforo móvil.

La textura de los suelos y el porcentaje de porosidad que aumenta con la profundidad propician una conductividad hidráulica alta a muy alta. Por otra parte, la evaluación edafológica señala contenidos altos de retención de agua disponible para las plantas y de capacidad de campo. Los valores de medios a altos de materia orgánica así como el contenido de elementos disponibles, refieren a que existe una adecuada actividad biológica y que el suelo cumple la función como almacén de carbono.

## Velocidad de infiltración

En la figura 18 se muestran los resultados de la velocidad de infiltración en cada posición medida. La velocidad de infiltración en promedio del sitio, respecto a la textura franco arenosa que presenta el perfil de suelo, es muy rápida (Clasificación “muy rápida” mayor a 25 cm/h ó 4.1 mm/min en FAO (2003)). Brouwer et al. (1988) reportan una velocidad de infiltración de 10 a 30 mm/min para suelos de franco a franco arenosos. Ramírez-Santiago (2016) reporta una velocidad de infiltración de 17.45mm/min en suelos arenosos a una altitud de 3774msnm a una pendiente de 28% en la localidad de Altzomoni, en el Parque Nacional.



**Figura 18.** Velocidad de infiltración en las tres posiciones de la ladera en el pastizal. Nota: los cuadros indican los promedios de los valores en cada posición.  $\bar{X}_T$ : Promedio total entre las posiciones de la ladera.

Para poder comprender mejor cómo es la capacidad del suelo del pastizal para infiltrar el agua, en el cuadro 16 se reflejan los valores con las mismas unidades de la velocidad de infiltración, la conductividad hidráulica de los horizontes (rangos obtenidos de la evaluación edafocológica) y se extrajo del climograma de precipitación anual (capítulo *Caracterización del área de estudio*) el día de lluvia máxima que corresponde al 9 de septiembre, que fue el mes de mayor precipitación.

**Cuadro 9.** Velocidad de infiltración y conductividad hidráulica en el pastizal y precipitación en la zona de pastizal

Velocidad de infiltración <sup>1</sup> (mm/día)	Conductividad hidráulica <sup>2</sup> (mm/día) (n=5)		Precipitación <sup>3</sup> (mm/día)
	Mínimo	Máximo	
18 068.74±7 635.53	3 800	11 000	25.8

Nota: <sup>1</sup>Promedio total de las tres posiciones. <sup>2</sup>Calculada de la evaluación edafocológica. Suma de los cinco horizontes. <sup>3</sup>Evento máximo de lluvia del mes con mayor precipitación (9 de septiembre).

Si el evento máximo de lluvia en un día puede ser de 25 milímetros, el suelo del pastizal es capaz de infiltrar esa cantidad, por los valores que presenta tanto la conductividad hidráulica como la velocidad de infiltración, tomando en cuenta que ésta se midió a saturación, el suelo aún en condiciones de saturación es capaz de infiltrar más de 700 veces lo que precipita, sin considerar las salidas de agua como evaporación y transpiración.

### **Propiedades del suelo en el pastizal con zanjas**

Localidad: Altzomoni, municipio de Amecameca, estado de México.

UTMx: 536689 E

UTMy: 2113312 N

Altitud: 3 858 msnm

Fecha de descripción: Marzo 1, 2015.

Paisaje: Valle intermontano

Posición fisiográfica: Ladera media      Forma: Ladera rectilínea convexa VL

Exposición: 282° Oeste      Pendiente: 15-20° Sencilla escarpada moderada

Clasificación de suelo: Andosol húmico melánico

### **Condiciones ambientales del sitio con zanjas**

Clima: “Cb(m)(w)ig” templado húmedo y frío.

Estado del tiempo: ET3 (Sin precipitación en las últimas 24 hrs.)

Temperatura media anual: 6.94 °C

Precipitación media anual: 1 359 mm

Material parental: Material volcánico de origen residual como cenizas y clastos volcánicos.

Uso de suelo y vegetación: Pastizal. Zacatonales amacollados.

En este perfil se identificaron cinco horizontes con cuatro procesos de pedogénesis. El perfil es profundo, de diferentes colores que van de marrón a negro, es poco pedregoso y con porosidad medianamente abundante. Presenta una estructura en bloques subangulares de grado moderado y débil. No tiene presencia de carbonatos pero si contenido de alofanos. Se observaron evidencias de procesos de interrupción de la pedogénesis como depósitos de material volcánico como tefras o lentes. Principalmente en el tercer y cuarto horizonte.

**Cuadro 10.** Descripción del perfil en el pastizal con zanjas

Horizonte	Profundidad (cm)	Características
Ah	0-18	Color 5YR1.7/1 (negro). Bloques subangulares finos de grado débil, rompen a granulares. Densidad aparente baja. Alta estabilidad de agregados. Densidad de raíces extremadamente alta. Muchos poros finos y medios intersticiales (inped y exped).
AB	18-40	Color 5YR1.7/1 (negro). Bloques subangulares medianos y finos de grado moderado, rompen a angulares y subangulares. Densidad aparente baja. Mediana estabilidad de agregados. Densidad de raíces muy alta. Muchos poros finos y muy finos intersticiales (inped y exped).
2AB <sub>1</sub>	40-56	Color 5YR1.7/1 (negro). Bloques subangulares medianos de grado moderado, rompen a subangulares. Densidad aparente baja. Estabilidad de agregados muy alta. Densidad de raíces muy alta. Muchos poros finos y muy finos intersticiales (inped y exped). Presencia de lentes marrón como depósitos de origen volcánico.
2AB <sub>2</sub>	56-89	Color 10YR 1.7/1 (negro). Bloques subangulares medianos y finos de grado débil, rompen a subangulares finos. Densidad aparente baja. Estabilidad de agregados alta. Densidad de raíces alta. Presencia de lentes marrón como depósitos de origen volcánico. Muchos poros finos intersticiales (exped) y pocos poros finos vesiculares (inped).
3Ah	89->115	Color 7.5YR 2/2 (very dark brown). Bloques subangulares finos de grado débil, rompen a subangulares finos. Densidad aparente baja. Estabilidad de agregados baja. Densidad de raíces mediana. Muchos poros finos intersticiales (inped y exped).



**Figura 19.** Perfil de suelo en pastizales con zanjas.

**Cuadro 11.** Propiedades del perfil determinadas en laboratorio en el sitio de pastizales con zanjas

Horizonte (cm)	DA (gcm <sup>-3</sup> )	Porosidad (%)	C <sub>org</sub> T (%)	pH	CE (μScm <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura
<b>0-18</b>	0.86	65.67	3.63	6.23	29.5	15.44	20	64.56	CA
<b>18-40</b>	0.91	63.47	2.24	6.09	28	10.8	17.64	71.56	CA
<b>40-56</b>	0.74	70.55	4.91	6.52	18	12.52	18	69.48	CA
<b>56-89</b>	0.97	62.97	1.46	6.55	19.5	9.8	16.64	73.56	CA
<b>89-&gt;115</b>	0.65	75.27	3.35	6.62	25.5	8.24	18.64	73.12	CA

DA: densidad aparente. C<sub>org</sub>T: Carbono orgánico total. CE: conductividad eléctrica. CA: textura franco arenosa.

Los suelos presentan una textura franca arenosa, pH ligeramente ácido, una baja densidad aparente un porcentaje de porosidad medianamente abundante. Tanto el contenido de carbono orgánico, la densidad aparente y el porcentaje de arcilla son variables en todo el perfil, lo que es indicativo de la interrupción de la pedogénesis.

**Cuadro 12.** Propiedades del perfil determinadas en la evaluación edafocológica

Horizonte (cm)	Conductividad hidráulica (cmd <sup>-1</sup> )	dCC (Lm <sup>-2</sup> )	CC (Lm <sup>-2</sup> )	M.O. (%)	N <sub>dis</sub> (gm <sup>-2</sup> )	P <sub>mo</sub> (gm <sup>-2</sup> )
<b>0-18</b>	40-100	15.13	23.65	6.3	2.41	96.55
<b>18-40</b>	100-300	7.05	21.38	3.9	1.89	75.74
<b>40-56</b>	40-100	19.10	32.13	8.5	2.44	97.62
<b>56-89</b>	100-300	5.92	12.26	2.5	1.86	74.42
<b>89-&gt;115</b>	100-300	8.76	18.28	5.8	2.43	97.04
<b>Total:</b>	Alta a muy alta	56 (baja)	108 (muy baja)	Media alta	11.03 (media alta)	441.37 (muy alta)

Nota: dCC: Agua disponible para las plantas. CC: Capacidad de campo. M.O.: Materia orgánica. N<sub>dis</sub>: Nitrógeno disponible. P<sub>mo</sub>: Fósforo móvil.

La alta conductividad hidráulica que indica la evaluación edafocológica se corresponde con el porcentaje de poros, abundancia y tamaño de los mismos. Sin embargo el suelo presenta una capacidad de campo y retención de agua disponible para las plantas muy baja y baja respectivamente.

El perfil al igual que en el sitio control posee una cantidad de materia orgánica media alta, así como contenidos altos de elementos disponibles.

### 8.1.2. Bosque de pino



**Figura 20.** Panorama del bosque de pino con pastizal.



## **Propiedades del suelo en el bosque de pino sin zanjas**

Localidad: Las Quintas, municipio de Amecameca, estado de México

UTMx: 537686 E

UTMy: 2112071 N

Altitud: 3 793 msnm

A 70 m aprox. al noroeste del sitio de bosque con zanjas.

Fecha de descripción: Abril 10, 2015.

Paisaje: Valle intermontano

Posición fisiográfica: Ladera media    Forma: Ladera rectilínea convexa VL

Exposición: 306°NO                      Pendiente: 15-20° Sencilla escarpada moderada

Clasificación de suelo: Andosol húmico

### **Condiciones ambientales del sitio**

Clima: “Cb(m)(w)ig” templado húmedo y frío.

Estado del tiempo: ET3 (Sin precipitación en las últimas 24 hrs.)

Temperatura media anual: 6.94°C

Precipitación media anual: 1 359 mm

Material parental: Depósito de material volcánico

Uso de suelo y vegetación: Forestal. Bosque de pino con pastos amacollados

En este perfil profundo, se ha desarrollado una capa de mantillo de un espesor de 2 cm, la cual le concede una mayor estabilidad a los agregados de los horizontes superficiales. En él se identificaron cuatro horizontes con tres etapas de pedogénesis, conformados principalmente de horizontes minerales. Se muestra una estructura en bloques subangulares de grado de moderado y una alta estabilidad de agregados en todo el perfil, del mismo modo la densidad de raíces es tal que alcanza horizontes inferiores propiciando un espacio radicular profundo.

En estos suelos poco pedregosos, se identifican rasgos de suelos volcánicos como la presencia de alófanos revelada por la identificación de aluminio activo, así como algunos depósitos de material volcánico en horizontes inferiores.

**Cuadro 13.** Descripción del perfil en el bosque sin zanjas

Horizonte	Profundidad (cm)	Características
L	0-2	Presencia de mantillo
Ah	2-10	Color 7.5 YR 2/1 (negro). Bloques subangulares medianos y finos de grado moderado, rompen a subangular medio. Densidad aparente baja. Alta estabilidad de agregados. Densidad de raíces muy baja. Muy pocos poros finos vesiculares (inped y exped).
A	10-23	Color 10 YR 2/1 (negro). Bloques subangulares medianos a gruesos de grado moderado, rompen a subangular medio. Densidad aparente baja. Alta estabilidad de agregados. Densidad de raíces moderada. Poros comunes finos tubulares y vesiculares (inped y exped).
2Ah	23-57	Color 10 YR 2/1 (negro). Bloques subangulares gruesos a finos de grado moderado, rompen a subangular fino. Densidad aparente baja. Alta estabilidad de agregados. Densidad de raíces alta. Pocos poros finos vesiculares (inped y exped).
3Ah	57->90	Color 10 YR 2/2 (muy negro). Bloques subangulares gruesos a finos de grado moderado, rompen a subangular fino. Densidad aparente baja. Alta estabilidad de agregados. Densidad de raíces mediana. Muy pocos poros muy finos vesiculares (inped y exped).

El color del perfil va de oscuro a muy oscuro en el último horizonte, señalando un mayor contenido de materia orgánica, lo cual se identifica con el contenido de carbono orgánico que es mayor en el último horizonte.

**Cuadro 14.** Propiedades del perfil determinadas en laboratorio en el sitio de bosque (BC)

Horizonte (cm)	DA (gcm <sup>-3</sup> )	Porosidad (%)	C <sub>org</sub> T (%)	pH	CE (μScm <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura
<b>2-10</b>	0.8	59.91	3.79	5.95	44	12.44	16.64	70.92	CA
<b>10-23</b>	1.12	52.94	2.32	6.48	27.5	11.8	20	68.2	CA
<b>23-57</b>	0.66	72.43	3.51	6.63	20	9.8	21.64	68.56	CA
<b>57-&gt;90</b>	0.59	70.87	5.82	6.80	20.5	20.44	21.64	57.92	CRA

Los suelos en este sitio poseen un pH más ácido que en los pastizales, lo cual es más prominente en los horizontes superficiales posiblemente debido a la acidez promovida por la descomposición de las acículas de pino. La densidad aparente es más baja que en los perfiles del pastizal.

**Cuadro 15.** Propiedades del perfil en bosque con base en la evaluación edafocológica

Horizonte (cm)	Conductividad hidráulica (cmd <sup>-1</sup> )	dCC (Lm <sup>-2</sup> )	CC (Lm <sup>-2</sup> )	M.O. (%)	N <sub>dis</sub> (gm <sup>-2</sup> )	P <sub>mo</sub> (gm <sup>-2</sup> )
<b>2-10</b>	100-300	14.8	43.2	6.5	1.04	41.6
<b>10-23</b>	10-40	29.9	48.1	4.0	1.46	58.2
<b>23-57</b>	40-100	58.1	162.2	6.1	3.08	123.2
<b>57-&gt;90</b>	40-300	68.3	175.2	10.0	4.38	175.2
<b>Total:</b>	Mediana a muy alta	171 (alta)	429 (alta)	Media alta a alta	9.96 (media alta)	398.27 (muy alta)

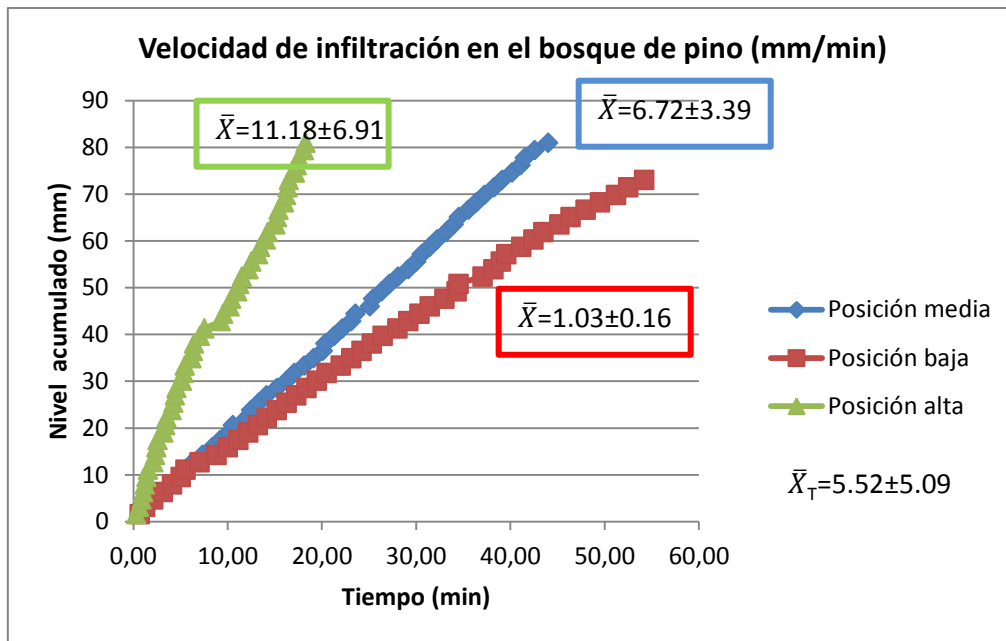
Nota: dCC: Agua disponible para las plantas. CC: Capacidad de campo. M.O.: Materia orgánica. N<sub>dis</sub>: Nitrógeno disponible. P<sub>mo</sub>: Fósforo móvil.

Tanto su textura franco-arenosa y franco arcillo arenosa como el porcentaje de porosidad, son rasgos que corresponden con una conductividad hidráulica de mediana a muy alta en todo el perfil. Por otra parte existe una alta capacidad de campo y retención de agua disponible para las plantas cuyos nutrientes, nitrógeno y fósforo están disponibles en una cantidad media alta a muy alta.

El contenido de materia orgánica contenido en el perfil, en particular con un mayor porcentaje en el último horizonte identificado, refleja la capacidad del suelo en este sitio como reserva de carbono.

### Velocidad de infiltración

La figura 20 muestra la velocidad de infiltración del suelo promedio de las tres posiciones en el bosque de pino. La velocidad de infiltración del suelo en promedio es rápida (Clasificación “rápida” 12.7 a 25 cm/h ó 2.1 a 4.16 mm/min en FAO (2003)) aunque menor comparada con el suelo del pastizal.



**Figura 21.** Velocidad de infiltración en las tres posiciones de la ladera en el bosque de pino. Nota: los cuadros indican los promedios de los valores en cada posición.  $\bar{X}_T$ : Promedio total entre las posiciones de la ladera.

Al igual que en el pastizal, en el cuadro 16 se reflejan los valores con las mismas unidades de la velocidad de infiltración, la conductividad hidráulica de los horizontes y el día de lluvia máxima que corresponde al 9 de septiembre, que fue el mes de mayor precipitación.

**Cuadro 16.** Velocidad de infiltración y conductividad hidráulica del bosque de pino y precipitación.

Velocidad de infiltración <sup>1</sup> (mm/día)	Conductividad hidráulica <sup>2</sup> (mm/día) (n=4)		Precipitación <sup>3</sup> (mm/día)
	Mínimo	Máximo	
9087.6±7327.72	1 900	7 400	25.8

Nota: <sup>1</sup>Promedio total de las tres posiciones. <sup>2</sup>Calculada de la evaluación edafocológica. Suma de los cinco horizontes. <sup>3</sup>Evento máximo de lluvia del mes con mayor precipitación (9 de septiembre).

Considerando estos resultados de conductividad hidráulica y de velocidad de infiltración y que el evento máximo de lluvia es de 25.8 mm en un día, el suelo posee una alta capacidad para infiltrar el agua. El suelo del bosque por tanto cumple con la función natural de permear el agua que precipita y regular el ciclo hidrológico. Castro-Alonso (2009) reporta una conductividad hidráulica de 8.16 mm/min (11 750 mm/día) en una asociación de bosque de pino con pastizal conservado en la zona del Parque Nacional.

## **Propiedades del suelo en bosque de pino con zanjas**

Localidad: Las Quintas, municipio de Amecameca, estado de México

UTMx: 536786 E

UTMy: 2112052 N

Altitud: 3 793 msnm

Fecha de descripción: Marzo 2, 2015.

Paisaje: Valle intermontano

Posición fisiográfica: Ladera media    Forma: Ladera rectilínea convexa VL

Exposición: 264° Oeste                      Pendiente: 15-20° Sencilla escarpada moderada

Clasificación de suelo: Andosol húmico melánico

## **Condiciones ambientales del sitio con zanjas**

Clima: “Cb(m)(w)ig” templado húmedo y frío.

Estado del tiempo: ET3 (Sin precipitación en las últimas 24 hrs.)

Temperatura media anual: 6.94°C

Precipitación media anual: 1 359 mm

Material parental: Depósito de material volcánico

Uso de suelo y vegetación: Forestal. Bosque de pino.

Al igual que en el sitio sin zanjas, se identificaron cuatro horizontes minerales, cada uno de diferentes procesos de pedogénesis. El perfil de suelo es profundo, su color no es homogéneo puesto que es un tanto más gris en el primer horizonte (debido a una humedad actual más baja) y se torna marrón en el último horizonte, a causa de la presencia de concreciones de depósitos volcánicos con una abundancia del 25% en todo el horizonte.

El perfil presenta muy poca pedregosidad la cual consiste de piedras y gravas finas y medianas presentes solo en los horizontes inferiores. Predomina una estructura subangular media de grado débil, con excepción del primer horizonte cuya estructura es

de tipo migajón que aunque tenga un grado débil y posee una alta estabilidad de agregados, explicada por una densidad de raíces extremadamente alta.

La abundancia y tamaño de poros es menor en horizontes inferiores así como la estabilidad de agregados y la densidad de raíces que disminuyen con la profundidad. Al igual que los otros perfiles, se infiere la presencia de alófanos a partir de la señal de aluminio activo.

**Cuadro 17.** Descripción del perfil del bosque con zanjas.

Horizonte	Profundidad (cm)	Características
Ah	0-20	Color 7.5YR 3/1 (very dark gray). Migajón fino de grado débil, rompe a subangular. Densidad aparente baja. Alta estabilidad de agregados. Densidad de raíces extremadamente alta. Muchos poros muy finos intersticiales y vesiculares (inped y exped).
2Ah	20-52	Color 7.5YR 2/1 (negro). Bloques subangulares medianos de grado débil, rompe a subangular. Densidad aparente baja. Moderada estabilidad de agregados. Densidad de raíces alta. Poros comunes muy finos intersticiales (inped y exped).
3Ah	52-70	Color 7.5YR 2/1 (negro). Bloques subangulares medianos de grado débil, rompe a subangular. Densidad aparente baja. Moderada estabilidad de agregados. Densidad de raíces mediana. Pocos poros microscópicos intersticiales (inped).
4Ah	70->105	Color 7.5YR 2/2 (very dark Brown). Bloques subangulares medianos de grado débil, rompe a subangular. Densidad aparente mediana. Baja estabilidad de agregados. Densidad de raíces baja. Pocos poros microscópicos intersticiales (inped).



**Figura 22.** Perfil de suelo en el bosque de pino con zanjas.

**Cuadro 18.** Descripción del perfil del bosque con zanjas

Horizonte (cm)	DA ( $\text{gcm}^{-3}$ )	Porosidad (%)	C <sub>org</sub> T (%)	pH	CE ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ )	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura
<b>0-20</b>	0.66	48.78	5.27	5.77	36.5	13.44	15.64	70.92	CA
<b>20-52</b>	0.86	66.53	2.17	6.24	26.5	9.44	19.64	70.92	CA
<b>52-70</b>	0.86	66.57	2.49	6.37	20	10.44	24.64	64.92	CA
<b>70-&gt;105</b>	0.67	71.08	2.85	6.44	28	10.44	22.28	67.28	CA

DA: densidad aparente. C<sub>org</sub>T: carbono orgánico total. CE: conductividad eléctrica. CA: textura franco arenosa.

El perfil de suelo presenta una textura franca arenosa, es ligeramente ácido aumentando aunque muy poco con la profundidad. Posee una densidad aparente baja y una porosidad que aumenta con la profundidad.

**Cuadro 19.** Propiedades del perfil en bosque con base en la evaluación edafocológica

Horizonte (cm)	Conductividad hidráulica ( $\text{cmd}^{-1}$ )	dCC ( $\text{Lm}^{-2}$ )	CC ( $\text{Lm}^{-2}$ )	M.O. (%)	N <sub>dis</sub> ( $\text{gm}^{-2}$ )	P <sub>mo</sub> ( $\text{gm}^{-2}$ )
<b>0-20</b>	400-100	65	106	9.1	3.00	120.12
<b>20-52</b>	400-100	89.6	142.4	3.7	2.55	101.82
<b>52-70</b>	400-100	65.34	106.7	4.3	2.01	80.54
<b>70-&gt;105</b>	400-100	102.90	168.07	4.9	2.82	112.61
<b>Total:</b>	Alta	322.84 (muy alta)	523 (muy alta)	Media alta a alta	10.38 (Media alta)	415.09 (Muy alta)

Nota: dCC: Agua disponible para las plantas. CC: Capacidad de campo. M.O.: Materia orgánica. N<sub>dis</sub>: Nitrógeno disponible. P<sub>mo</sub>: Fósforo móvil.

El suelo posee una alta conductividad hidráulica que corresponde con el porcentaje de porosidad que aumenta la profundidad. Por otro lado los valores de retención de agua disponible para las plantas y de capacidad de campo son muy altos. El contenido de materia orgánica media a alta y de elementos disponibles para las plantas lo facultan para una adecuada actividad biológica.

## 8.2. Las zanjas trinchera

Sobre la determinación del número de zanjas por hectárea en el sitio de pastizales se halló una cantidad de 12 zanjas en una columna y 11 zanjas en una fila en una superficie de 0.25 hectáreas en el sitio de pastizales dando un total de 132 zanjas. Respecto al sitio de bosque se hallaron 9 zanjas por columna y 8 por fila en la misma superficie dando un total de 72 zanjas. Tales valores se proyectaron a una hectárea, obteniendo así 528 zanjas en los pastizales y 288 zanjas en el bosque por hectárea.

En el cuadro 20 se muestra un comparativo de las medidas obtenidas en campo para ambos sitios y las dimensiones propuestas en el Manual de Criterios Técnicos para la Ejecución de Proyectos de Conservación y Restauración de Suelos de CONAFOR (2012).

**Cuadro 20.** Dimensiones y número de zanjas para los sitios de Pastizal subalpino (PZ) y Bosque de pino (BZ) y recomendadas por CONAFOR.

<b>Atributo de la zanja</b>	<b>Dimensiones en campo para PZ (m) (n=9)</b>	<b>Dimensiones en campo para BZ (m) (n=9)</b>	<b>Dimensiones de acuerdo a CONAFOR,2012 (m)</b>
Largo de la zanja	1.85-2.3	1.97-2.24	2
Ancho de la zanja	0.46-0.7	0.46-0.56	0.4
Profundidad	0.63-0.73	0.4-0.59	0.4
No. de zanjas (por ha)	528	288	250
Disposición	Tresbolillo	Tresbolillo	Tresbolillo

El atributo que más resalta es la cantidad de zanjas por hectárea, ya que el número de zanjas calculadas supera a las que se recomiendan por CONAFOR, siendo incluso más del doble de zanjas en la zona de pastizales.

Así mismo existe una variabilidad entre las dimensiones de las zanjas para ambos sitios y las recomendadas, la cual pudiera atribuirse a las modificaciones sufridas a través del tiempo, teniendo en cuenta que estas zanjas se construyeron hace 8 años y 11 años (cuadro 5 en métodos) en el sitio de pastizal y bosque respectivamente. las cuales se infieren a través de rasgos de erosión observados en las aristas superiores de las zanjas. Del mismo modo en las zanjas de ambos sitios se observaron rasgos de azolve al interior de las mismas.



### Dimensiones de los bordos de las zanjas

Al medir el largo y ancho de los bordos de las zanjas, se encontró un rango amplio de dimensiones como se muestra en el siguiente cuadro.

**Cuadro 21.** Dimensiones de los bordos en los sitios de estudio

Pastizal (PZ)			Bosque (BZ)		
No. De Zanja	Ancho de Bordo (m)	Largo de Bordo (m)	No. De Zanja	Ancho de Bordo (m)	Largo de Bordo (m)
1	1.7	2.3	1	1.76	2.4
2	0.8	2.23	2	1.76	2.5
3	1.64	2.23	3	1.72	2.4
4	1.6	2.3	4	1.83	1.95
5	1.4	2.1	5	1.8	2.29
6	1.7	2.6	6	1.8	2.3
7	2.2	2.32	7	1.8	2.64
8	2.33	1.75	8	1.8	2.35
9	1.8	2.35	9	1.8	2.36
<b>Promedio</b>	<b>1.69±0.44</b>	<b>2.24±0.23</b>	<b>Promedio</b>	<b>1.79±0.03</b>	<b>2.35±0.19</b>

Además de la variabilidad de dimensiones de los bordos, el aspecto de estos es diferente entre los sitios, puesto que se observaron bordos muy compactados así como intensamente disgregados. Cabe decir que un elemento importante para la retención y cubierta de los sedimentos del bordo es la cobertura vegetal y de materia orgánica, como la capa de mantillo presente en los bosques de pino que se ilustra en la figura 23.



**Figura 23.** Aspecto de los bordos en a) bosque de pino y b) pastizal. Marzo, 2015.

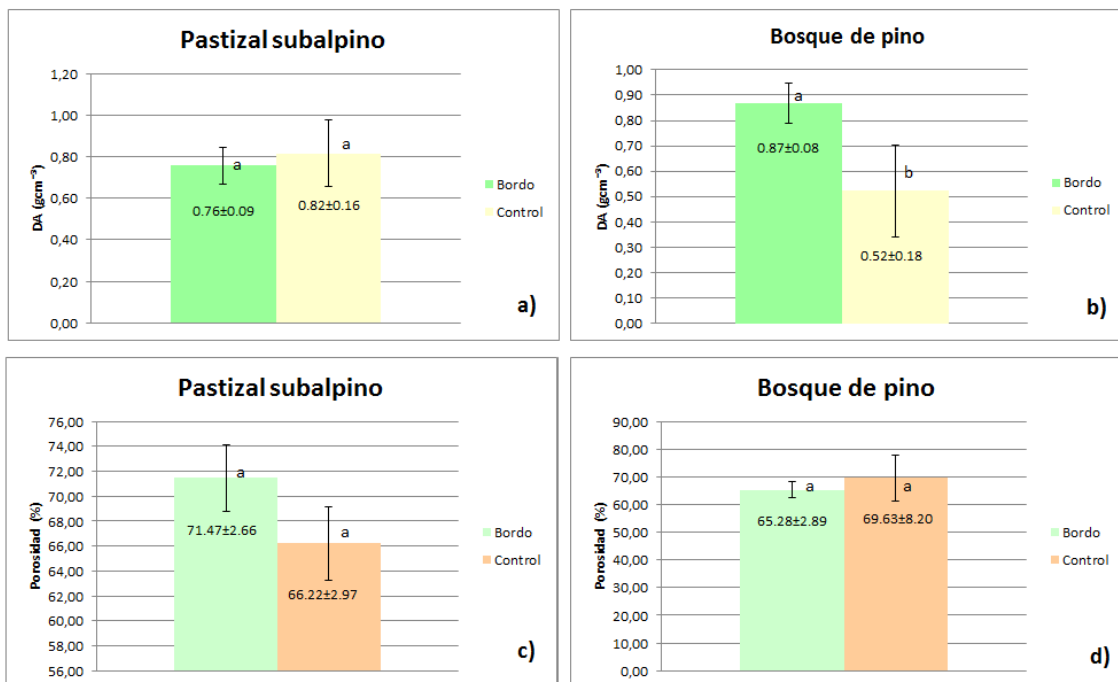
### 8.3. Efectos de las zanjas trinchera

En la figura 24 se presentan los valores graficados para las variables densidad aparente y porosidad entre los bordos de las zanjas y las muestras control tanto en el pastizal subalpino como en el bosque de pino. Se puede observar que la densidad aparente con respecto al pastizal es menor en el bordo y mayor en el sitio control. En cuanto al bosque de pino, es mayor en el bordo y menor en el sitio control.

La porosidad por tanto tiene valores más bajos en los puntos control que en los bordos en el pastizal y es mayor en el sitio control del bosque de pino. Es importante considerar que los diferentes tiempos en que se construyeron las zanjas en cada sitio, podrían intervenir en estos resultados.

En la única variable donde se aprecian diferencias significativas de acuerdo a la prueba t de Student, es en la densidad aparente en el sitio de bosque de pino.

En el bosque de pino existe un efecto visible en cuanto a la porosidad, puesto que los resultados indican que el suelo removido de las zanjas ha disminuido el valor de esta propiedad del suelo.



**Figura 24.** Densidad aparente entre los bordos de las zanjas y los puntos control para a) el pastizal subalpino y b) bosque de pino. Porcentaje de porosidad para c) pastizal subalpino y d) bosque de pino. Las letras diferentes indican diferencias significativas en la prueba t de Student (n=3).

Los valores de los efectos del volumen de suelo extraído, la superficie de suelo cubierta por el bordo de la zanja y el carbono orgánico expuesto, derivados de la construcción de zanjas trinchera se muestran en el cuadro 22.

**Cuadro 22.** Impactos de las zanjas trincheras en los sitios de pastizal y bosque

Efecto	Pastizal		Bosque	
	Por zanja	Por ha	Por zanja	Por ha
<b>Suelo extraído (ton)</b>	0.72±0.17	381.92±87.56	0.46±0.08	133.39±23.27
<b>Suelo cubierto por bordo (m<sup>2</sup>)</b>	3.76±0.95	1983.09±500.21	4.20±0.31	1210±88.89
<b>Carbono expuesto (ton)</b>	0.027±0.006	10.18±2.32	0.015±0.003	1.92±0.33

Cómo se aprecia, la proporción de suelo extraído en los pastizales es más del doble que del bosque de pino, lo cual se explica por una mayor profundidad de las zanjas en el sitio de los pastizales (de 0.63 a 0.73m) y por tanto un mayor volumen de suelo removido.

En el caso del suelo cubierto por el bordo, los resultados son semejantes entre ambos sitios, ya que las dimensiones de los bordos se encuentran en un rango similar tal como se muestra en el cuadro 21.

El carbono orgánico expuesto en el bordo es mayor en los pastizales, incluso más de cinco veces mayor que el del bosque. Todos los efectos son mayores por hectárea en el sitio de pastizales debido a la mayor cantidad de zanjas en este sitio.

Tomando en cuenta el área abarcada por la zanja y el área ocupada por el bordo de la misma, la suma de ambos representa una perturbación en la superficie del suelo del 15.11% en bosques y 25.9% en pastizales en una hectárea, como se ilustra en la figura 25.

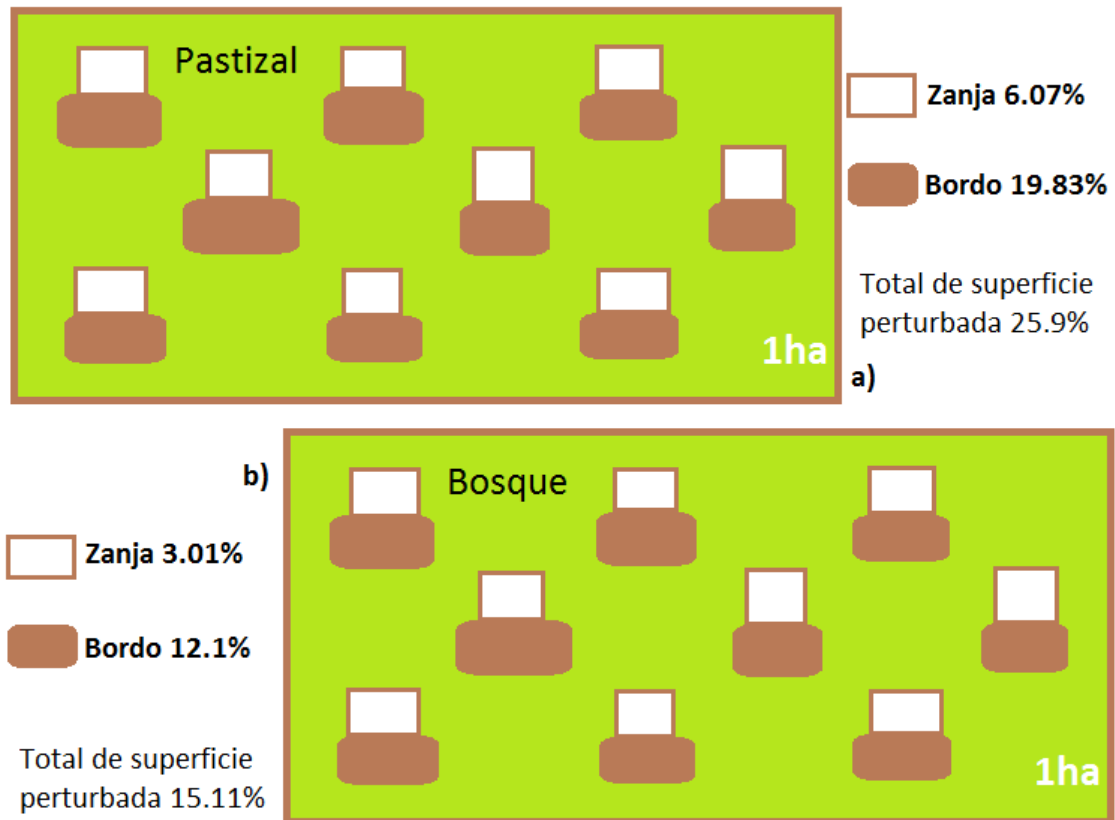


Figura 25. Impacto de la superficie en una hectárea en a) el pastizal subalpino y b) el bosque de pino por zanja y bordo.

#### 8.4. Impacto de las zanjas en las funciones del suelo

##### Impacto en el almacenamiento de carbono

La figura 26 muestra el contenido de carbono orgánico del suelo que se pierde por la construcción de las zanjas (columnas magenta).

Tomando en cuenta que en el pastizal existe una cantidad restante de  $210.22 \text{ ton C ha}^{-1}$  y en el bosque de pino una cantidad de  $245.89 \text{ ton C ha}^{-1}$ , se perdería más del 10% de COS en el pastizal subalpino y casi el 5% de COS en el bosque de pino.

Puede observarse cómo los efectos son diferentes para cada tipo de vegetación, presumiendo que el pastizal puede ser más vulnerable a estos efectos.

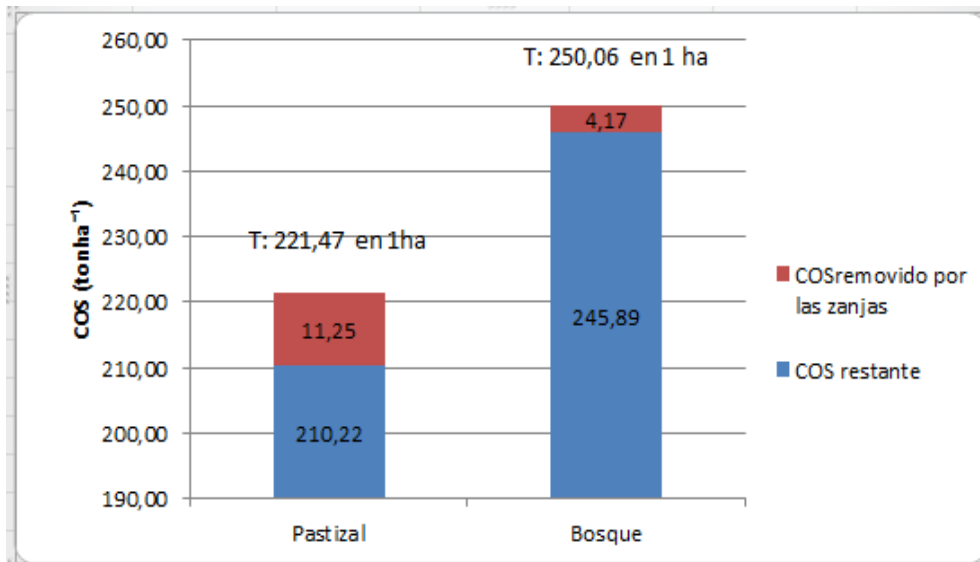


Figura 26. Diagrama de barras que muestra la cantidad de COS por sitio que se remueve por la excavación de zanjas. T: total de COS en cada sitio. Nota: Coma decimal.

### 8.5. Presencia de erosión y grado de agregación

#### Estabilidad de agregados en los bordos

A continuación se exponen los resultados de los porcentajes de agregados retenidos en las diferentes fracciones de tamices empleados en el método de Yoder modificado para las muestras control y bordo y frente de la zanja para los sitios de pastizal y bosque.

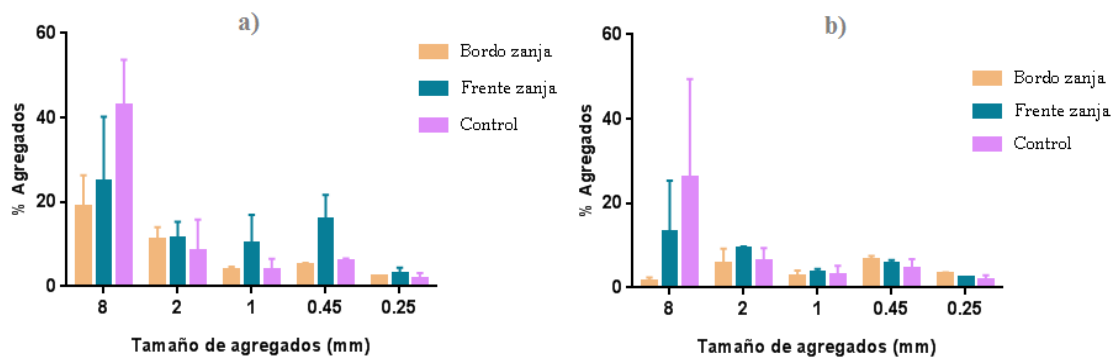


Figura 27. Distribución de los agregados obtenidos por tamaño de los bordos y frentes de zanja y de los puntos control para a) bosque de pino y b) pastizal.

Tanto en el pastizal como en el bosque, los sitios control contienen una mayor proporción de agregados de mayor tamaño, siendo el bosque el que presenta un porcentaje más alto de esta fracción.

Para notar una mayor diferencia entre los tamaños de agregados, a continuación se muestran clasificados por grupos de agregados de la forma siguiente:

- Macroagregados (>2mm) (“MA”)
- Mesoagregados (2mm-0.2mm) (“MeA”)
- Microagregados (<0.2mm) (“ $\mu$ A”)

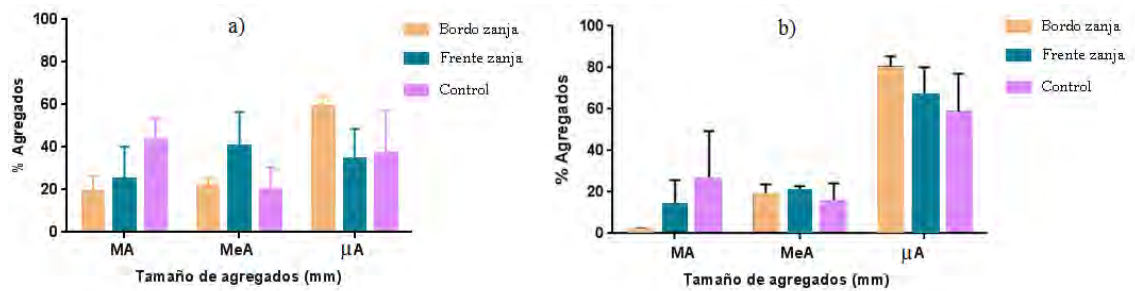


Figura 28. Agregados macroagregados (MA), mesoagregados (MeA) y microagregados ( $\mu$ A) en a) bosque y b) pastizal.

Existe un contraste más alto entre los puntos de las zanjas y el control en el sitio de pastizal. Como puede notarse, el pastizal presenta una mayor proporción de microagregados en el bordo de la zanja en comparación con el bosque. Este resultado puede deberse a la disgregación que sufrió el suelo al excavar, así como la señal observada en estos bordos en el pastizal, que carecían de alguna cubierta vegetal.

Se presenta también una diferencia de proporciones entre los tamaños de agregados en el frente de las zanjas para ambos sitios, ya que los valores son semejantes a los bordos en las fracciones mayores a 2 milímetros y menores a 2 milímetros en el bosque y el pastizal respectivamente.

## Análisis de varianza

El cuadro 23 muestra la prueba de ANOVA de dos vías realizada entre los bordos y frentes de zanja y el control en cada fracción de agregados para ambos sitios de estudio.

**Cuadro 23.** Prueba ANOVA por fracción de agregados en los sitios de pastizal y bosque

Factor	Pastizal		Bosque	
	F calculada	$\mu_1$ y $\mu_2$	F calculadas	$\mu_1$ y $\mu_2$
8 mm	1.897	Iguals	3.486	Diferentes
2 mm	1.403	Iguals	0.307	Iguals
1 mm	0.159	Iguals	2.171	Iguals
0.45 mm	1.788	Iguals	9.379	Diferentes
0.25 mm	4.117	Diferentes	1.032	Iguals

$F_{tab} = 3.143$ ,  $\alpha = 0.05$ . Dos vías.

Como se muestra en el análisis estadístico, existe alguna diferencia significativa entre los puntos de muestreo en ambos sitios. Tal diferencia se puede notar en la fracción de 0.25mm contenida en el grupo de los mesoagregados en el pastizal y las fracciones 0.45mm y 8 mm que contienen a los agregados de mayor tamaño en el bosque.

**Cuadro 24.** ANOVA por grupos de agregados en el pastizal y el bosque

Factor	Bosque		Pastizal	
	F calculada	$\mu_1$ y $\mu_2$	F calculadas	$\mu_1$ y $\mu_2$
MA	3.49	Iguals	1.9	Iguals
MeA	3.05	Iguals	0.56	Iguals
$\mu A$	2.53	Iguals	1.82	Iguals

$F_{tab} = 5.143$ ,  $\alpha = 0.05$ . Dos vías.

No se muestra una diferencia significativa entre las varianzas de los agregados clasificados por grupos.

## 8.6. Transporte de sedimentos en el bordo

A continuación se muestran las medidas registradas en el momento en que se colocaron las estacas de erosión (L1) y después de cinco meses después de ser colocadas (L2).

**Cuadro 25.** Alturas medidas en las estacas en el primer (L1) y segundo periodo (L2) para los sitios de bosque y pastizales

Bosque									
Zanja	Estaca 1			Estaca 2			Estaca 3		
	L 1 (cm)	L 2 (cm)	$\Delta L$ (cm)	L 1 (cm)	L 2 (cm)	$\Delta L$ (cm)	L 1 (cm)	L 2 (cm)	$\Delta L$ (cm)
1	16,5	17.4	0.9	18.5	19.5	1	15	15.3	0.3
3	22,6	-	-	22.3	21.9	-0.4	22.2	22.3	0.1
4	24	24.5	0.5	17.3	17.7	0.4	17.9	18.2	0.3
5	23,2	24	0.8	20.9	20.5	-0.4	23.1	23.9	0.8
6	19,6	21.2	1.6	20.4	20.6	0.2	22.7	24	1.3
7	20,7	21	0.3	21.2	20.8	-0.4	21.1	20.7	-0.4
8	23,1	23.8	0.7	22.4	22.9	0.5	20.7	21	0.3
9	20,6	20.5	-0.1	18.5	18.5	0	17.9	17.9	0
Pastizales									
Zanja	Estaca 1			Estaca 2			Estaca 3		
	L 1 (cm)	L 2 (cm)	$\Delta L$ (cm)	L 1 (cm)	L 2 (cm)	$\Delta L$ (cm)	L 1 (cm)	L 2 (cm)	$\Delta L$ (cm)
1	20	21.7	1.7	20	20.5	0.5	20	19,8	-0.2
2	20	20.6	0.6	20	19.5	-0.5	20	20,4	0.4
3	20	23	3	20	20.1	0.1	20	19,8	-0.2
4	20	21.3	1.3	20	19.9	-0.1	20	21	1
5	20	22.9	2.9	20	20.7	0.7	20	19,6	-0.4
6	20	21.6	1.6	20	20.4	0.4	20	20,3	0.3
7	20	21.4	1.4	20	20.5	0.5	20	19,9	-0.1
8	20	21.9	1.9	20	20.2	0.2	20	20,4	0.4
9	20	20.5	0.5	20	20.3	0.3	20	20,6	0.6

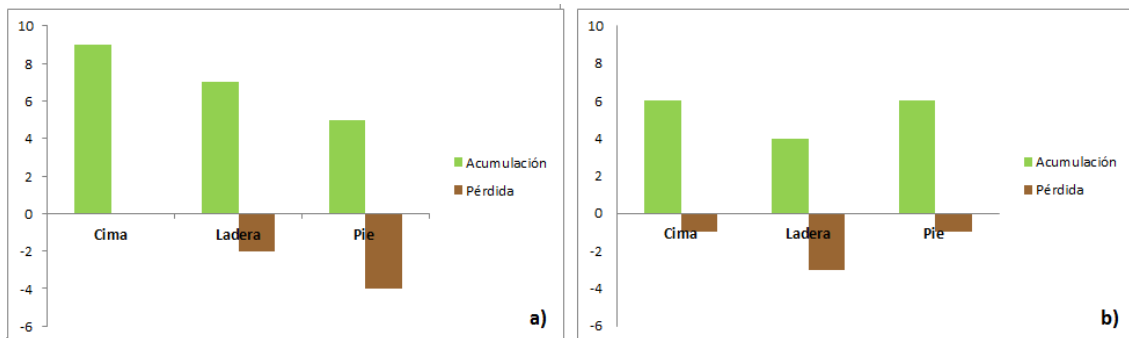
Nota: Los valores positivos en  $\Delta L$  indican acumulación de sedimentos en la estaca y los negativos indican pérdida. El símbolo (-) indica la ausencia de una estaca.

Salvo dos estacas de las 27, todas presentaron algún movimiento de sedimentos (desde 0.5 a 3cm) en el transcurso de los cinco meses de abril a agosto en que se colocaron, en los cuales aumentó la precipitación, tal como muestran los datos climáticos de la figura 5.



Para encontrar una tendencia posible, en cada posición de la estaca (Estaca 1, 2 y 3) se contó el número de frecuencias de los resultados de  $\Delta L$ , considerando los valores positivos como acumulación de sedimentos, los negativos como pérdida de sedimentos, así como los valores que no tenían ningún cambio.

La figura 28 muestra el número de frecuencias encontradas para cada grupo en las estacas de erosión.



**Figura 29.** Número de frecuencias registradas en la posición de los bordos (cima, ladera y pie) para los sitios de a) pastizal y b) bosque.

Estas clasificaciones de pérdida y acumulación refieren evidentemente a un tipo de movimiento presente en los sedimentos sobre las estacas.

Cómo puede notarse, en el bosque existe una frecuencia de acumulación mayor tanto en la posición superior como en la posición más baja del bordo. En cambio en el pastizal existe una mayor acumulación en la parte más alta del bordo. En ambos predomina una acumulación de los sedimentos en las estacas. Los resultados no presentan tendencia alguna, puesto que en cada altura del bordo pueden ocurrir estos movimientos alternadamente. Como ejemplo, se observaron pequeños pedestales en la parte superior de las estacas como efecto de la pérdida de suelo y montículos en la parte más baja del bordo como evidencias de acumulación, así como lo ilustra la figura 30.



**Figura 30.** a) Estacas colocadas en el pastizal y b) en el bosque. Evidencias de movimiento de partículas a partir de c) formación de pedestales, d) y f) sedimentos debajo de la marca inicial de la estaca, e) Acumulación de sedimentos impregnados en las estacas.

## 9. Discusión

La conservación de los suelos busca preservar la calidad de los mismos a través del cumplimiento de sus funciones ecológicas tal como lo refieren diversos autores (Hudson, 1993; Carter, 2002; Doran, 2002; De la Rosa, 2005; Blanco y Lal, 2008).

Las funciones de los suelos pueden estimarse por medio del uso de indicadores (Burger y Kelting, 1999; Doran y Zeiss, 2000; Grigal, 2000; Bronick y Lal, 2005; Karlen et al, 2008). En este estudio los indicadores medidos en campo y laboratorio, en los perfiles de los suelos del bosque y pastizal donde no se realizaron zanjas -tales como la densidad aparente, porosidad, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica- mostraron que estos suelos poseen propiedades adecuadas respecto a los parámetros observados de la evaluación ecológica. Asimismo la velocidad de infiltración de los suelos respecto a lo que precipita en un evento máximo de lluvia, mostró cómo el suelo por sí mismo es capaz de infiltrar el agua y por tanto no requiere ninguna intervención para “mejorar” una función que por naturaleza posee.

En cuanto a los sitios donde se construyeron zanjas trinchera, se observaron diferentes efectos en los suelos de los mismos. En principio el número de zanjas por hectárea en cada sitio rebasa el recomendado por CONAFOR (2012b) (250 zanjas por ha), lo cual está más acentuado en el sitio de pastizal. Estas diferencias llevan a pensar que estas técnicas se llevan a cabo sin un lineamiento o planificación por parte de ninguna organización, tanto de los organismos gubernamentales como de las empresas que financiaron su construcción.

Se encontraron cambios en la porosidad del suelo en los sitios con zanjas respecto a los sitios sin zanjas, presentando un efecto negativo significativo sobre esta propiedad en los bosques de pino con asociación de pastizales. Cotler et al. (2013) analizaron diferencias en los suelos con zanjas respecto a los suelos donde no se construyeron estas prácticas, en suelos arcillosos y arena arcillo limosos en diferentes tipos de vegetación (bosques de *Pinus* y *Quercus* y pastizales). En los suelos con zanjas encontraron una disminución en las propiedades del contenido de humedad, porosidad, densidad aparente, carbono y nitrógeno totales, con diferencias significativas en estas tres últimas propiedades.

En este estudio se determinaron además, los efectos evidentes de la excavación de zanjas como la cantidad de suelo removido y la superficie de suelo cubierta así como los efectos posibles como la cantidad de carbono orgánico expuesto. Estos efectos son más pronunciados en el pastizal, lo cual podría repercutir en la conservación de la vegetación, no sólo en las funciones del suelo, si no en la vegetación *per se* que representa el hábitat de diversas especies (incluso amenazadas como el teporingo), siendo contradictorio a los propósitos que involucra ser un Parque Nacional y Reserva de la Biosfera.

El carbono orgánico del suelo removido de ambos tipos de vegetación, podría exponerse a los agentes erosivos, principalmente en los sedimentos de los bordos de los pastizales (cantidad de carbono expuesto más de cuatro veces mayor que en el bosque por hectárea) que no están cubiertos por ninguna cobertura vegetal, lo que los haría más susceptibles a la erosión, mineralización y pérdida de carbono por liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera como lo han demostrado diversos estudios (Geissen, 2013; Jandl, 2007; Lal, 2003; Schlesinger, 1984; Woodwell, 2000). El material extraído por la construcción de las zanjas formaba parte de los primeros horizontes del suelo que se extrajo, en los cuales -respecto a los resultados de los perfiles de suelo- se encontró un alto contenido de materia orgánica. La ausencia de los horizontes en estos volúmenes de suelo extraído, afectaría posiblemente a las funciones de soporte de la vegetación, regulación del ciclo hidrológico, almacenamiento de carbono y hábitat en los suelos de estos sitios, ya que es en los primeros horizontes donde ocurren múltiples procesos multifases (Nimmo, 2005). Geissen (2013) encontró diferencias significativas entre sitios con los primeros 40cm de suelo removido y sitios no perturbados por una técnica de manejo de remoción de suelo (topsoil removal), destacando un aumento de la densidad aparente, reducción de la infiltración y porosidad del suelo así como una disminución de los contenidos de nitrógeno y carbono totales en los sitios con suelo removido.

La excavación de zanjas trinchera promueve la disminución de carbono orgánico del suelo (COS) en una forma considerable (de 4 a 11 toneladas por hectárea), mayoritariamente en los suelos del pastizal (más del 10% de pérdida de COS), lo cual podría tener un efecto negativo en el almacenamiento de carbono, que es indispensable para que dichos suelos cumplan las funciones como reserva de carbono y regulación del ciclo del mismo. Cruz y Etchevers (2011) determinaron que el contenido de COS en diversas áreas naturales protegidas es muy relevante para la calidad de sitio,

encontrando en los Parques Nacionales Izta-Popo y Zoquiapan de 23 a 238 y de 19 a 208 toneladas de carbono por hectárea respectivamente en suelos con textura franco arenosa en vegetación de bosque del género *Pinus*.

Aunque en este estudio no se determinó la sobrevivencia de las especies aforestadas en los bordos de las zanjas, se ha estudiado que la aforestación en la vegetación de pastizales posee un efecto negativo sobre las propiedades del suelo tales como la reducción de la capacidad de campo del suelo (Duncan, 1995; Mark & Dickinson, 2008) y reducción en la infiltración (Fahey & Jackson 1997) y la mineralización de la materia orgánica del suelo (Jandl, 2007).

Los resultados mostraron que las zanjas disminuyen la capacidad de agregación y estabilidad del suelo. Los rasgos observados, la destrucción paulatina del talud de la zanja y el movimiento de los sedimentos de los bordos obedecen a procesos de erosión encontrados en ambos sitios.

La construcción de zanjas promueve por tanto la erosión del suelo, la cual se ubica en dos fases en tiempos distintos: en principio con la excavación de las zanjas que destruye a los agregados y remueve las partículas; mientras que la segunda ocurre durante el periodo en que las partículas se movilizan sobre el bordo. Aunque ya transcurrieron once y ocho años de construcción de las zanjas en el bosque y los pastizales respectivamente, las evidencias indican que aún sigue habiendo movimiento en los bordos -de hasta tres centímetros en cinco meses- y por tanto no pueden considerarse como estabilizados, contrariamente a lo que anuncia CONAFOR (2007) que la aforestación y compactación del bordo estabilizarán los sedimentos.

Por otra parte tal erosión y transporte de partículas, provoca el azolve paulatino de las zanjas contiguas, cubriendo las zanjas que en un inicio se excavaron, reduciendo el supuesto tiempo de utilidad que enuncia CONAFOR (2007), el cual no ha sido especificado.

Debido a que estos suelos se localizan dentro de un Parque Nacional, la importancia de conservarlos es aún mayor ya que constituyen el soporte de ecosistemas terrestres que han sido considerados para preservarse.

Es necesario señalar que los efectos producidos por la construcción de zanjas son contrarios a los objetivos que CONAFOR (2007) anuncia, como el que estas obras

“sirven para reducir la erosión hídrica y retener azolves”. Esto conlleva a reflexionar sobre la necesidad de una caracterización y diagnóstico detallados a cerca del grado y las causas de erosión antes de intervenir con cualquier práctica de conservación de suelos, agregando el hecho de que las condiciones ambientales son muy diferentes a las que CONAFOR (2007) recomienda. Esta diferencia enfatiza que tan arriesgado resulta implantar una técnica, cuando se carece de una base metodológica, una evaluación y monitoreo y por supuesto la evidencia científica de que haya un problema de degradación de suelos en esta zona.

Así mismo existe el cuestionamiento de qué tan vinculados podrían ser los resultados con la definición de conservación de suelos como “el conjunto de obras y prácticas para el *control de los procesos de degradación* y el mantenimiento de la productividad potencial del suelo” (CONAFOR, 2012b).

## 10. Conclusiones

En este trabajo se evaluó el impacto de las zanjas trinchera sobre la calidad y conservación de los suelos por medio del uso de indicadores del suelo y de técnicas de determinación de la erosión en el suelo removido por las zanjas trinchera.

El conjunto de indicadores demostró que los suelos no perturbados en ambos tipos de vegetación, poseen las propiedades adecuadas para cumplir con diversas funciones como suelos forestales con vegetación natural y por tanto no existe una problemática que dé razón para implementar estas prácticas de conservación en estas zonas del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatépetl.

El número de zanjas por hectárea en ambos sitios, rebasó los lineamientos establecidos, lo que evidencia la falta de metodología de quienes implantaron estas técnicas en las zonas.

Los indicadores como la densidad aparente, la porosidad y estabilidad de agregados revelaron una disminución de las propiedades de los suelos con zanjas, particularmente el efecto en el almacenamiento de carbono.

Se demostró la presencia de erosión del suelo removido de las zanjas a pesar del tiempo transcurrido desde su construcción, lo que indica que no se está estabilizando. La remoción y la erosión del suelo podrían representar un impacto negativo hacia la propia conservación de los suelos y de los ecosistemas.

Resulta tan fundamental observar que toda intervención hacia los ecosistemas debe poseer un estudio científico, la caracterización y diagnóstico de la zona y la vinculación de organismos gubernamentales, científicos y si existe intervención de organismos privados, se debe pensar en primera instancia en la conservación por y para los ecosistemas.

## 11. Referencias

- Aceves García, R. 1967. Introducción al estudio de suelos derivados de cenizas volcánicas y del ando del Popocatepetl (tesis de licenciatura). Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México, D.F.
- Anaya, M. 1999. Cronología de la desertificación en México y lineamientos para su prevención y control. En: Siebe, Ch. et al. Conservación y restauración de suelos. Programa Universitario del Medio Ambiente. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Arias-González, M. 2012. El Conocimiento Ambiental del Visitante de las Áreas Naturales Protegidas. Estudio de Caso Parque Nacional “Cumbres del Ajusco” (tesis de maestría). Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Instituto Politécnico Nacional.
- Ayala-Campos, M. 2011. Interacción ecológica del sistema agua-suelo en ambientes ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. México, D.F.
- Bautista-Cruz, A., J. Etchevers-Barra, R.F. del Castillo y C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13(2): 90-97. Asociación Española de Ecología Terrestre.
- Bautista F., S. Cram e I. Sommer en Bautista, F., J.L. Palacio y H. González (Eds.) 2011. Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental del Instituto de Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, 2da Edición. 790 pp.
- Bell, D. Hoth, J., A. Velázquez, F. Romero, L. León y M. Aranda. 1985. A survey of the distribution of the Volcano rabbit *Romerolagus diazi*: an endangered Mexican endemic. *Dodo*. J. Jersey Widl. Preserv. Trust. 22: 42-48.
- Bell, M. y R. Fischer. 1993. Guide to soil Measurements for Agronomic and Physiological Research in Small Grain Cereals. *Wheat Special Report* No. 18. México, D.F.: CIMMYT.
- Bezaury C., J. 2009. El Valor de los Bienes y Servicios que las Áreas Naturales Protegidas Proveen a los Mexicanos. The Nature Conservancy. Programa México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México.
- Bezaury C., J. y D. Gutiérrez-Carbonell. 2009. Áreas Naturales Protegidas y Desarrollo Social en México, en *Capital Natural de México*, vol. II: *Estado de Conservación y Tendencias de Cambio*. CONABIO, México, pp. 385-431.



Blanco, H. y Lal, R. 2008. Principles of Soil Conservation and Management. Ed. Springer Science, KS, USA.

Bronick, C. y R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124:3-22.

Brouwer, C., K. Prins, M. Kay y H. Heibloem. 1988. Irrigation Water Management. Irrigation Methods. Training Manual No. 5. FAO. Tomado de: <http://www.fao.org/docrep/s8684E/s8684e0a.htm> Consultado el 20 de mayo del 2016.

Burger, J. A. y D. Kelting. 1999. Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management* 122: 155-166.

Burnell, R. y Clawson, M. (2011). Soil Conservation in Perspective. *RFF Earthscan Press*. Resources for the future Library Collection. NY, USA.

Carter, M. 2002. Soil Quality for Sustainable Land Management: Organic Matter and Aggregation Interactions that Maintain Soil Functions. *Agronomy Journal*. Vol. 49. Pp. 38-47.

Castro-Alonso, A. 2009. Conductividad hidráulica en bosques y pradera de alta montaña de Amecameca, Estado de México (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México, D.F.

Castro-Luna, M. 2013. Registro de la riqueza herbácea y arbustiva en el bosque de *Abies religiosa* de la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Izta-Popo y el Parque Nacional Zoquiapan (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. México, D. F.

Chapela y Mendoza. 1999. Causas estructurales de la degradación de las tierras en México. En: Siebe, Ch. et al. Conservación y restauración de suelos. Programa Universitario del Medio Ambiente. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Chávez Cortés, J. y N. Trigo Boix. 1996. Programa de Manejo para el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Colección Ecología y Planeación. México.

CONAFOR. 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Tomado de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1310Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf> Consultado el 20 de abril del 2015.

CONAFOR. 2012a. Programa de restauración forestal en cuencas hidrográficas prioritarias. Gerencia de Suelos. México. Tomado de:

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/4790Programa%20de%20restauraci%C3%B3n%20de%20cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas%20prioritarias.pdf> Consultado el 21 de abril del 2015.

CONAFOR. 2012b. Criterios técnicos para la ejecución de los proyectos de conservación y restauración de suelos 2012. Gerencia de Suelos. México. Tomado de: <http://www.conafor.gob.mx/apoyos/docs/adjuntos/8aff80b7762272f5a0e0da39ba49b31.pdf> Consultado el 20 de abril del 2015.

CONAFOR. 2012c. Inventario Nacional Forestal y de Suelos México 2004-2009. SEMARNAT. CONAFOR-SEMARNAT. México. Tomado de: <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Inventario-Nacional-Forestal-y-de-Suelos.pdf> Consultado el 12 de febrero del 2016.

CONANP. 2013. Programa de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. CONANP-SEMARNAT. México, D.F. Tomado de: [http://iztapopo.conanp.gob.mx/documentos/programa\\_de\\_manejo\\_izta\\_popo.pdf](http://iztapopo.conanp.gob.mx/documentos/programa_de_manejo_izta_popo.pdf) Consultado el 10 de marzo del 2015.

Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible. 2008. Estudio de las condiciones territoriales y su percepción del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas. CCMSS A.C. México, D.F.

Cota, E., L. Marín y M. Balcazar. 2011. Recarga de acuíferos mediante la construcción de tinajas ciegas. PRONATURA, México. Tomado de: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/2011\\_cnch2\\_mon\\_ecota1.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/2011_cnch2_mon_ecota1.pdf) Consultado el 12 de enero del 2015.

Cotler, H., E. Sotelo, J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina. y L. Quiñones. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica* INE-SEMARNAT. No. 83. México.

Cotler A., H. 2010. Evolución y perspectivas de la conservación del suelo. En: Lezama, J. y Graizbord, B. Los Grandes problemas de México: Vol. IV "Medio Ambiente". El Colegio de México, A.C. México, D.F.

Cotler, H., S. Cram, S. Martínez-Trinidad y E. Quintanar. 2013. Forest soil conservation in central Mexico: An interdisciplinary assessment. *Catena* 104: 280-287.

Cotler, H., S. Cram, S. Martínez-Trinidad y V. Bunge. 2015. Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. Investigaciones Geográficas. *Boletín del Instituto de Geografía*. UNAM. México, D. F.

Cotler H. y Ortega, P. 2006. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, Mexico. *Catena* 65:107-117.

Cruz F., G. y J. Etchevers B. 2011. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia* 45 (8): 849-862.

Davie, T., B. Fahey y M. Stewart. 2006. Tussock grasslands and high water yield: a review of the evidence. *Journal of Hydrology (New Zealand)* 45: 83-94.

De la Rosa, D. y R. Sobral. 2005. Soil Quality and Methods for its Assessments. Tomado de: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/71622/1/Soil%20quality%20and%20methods%20for%20it%20assessment.pdf> Consultado el 18 de noviembre del 2015.

Delgado, J., M. Nearing y Ch. Rice. 2013. Conservation Practices for Climatic Change Adaptation. En: Sparks, D. *Advances in Agronomy* Vol. 121: 47-115.

Delgado R., Gian Carlo. 2014. Apropiación de agua, medio ambiente y obesidad. Los impactos del negocio de bebidas embotelladas en México. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. Universidad Nacional Autónoma de México. *Colección Alternativas*. México.

Diario Oficial de la Federación (1935, 8 de noviembre). Decreto que declara Parque Nacional, las montañas denominadas Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tomado de: <http://www.dof.gob.mx/index.php?year=1935&month=11&day=08> Consultado el 5 de agosto del 2015.

Diario Oficial de la Federación de México (1937, 13 de marzo). DECRETO que declara Parque Nacional, los terrenos de la hacienda Zoquiapan y Anexas. Tomado de: <http://www.dof.gob.mx/index.php?year=1937&month=3&day=13> Consultado el 5 de agosto del 2015.

Diario Oficial de la Federación de México (1948, 11 de febrero). Decreto que establece a favor de la fábrica de papel de San Rafael y Anexas, S. A., una Unidad de Explotación Forestal en varios municipios del Estado de México, Puebla y Morelos. Tomado de: <http://dof.gob.mx/index.php?year=1948&month=02&day=11> Consultado el 5 de agosto del 2015.

Diario Oficial de la Federación de México (2013, 2 de abril). Acuerdo por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. Tomado de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5294188](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5294188) Consultado el 8 de enero del 2016.

Diario Oficial de la Federación de México (2015, 31 de diciembre). Reglas de Operación del Programa Nacional Forestal 2016. Tomado de: <http://www.dof.gob.mx/index.php?year=2015&month=12&day=31> Consultado el 16 de abril, 2016.

Doran J. y M. Zeiss, 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15: 3-11.

Doran, J. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88: 119-127.

Douglas H. 1990. The Soil Conservation Service in the Great Plains. *Agricultural History* 64: 58-72. Tomado de: Natural Resources Conservation Service. [http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/about/history/?cid=nrcs143\\_021395](http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/about/history/?cid=nrcs143_021395) Consultado el 18 de abril del 2016.

Dumanski J. y Peiretti R. 2013. Modern concepts of soil conservation. *International Soil and Water Conservation Research* 1(1): 19-23.

Duncan, M. 1995. Hydrological impacts of converting pasture and gorse to pine plantation and forest harvesting, Nelson, New Zealand. *Journal of Hydrology* (NZ) 34(1): 15-41.

Etchevers, J. 1999. Indicadores de la calidad del suelo. En: Siebe et al. Conservación y restauración de suelos. Programa Universitario del Medio Ambiente. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Fa J. y D. Bell. The Volcano Rabbit *Romerolagus diazi* en Rabbits, Hares and Pikas. Status Survey and Conservation Action Plan. Chapman J. y J. Flux Ed. 1990. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. U.K.

Fahey, B. y Jackson, R. 1997. Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. *Agriculture and Forest Meteorology* 84:69-82.

FAO, 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. *Boletín de Tierras y Aguas de la FAO* No. 8. FAO-IITA. Roma.

FAO. 2003. Training Series: Simple methods for aquaculture. Soil. Tomado de: [ftp://ftp.fao.org/fi/cdrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706e/Index.htm](ftp://ftp.fao.org/fi/cdrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706e/Index.htm) Consultado el 24 de agosto del 2016.

Faustino, J. 1985. Conservación de suelos. Proyecto Regional de Manejo de Cuencas. IICA-CATIE.

Gaceta del Gobierno, 2007. Programa de Ordenamiento Ecológico y por Riesgo Eruptivo del Territorio del volcán Popocatepetl y su zona de influencia. No. 27. Secretaría del Medio Ambiente.

Geissen, V. 2013. Effects of topsoil removal as a nature management technique on soil functions. *Catena* 101: 50-55.

Gerrard, J. 2000. Fundamentals of soil. *Routledge Fundamentals of Physical Geography*. Grupo Taylor y Francis. Nueva York.

Grigal, D. y E. Vance. 2000. Influence of soil organic matter on forest productivity. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30 (1/2): 169-205.

Hagmann, J. 1996. Mechanical Soil Conservation with Contour Ridges: Cure for, or Cause of, Rill Erosion? *Land Degradation & Development*. Wiley.

Hernández, M. 2007. Determinación de la densidad real de suelos. Versión 1. Procedimiento Estandarizado. Unidad de Análisis Ambiental. Facultad de Ciencias. UNAM.

Hernández-García, M. y D. Granados-Sánchez. 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro. *Ciencias Forestales y del Ambiente*. Revista Chapingo. Vol. 12 (2): 101-109. Universidad Autónoma de Chapingo, México.

Hoth, J., A. Velázquez, F. Romero, L. León, M. Aranda y D. Bell. 1987. The volcano rabbit-a shrinking distribution and threatened hábitat. *Oryx*. IUCN 21(2): 85-91. Tomado de: [https://www.researchgate.net/publication/232022237\\_The\\_volcano\\_rabbit\\_-\\_A\\_shrinking\\_distribution\\_and\\_a\\_threatened\\_habitat](https://www.researchgate.net/publication/232022237_The_volcano_rabbit_-_A_shrinking_distribution_and_a_threatened_habitat) Consultado el 12 de septiembre del 2016.

Hudson, N.1987. Soil and Water Conservation in semi-arid areas. *Soil Resources and Conservation Service*. Land and Water Development Division. FAO. Tomado de: <http://www.fao.org/docrep/t0321e/t0321e00.HTM> Consultado el 17 de abril del 2016.

- Hudson, N. W. 1993. Estudio sobre las razones del éxito o fracaso de los proyectos de conservación de suelos. *Boletín de suelos de la FAO* 64. Roma. Tomado de: <http://www.fao.org/docrep/T0487E/T0487E00.htm> Consultado el 10 de marzo del 2016.
- Hudson, B. 1994. Soil Organic Matter and Available Water Capacity. *Journal of Soil and Water Conservation* 49 (2): 189-194. Tomado de: [https://www.researchgate.net/publication/279555992\\_Soil\\_organic\\_matter\\_and\\_available\\_water\\_capacity\\_J\\_Soil\\_Water\\_Conserv](https://www.researchgate.net/publication/279555992_Soil_organic_matter_and_available_water_capacity_J_Soil_Water_Conserv) Consultado el 13 de abril del 2016.
- INECOL, 2010. Red de Comités MaB y Reservas de Biosfera de Iberoamérica y El Caribe. INECOL-MaB. Tomado de: <http://proyectos.inecol.edu.mx/iberomab/index.php> Consultado el 11 de septiembre del 2016.
- Jandl, R., M. Lindner, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Baritz, F. Hagedorn, D. Johnson, K. Minkinen y K. Byrne. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137: 253-268.
- Jenny, H. 1994. Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology. DOVER Publications INC. Tomado de: Soil and Health Library <http://soilandhealth.org/wp-content/uploads/01aglibrary/010159.Jenny.pdf>. Consultado el 08 de agosto del 2016.
- Karlen, D. L., M. Mausbach, J. Doran, R. Cline, R. Harris y G. Schuman. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.
- Karlen, D., S. Andrews, B. Wienhold y T. Zobeck. 2008. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. *Journal of Integrative Biosciences* 6 (1):3-14. USDA-Agricultural Research Service. Universidad de Nebraska.
- Kinyangi, J. 2007. Soil health and soil quality: a review. Tomado de: World Ag Info Project. <http://www.worldaginfo.org/files/Soil%20Health%20Review.pdf> Recuperado el 14 de septiembre del 2015.
- Lal, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*. No. 29: 437-450.
- León D. y M. Hernández. 2005a. Determinación de Densidad Aparente. Versión 1. Procedimiento Estandarizado. Unidad de Análisis Ambiental. Facultad de Ciencias. UNAM.

León D. y M. Hernández. 2005b. Determinación de textura por el método de Bouyoucos. Versión 1. Procedimiento Estandarizado. Unidad de Análisis Ambiental. Facultad de Ciencias. UNAM.

Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Art. 44. Agenda Ecológica Federal 2014. Ediciones México D.F.

López H. y Durán A. 2009. La fábrica de agua: el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. En: Bezaury C., J. y D. Gutiérrez-Carbonell. 2009. Áreas Naturales Protegidas y Desarrollo Social en México, en *Capital Natural de México*, vol. II: *Estado de Conservación y Tendencias de Cambio*. CONABIO, México, pp. 385-431.

López-López, A. 2014. Influencia del relieve sobre las propiedades del suelo en una catena en laderas de montaña del Parque Nacional Izta-Popo (tesis de maestría) Instituto de Geología, UNAM. México. D.F.

Loredo, C. 2005. Prácticas para la conservación del suelo y agua en zonas áridas y semiáridas. Libro Técnico No. 1. INIFAP-SAGARPA. México, D.F.

Mark, A. y Dickinson, K. 2008. Maximizing water yield with indigenous non-forest vegetation: a New Zealand perspective. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6(1): 25-34.

Martínez Rosales, M. 2003. Evaluación del uso de suelo, vegetación y fragilidad en la región Izta-Popo mediante percepción remota (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México, D.F.

Miguel-Jiménez, J. 2013. Cobertura vegetal, materia orgánica y pH en el suelo y su relación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (tesis de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. México, D.F.

Millar, C. 1971. Fundamentos de las ciencias del suelo. Compañía Editorial Continental. Barcelona.

Morgan, R. 1981. Soil Conservation. Problems and Prospects. Ed. John Wiley & Sons. Gran Bretaña.

Nimmo, J. 2005. Unsaturated Zone Flow Processes. En Anderson M. y J. Bear. Eds. Encyclopedia of Hydrological Sciences. Part 13. Tomado de: [http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/abs\\_pubs/papers/nimmo.05.uzflowproc.ehs.hsa161.pdf](http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/abs_pubs/papers/nimmo.05.uzflowproc.ehs.hsa161.pdf)

Consultado el 14 de mayo del 2016.

- Oldeman, L. R. 1994. Global Extent of Soil Degradation. Bi-Annual Report 1991-1992, pp. 19-36. ISRIC, Wageningen, Holanda.
- Oldeman, L. R. 2000. Impact of Soil Degradation: A global Scenario. Working Paper 2000/1. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, Holanda.
- Pearce, A., L. Rowe y C.L. O'Loughlin 1984. Hydrology of midaltitude tussock grasslands, upper Waipori catchments: II Water balance, flow duration and storm runoff. *Journal Hydrology* (New Zealand) 23: 60-72.
- Peña-Ramírez, V. 2013. Dinámica de la calidad de sitio a través de una cronosecuencia volcánica y sus implicaciones para la productividad forestal (tesis de doctorado). Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM. México, D.F.
- Pérez-Bolaños, S. 2015. Determinación de agregados estables en agua por el método de Yoder aislados mecánicamente. Versión 1. Procedimiento Estandarizado de Operación. Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM.
- Pimentel, D., C. Harvey, P. Resosudarmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Shpritz, L. Fitton, R. Saffouri y R. Blair. 1995. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science*. Vol. 267 (5201): 1117-1123.
- Pizarro, R., J. Flores, C. Sanguesa y E. Martínez. 2004. Monografías Zanjias de infiltración. Universidad de Talca, Talca, Chile. Tomado de: <http://eias.otalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/libros/Zanjias.pdf> Consultado el 13 de febrero del 2015.
- Porta, J. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona.
- Porta, J. 2008. Introducción a la edafología, uso y protección del suelo. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona.
- Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2014-2018. Tomado de: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <http://entorno.conanp.gob.mx/documentos/PNANP.pdf> Consultado el 2 de febrero del 2016.
- Ramírez Gutiérrez, A. 2008. Densidad de la fauna edáfica como indicador de calidad del suelo en bosques templados y zonas adyacentes en México (tesis de licenciatura). FES Zaragoza, UNAM. México.



Ramírez-Santiago, A. 2016. Impacto ambiental de zanjas de infiltración en el Parque Nacional Izta-Popo (estado de México) (tesis de licenciatura). Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, UNAM. México.

Reeves, D. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil & Tillage Research* 43: 131-167.

Rubio-Granados, E., M. Martínez-Menes y B. Sánchez-Bernal. 2009. Tinas Ciegas. Colegio de Postgraduados-SAGARPA. México. Tomado de: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/17%20TINAS%20CIEGAS.pdf> Consultado el 10 de julio del 2015.

Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1º Edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 504 pp. Tomado de: [http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx\\_Cont.pdf](http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf) Consultado el 12 de septiembre del 2016.

SEMARNAT-COLPOS. 2003. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México. Tomado de: [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen14/03\\_suelos/3\\_2.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/03_suelos/3_2.html) Consultado el 3 de mayo del 2016.

Shaxson, F. y Barber, R. 2003. Optimizing Soil Moisture for Plant Production. The significance of Soil Porosity. *FAO Soil Bulletin* 79. Tomado de: <http://www.fao.org/publications/card/es/c/01ada38c-c191-5808-a390-e3238500e617/> Consultado el 12 de mayo del 2015.

Schlesinger, W. 1984. Soil Organic Matter: a Source of Atmospheric CO<sub>2</sub>. The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle. SCOPE. John Wiley & Sons.

Schoenholtz, S., H. Van Miegroet y J. A. Burger. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138: 335-356.

Siebe, Ch., H. Rodarte, G. Toledo, J. Etchevers y C. Oleschko. 1999. Conservación y restauración de suelos. Programa Universitario del Medio Ambiente. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Siebe, Ch., R. Jahn y K. Stahr. 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.

Servicio Meteorológico Nacional. Estaciones Meteorológicas Automáticas: *Izta-Popo* y *Altzomoni*. Datos del 1 de octubre del 2014 al 31 de octubre del 2015.

Smith, S., W. Renwick, R. Buddemeier y C. Crossland. 2001. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. *Global Biogeochemical cycles*. Vol. 15 (3): 697-707.

USDA. 1998. Soil Quality Indicators: pH. Soil Quality Information Sheet. Natural Resources Conservation Services. Tomado de: [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_052208.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052208.pdf) Consultado el 10 de marzo del 2015.

USDA, 2008. Soil Quality Physical Indicators: Selecting Dynamic Soil Properties to Assess Soil Function. *Soil Quality Technical Note* No. 10. Natural Resource Conservation Service.

Valderrábano Gómez, J. 2013. Calidad del suelo forestal y su distribución espacial en bosques de coníferas del Parque Nacional IztaPopo (tesis de maestría). Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM. México, D.F.

Vallejo Gómez, E. 1968. Algunos estudios de perfiles de suelos de ando de la parte noreste del Popocatepetl, Estado de México (tesis de licenciatura). México, D.F.

Van Kooten, C. (1993). Land Resources economics and sustainable development. *UBC Press*. The University of British Columbia. Vancouver, Canada.

Vázquez Ramos, M. 1998. La utilización de las Áreas Naturales Protegidas en México como una alternativa de desarrollo (Estudio de caso: Parque Nacional Zoquiapan y Anexas) (tesis de licenciatura). ENEP Aragón. UNAM. México.

Vela-Correa, G., J. López-Blanco y M. Rodríguez Gamiño. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas*. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. No. 17, pp. 18-30.

Villalobos A., V. 1999. Degradación de suelos forestales: estrategias hacia su conservación y restauración. En: Siebe, Ch. et al. Conservación y restauración de suelos. Programa Universitario del Medio Ambiente. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Woodwell, G. M. 2000. The Carbon Dioxide Problem. Cap. 1. En: Woodwell, G. M. The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: measurement by remote sensing. SCOPE. John Wiley & Sons.

World Reference Base for Soil Resource. 2014. *World Soil Resources Reports* 106. FAO. Roma.

Young, A. 1989. *Agroforestry for Soil Conservation*. International Council for Research in Agroforestry.

12. ANEXOS

Anexo 1

Levantamiento en campo y evaluación edafocológica de los perfiles en los sitios de bosque de pino y pastizales con y sin zanjas trinchera empleando el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe et al., 1996).

Cuadro 26. Perfil 1 Pastizal subalpino con zanjas

Levantamiento en campo:	Localidad: Altzomoni		19°06'44" N 98°39'06" O																	
	Fecha: 1-03-2015	UTM x: 536638 E	Mapa No.: -	clima: templado húmedo		uso del suelo/vegetación: Forestal/zacatonal Z				posición en el relieve: ladera media		paisaje: Morfología general: intermontano Geoforma local: loma								
	Autor: Eunice Galván	UTM y: 2113302 N	m.s.n.m 3858	época seca	°C:	delta °C					inclinación: 15-20° Clave 4: Escarpado moderado		Erosión: n: C 1		material parental: Origen residual Depósitos volcánicos.					
	estado del tiempo ET3 I	precipitación (mm):	Frecuencia y duración de periodos húmedos							Exposición: Oeste		forma de la ladera: VL								
			F: 3	D: 2	DAC: 3					Unidad de relieve: 5 piedemonte medio (Modelo Dalrymple)										
	Prof (cm)	Textura:	Pedregosidad (Vol %)	Color (húmedo)	pH (CaCl)	Sales C.E. 1:2.5 (mS/cm)	m.o. Gew.-%	CaCO3 (%)	humedad	pF	estructura (tipo, tamaño, grado, rompe a)				Estab agreg	Poros	d.a. g/cm3	dens. Raíces	límite	horizonte
	0-18	CA	1 Cantos finos	5YR 1.7/1	6,2	29,5	6,3	0	fresca	3	subangular	fino	débil	granular	alta	muchos finos y med. Intersticiales	0,86 baja	extremadamente alta	claro uniforme	Ah
	18-40	CRA-C	3 Cantos f y medios	5YR 1.7/1	6,1	28	3,9	0	fresca	3	subangular	mediano y fino	moderado	y subang fino	med	muy finos intersticiales	0,91 baja	muy alta	difuso ondulado	AB
	40-56	CLf	3 Cantos finos	5YR 1.7/1	6,5	18	8,5	0	fresca	3	subangular	mediano	moderado	subang. Fino	muy alta	Muchos finos y muy finos	0,74 baja	muy alta	claro uniforme	2AB1
	56-89	C	7 Cantos medianos	10YR 1.7/1	6,6	19,5	2,5	0	fresca	3	subangular	mediano y fino	débil	subang. Fino	alta	muchos finos int. Y pocos finos	0,97 baja	alta	claro irregular	2AB2
89->115	C	1 Cantos finos	7.5YR 2/2	6,6	25,5	5,8	0	fresca	2.5	subangular	fino	débil	subang. Fino	baja	muchos finos intersticiales	0,65 baja	mediana	difuso uniforme	3Ah	
prof. De desarrollo cm: 120					Principal espacio radicular: 0 a 56 cm					Bodentyp (WRB):										
max. Prof. Raíces: 89 profundo					nivel piezométric actual: No determinado					Nivel piezométrico medio: No determinado					tipo de humus:Mull					

**Cuadro 27.** Evaluación edafoecológica del perfil 1

Evaluación edafo-ecológica	espesor	penetrabilidad	Volumen total de poros		CA		dCC		CC		conductividad hidráulica		
	dm	raíces	Vol-%	evaluación	Vol-%	evaluación	Vol (%)	L/m2	Vol %	l/m2	cm/d	evaluación	
	1,8	muy buena	56,5	alto	13,5	alta	27,5	15,13	43	23,65	40-100	alta	
	2,2	buena	53,5	alto	5	baja	16	7,05	48,5	21,38	100-300	muy alta	
	1,6	buena	67,5	muy alto	14,5	alta	31,5	19,10	53	32,13	40-100	alta	
	3,3	mediana	52,5	alto	9	mediana	21	5,92	43,5	12,26	100-300	muy alta	
	2,6	mediana	58	alto	10	mediana	23	8,76	48	18,28	100-300	muy alta	
	profundidad fisiológica (cm): >115 profundo							suma dCC:	56	suma (CC):	108	drenaje natural: bueno	
	espacio radicular efectivo (dm): 10							evaluación	baja	evaluación	muy baja	erosionabilidad (Ah): 0,32	

Nota: CA: Capacidad de aireación. dCC: retención de agua disponible para las plantas. CC: Capacidad de campo. Coma decimal.

**Cuadro 28.** Evaluación edafocológica Perfil 1 (continuación)

Espesos (dm)	CIC		BI		Humus	Nt	Ndis	Pmo	Al activo
	cmolc/kg	Evaluación	cmolc/kg	molc/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	
1,8	43	alta	0,75	0,11	9,65	0,483	2,41	96,55	Si
2,2	85	muy alta	0,8	0,16	7,57	0,379	1,89	75,74	Si
1,6	80	muy alta	0,75	0,09	9,76	0,488	2,44	97,62	Si
3,3	54	alta	0,8	0,24	7,44	0,372	1,86	74,42	Si
2,6	60	alta	0,75	0,13	9,70	0,485	2,43	97,04	Si
			Suma BI:	0,72	44	Suma N t:	2,21	Suma Pmo:	
		evaluación: media	Evaluación	muy baja		Evaluación	muy alta	441,37	
						Suma Ndisp	11,03	Evaluación	
						Evaluación	media alta	muy alta	

Nota: CIC: capacidad de intercambio catiónico. BI: bases intercambiables. Nt: Nitrógeno total. Nd: Nitrógeno disponible. Al: Aluminio. Coma decimal.

**Cuadro 29. Perfil 2. Bosque de pino con zanjas**

<b>Levantamiento en campo:</b>	Localidad:	Las Quintas		19°6' 4" N 98°39' 55" O																
	Fecha: 2-03-2015	UTM x:	Mapa No.: -		clima: templado húmedo		uso del suelo/vegetación: Forestal/Bosque de Pinus BPE				posición en el relieve: ladera media			paisaje: Morfología general: intermontano Geoforma local: loma						
	Autor: Eunice Galván	UTM y:	m.s.n.m 3793	época seca		°C:	delta °C						inclinación: S Clave 2 264° O		complejidad		material parental:			
	estado del tiempo ET3 I	precipitación (mm):	Frecuencia y duración de periodos húmedos								Exposición: BS (modelo Ruhe)		forma de la ladera: VL							
			F: 2	D: 2	DAC: 3						Erosion: Clase 1									
	Prof (cm)	Textura:	Pedregosidad (Vol %)	Color (húmedo)	pH (CaCl)	Sales C.E. 1:2.5 (mS/cm)	m.o. Gew.-%	CaCO3 (%)	humedad	pF	estructura tipo	tamaño	grado	rompe a	Estab agreg	Poros	d.a. g/cm3	dens. Raíces	límite	horizonte
	0-20	L	0	7.5YR 3/1	5,7	36,5	9,1	0	seca	4	migajón	fino	débil	subangular	alta	muchos finos int. Y	0,66 baja	extremadamente alta	abrupto ondulado	Ah
	20-52	CL	0	7.5YR 2/1 black	6,2	26,5	3,7	0	fresca	3,5	bloques subangulares	mediano	débil	subangular	moderada	comunes finos int.	0,86 baja	alta	claro uniforme	2Ah
	52-70	CL	1 GP	7.5YR 2/1 black	6,4	20	4,3	0	fresca	3	bloques subangulares	mediano	débil	subangular	moderada	pocos microscópicos	0,86 baja	mediana	claro uniforme	3Ah
	70->105	CL	2 Gm	7.5YR 2/2	6,4	28	4,9	0	fresca	2,5	bloques subangulares	mediano	débil	subangular	baja	pocos microscópicos	0,67 baja	muy baja	claro ondulado	4Ah
prof. De desarrollo cm: >105				Principal espacio radicular: 0 a 70 cm				Bodentyp (WRB):												
max. Prof. Raíces: 105 profundo				nivel piezométrico actual: No determinado				Nivel piezométrico medio: No determinado				tipo de humus:Mull								

**Cuadro 30.** Evaluación edafocológica del perfil 2

Evaluación edafo-ecológica	espesor	penetrabilidad	Volumen total de poros		CA		dCC		CC		conductividad hidráulica		
	dm	raíces	Vol-%	evaluación	Vol-%	evaluación	Vol (%)	L/m <sup>2</sup>	Vol %	l/m <sup>2</sup>	cm/d	evaluación	
	2	muy buena	66,5	muy alto	13,5	alta	32,5	65	53	106	400-100	alta	
	3,2	muy buena	54,5	muy alto	10	mediana	28	89,6	44,5	142,4	400-100	alta	
	2,2	buena	60	muy alto	11	mediana	30	65,34	49	106,72	400-100	alta	
	3,5	buena	60	muy alto	11	mediana	30	102,90	49	168,07	400-100	alta	
	profundidad fisiológica (cm): >105 profundo							suma dCC:	322,84	suma (CC):	523	drenaje natural: bueno	
	espacio radicular efectivo (dm): 10							evaluación	muy alta	evaluación	muy alta	erosionabilidad (Ah): 0,16	

Nota: CA: Capacidad de aireación. dCC: retención de agua disponible para las plantas. CC: Capacidad de campo. Coma decimal.



**Cuadro 31.** Evaluación edafocológica del perfil 2 (continuación)

CIC		BI			Humus	Nt	Ndis	Pmo	Al activo
cmolc/kg	Evaluación	cmolc/kg	molc/m <sup>2</sup>	Ahx1 otros x 0.5	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	
45	alta	0,7	0,09		12,01	0,60	3,00	120,12	Si
80	alta	0,85	0,23		10,18	0,51	2,55	101,82	Si
80	alta	0,85	0,16		8,05	0,40	2,01	80,54	Si
80	alta	0,85	0,20		11,26	0,56	2,82	112,61	Si
		Suma BI:	0,68	Suma Humus:	42	SumaN t:	2,08	Suma Pmo:	
evaluación: baja		Evaluación: muy baja		kg/m <sup>2</sup>		Evaluación	muy alta	415,09	
						Suma Ndis:	10,38	Evaluación	
						Evaluación:	Media alta	Muy alta	

Nota: Nota: CIC: capacidad de intercambio catiónico. BI: bases intercambiables. Nt: Nitrógeno total. Nd: Nitrógeno disponible. Al: Aluminio. Coma decimal.

**Cuadro 32. Perfil 3. Pastizal subalpino sin zanjas**

<b>Levantamiento en campo:</b>	Localidad:	Altzomoni	19°6' 50" N 98°39' 1" O																				
	Fecha: 11-04-2015	UTM x: 536783 E	Mapa No.:	clima: templado húmedo	uso del suelo/vegetación: Forestal/Pastos macollados Z	posición en el relieve: ladera media				paisaje: Morfología general: intermontano Geoforma local: loma													
	Autor: Eunice Galván	UTM y: 2113466 N	m.s.n.m 3873	época seca	°C:	delta °C	inclinación: 5 pedemonte medio				270° O	complejidad	material parental: volcánico										
	estado del tiempo ET4 neblina	precipitación (mm): (nublado)	Frecuencia y duración de periodos húmedos			Exposición: BS (modelo Ruhe)					forma de la ladera: VL		Erosión: Clase 1 Pedregosidad, suelo desnudo, erosión laminar										
			F: 3	D: 3	DAC: 4																		
	Prof (cm)	Textura:	Pedregosidad (Vol %)	Color (húmedo)	pH (CaCl)	Sales C.E. 1:2.5 (mS/cm)	m.o. Gew.-%	CaCO3 (%)	humedad	pF	estructura tipo	tamaño	grado	rompe a	Estab agreg	Poros	d.a. g/cm3	dens. Raíces	límite	horizonte			
	0-13	CA	0	5YR 2/1 black	6,23	42,5	5,64	0	seca	4	granular	mediano	débil	subangul ar med.	alta	pocos inped muy finos int.	0,94 baja	mediana	difuso irregular	Ah			
	13-28	CRA	0	7,5YR 2/1 black	6,90	32,5	4,29	0	seca	4	subangul ar	mediano	débil	subangul ar fino	moderada	exped finos vesiculares y	0,99 baja	muy alta	abrupto uniforme	A			
	28-37	CA	1 piedras y cantos	7,5YR 2/1 black	6,91	31	4,96	0	seca	4	subangul ar	mediano	moderado	subangul ar fino	baja	pocos inped muy finos	0,69 baja	mediana	abrupto uniforme	2Ah			
	37-52	CRA	4 cantos medianos	7,5YR 2/1 black	6,95	25	4,47	0	fresca	3,0	subangul ar	grueso	moderado	subangul ar fino	moderada	muy pocos in y exped finos	0,62 baja	baja	claro ondulado	AB			
52->95	CRA	1 cantos medianos	7,5YR 2/1 black	6,93	20	6,78	0	fresca	3	angular y subangul ar	grueso	moderado	subangul ar fino	moderada	comunes in y exped muy	0,61 baja	muy baja		3Ah				
prof. De desarrollo cm: 95				Principal espacio radicular: 0 a 52 cm				Bodentyp (WRB):															
max. Prof. Raíces: 95				nivel piezométric actual: No determinado				Nivel piezométrico medio: No determinado												tipo de humus: Mull			

**Cuadro 33.** Evaluación edafocológica del perfil 3

Evaluación edafocológica	espesor	penetrabilidad	Volumen total de poros		CA		dCC		CC		conductividad hidráulica		
	dm	raíces	Vol-%	evaluación	Vol-%	evaluación	Vol (%)	L/m <sup>2</sup>	Vol %	l/m <sup>2</sup>	cm/d	evaluación	
	1,3	muy buena	55	alto	13	alta	27	35,10	42	54,60	40-100	alta	
	1,5	muy buena	59	alto	6	baja	18	27,00	53	79,50	100-300	muy alta	
	0,9	buena	56,5	alto	13,5	alta	27,5	24,50	43	38,31	40-100	alta	
	1,5	mediana	60,5	muy alto	6,5	baja	18,5	26,64	54	77,76	100-300	muy alta	
	4,3	mediana	60,5	muy alto	6,5	baja	18,5	78,75	54	229,88	100-300	muy alta	
	profundidad fisiológica (cm): >95 profundo							suma dCC:	192	suma (CC):	480	drenaje natural: bueno	
	espacio radicular efectivo (dm): 8							evaluación	alta	evaluación	alta	erosionabilidad (Ah): 0,42	
											evaluación:	media	

Nota: CA: Capacidad de aireación. dCC: retención de agua disponible para las plantas. CC: Capacidad de campo. Coma decimal.

**Cuadro 34.** Evaluación edafocológica del perfil 3 (continuación)

CIC		BI		Humus	Nt	Ndis	Pmo	Al activo
cmolc/kg	Evaluación	cmolc/kg	molc/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	
40	alta	0,85	0,10	6,84	0,34	1,71	68,43	Si
103	muy alta	0,85	0,13	6,39	0,32	1,60	63,86	Si
39	mediana	0,85	0,05	3,11	0,16	0,78	31,05	Si
103	muy alta	0,85	0,08	4,19	0,21	1,05	41,85	Si
135	muy alta	0,85	0,22	17,84	0,89	4,46	178,36	Si
		Suma BI:	0,58	SumaHumus (kg/m <sup>2</sup> ):	SumaN t:	1,92	Suma Pmo:	
		Evaluación	muy baja	38	Evaluación	alta	383,55	
					Suma N disp.	9,59	Evaluación	
					Evaluación	Media alta	Muy alta	

Nota: Nota: CIC: capacidad de intercambio catiónico. BI: bases intercambiables. Nt: Nitrógeno total. Nd: Nitrógeno disponible. Al: Aluminio. Coma decimal.

**Cuadro 35. Perfil 4. Bosque de pino sin zanjas**

<b>Levantamiento en campo:</b>	Localidad:	Las Quintas	19°06'04" N 98°39'01" O																	
	Fecha: 10-04-2015	UTM x: 536776 E	Mapa No.:	clima: templado húmedo	uso del suelo/vegetación: Forestal/Bosque de Pinus con pastos amacollados BPE				posición en el relieve: 5 piedemonte medio				paisaje: Morfología general: intermontano Geoforma local: loma							
	Autor: Eunice Galván	UTM y: 2112076 N	m.s.n.m 3798	época seca	°C:	delta °C					inclinación: 40°	5	compl eijidad	material parental: material volcánico						
	estado del tiempo ET3 I	precipitación (mm):	Frecuencia y duración de periodos húmedos							Exposición: 306° NO		forma de la VL ladera:								
			F: 3	D: 2	DAC: 3						Erosion:		Sin rasgos de erosión visible							
	Prof (cm)	Textura:	Pedregosidad (Vol %)	Color (húmedo)	pH (CaCl)	Sales C.E. 1:2.5 (mS/cm)	m.o. Gew. -%	CaCO3 (%)	humedad	pF	estructura tipo	tamaño	grado	rompe a	Estab agreg	Poros	d.a. g/cm3	dens. Raíces	límite	horizonte
	0-2	Capa de musgo más mantillo de pasto																		
	2-10	CRA	0	7.5YR 2/1 black	6,0	44	6,5	0	fresca	3,0	subang	fino a medio	moderado	Subang. Medio	alta	in/exped ves. Finos	0,8 baja	muy baja	abrupto uniforme	Ah
	10-23	CA	0	10YR 2/1 black	6,5	27,5	4,0	0	fresca	3	subang	grueso a medio	moderado	Subang. Medio	alta	comunes in/ex tub/ves finos	1,12 med	mediana	gradual uniforme	A
	23-57	RA	10	10YR 2/1 black	6,6	20	6,1	0	fresca	3,0	subang	grueso a fino	moderado	Subang. Fino	alta	pocos in/ex ves finos	0,66 baja	alta	gradual ondulado	2Ah
57->90	RA	10	10YR 2/2 very dark	6,8	20,5	10,0	0	fresca	3	subang	muy grueso y fino	moderado	Subang. fino	alta	muy pocos in/ex ves muy	0,59 baja	mediana	claro irregular	3Ah	
prof. De desarrollo cm:		>90		Principal espacio radicular: 2 a 57 cm				Bodentyp (WRB):												
max. Prof. Raíces:		90 cm		nivel piezométrico actual: No determinado				Nivel piezométrico medio: No determinado				tipo de humus:Mull								

**Cuadro 36.** Evaluación edafoecológica del perfil 4

Evaluación edafo-ecológica	espesor	penetrabilidad	Volumen total de poros		CA		dCC		CC		conductividad hidráulica	
	dm	raíces	Vol-%	evaluación	Vol-%	evaluación	Vol (%)	L/m <sup>2</sup>	Vol %	l/m <sup>2</sup>	cm/d	evaluación
	0,2											
	0,8	buena	60,5	muy alto	6,5	baja	18,5	14,8	54	43,2	100-300	muy alta
	1,3	buena	48	mediano	11	mediana	23	29,9	37	48,1	10-40	mediana
	3,4	buena	60	alto	7	mediana	19	58,14	53	162,18	40-100	alta
	3,3	buena	69	muy alto	10	baja	23	68,31	59	175,23	40-300	muy alta
	profundidad fisiológica (cm):		>90 profundo		suma dCC:		171	suma (CC):	429	drenaje natural: bueno		
	espacio radicular efectivo (dm):		10		evaluación		alta	evaluación		alta	erosionabilidad (Ah): 0,28	
												evaluación:

Nota: CA: Capacidad de aireación. dCC: retención de agua disponible para las plantas. CC: Capacidad de campo. Coma decimal.

**Cuadro 37.** Evaluación edafocológica del perfil 4 (continuación)

CIC		BI			Humus	Nt	Ndis	Pmo	Al activo
cmolc/kg	Evaluación	cmolc/kg	molc/m <sup>2</sup>	Ahx1	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	
				otros x 0.5					
104	muy alta	0,75	0,05		4,16	0,21	1,04	41,6	Si
40	alta	0,7	0,10		5,82	0,29	1,456	58,24	Si
116	muy alta	0,75	0,15		12,32	0,62	3,08	123,20	Si
136	muy alta	0,75	0,13		17,52	0,88	4,38	175,23	Si
		Suma BI:	0,43	Suma Humus:	40	SumaN t:	1,99	Suma Pmo:	
		Evaluación	muy baja	kg/m <sup>2</sup>			alta	398,27	
						Suma Ndisp	9,96	Evaluación	
						Evaluación	media alta	muy alta	

Nota: Nota: CIC: capacidad de intercambio catiónico. BI: bases intercambiables. Nt: Nitrógeno total. Nd: Nitrógeno disponible. Al: Aluminio. Coma decimal.

## Anexo 2

### Resultados de laboratorio

**Cuadro 38.** Resultados de los indicadores físicos y químicos obtenidos en el laboratorio por muestra

Clave	Muestra			DA (g/cm <sup>3</sup> )	DR (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	Corg. (%)	pH	CE (μS/cm)
191	PZ	Z1	Bordo	0.69	2.54	72.99	4.44	-	-
193		Z2	Bordo	0.86	2.72	68.40	2.83	-	-
195		Z3	Bordo	0.72	2.68	73.03	-	-	-
203	Perfil 1	DA	0-18	0.86	2.49	65.67	3.58	6.23	29.50
204		DA	18-40	0.91	2.49	63.47	2.27	6.09	28.00
205		DA	40-56	0.74	2.52	70.55	4.94	6.52	18.00
206		DA	56-89	0.97	2.62	62.97	1.44	6.55	19.50
207		DA	89->115	0.65	2.62	75.27	3.44	6.62	25.50
219	BZ	Z1	Bordo	0.84	2.49	66.15	3.70	-	-
221		Z2	Bordo	0.81	2.49	67.64	2.55	-	-
223		Z3	Bordo	0.96	2.52	62.06	-	-	-
231	Perfil 2	DA	0-20	0.66	1.28	48.78	5.06	5.77	36.50
232		DA	20-52	0.86	2.57	66.53	2.02	6.24	26.50
233		DA	52-70	0.86	2.57	66.57	2.61	6.37	20.00
234		DA	70->105	0.67	2.33	71.08	2.83	6.44	28.00
309	PC	DA1	Sup.	0.87	1.02	14.35	-	-	-
310		DA2	Sup.	1.08	2.13	49.15	-	-	-
311		DA3	Sup.	0.93	1.35	30.88	-	-	-
315	Perfil 3	DA	0-13	0.94	1.58	40.40	3.25	6.23	42.50
316		DA	13-28	0.99	2.33	57.39	2.53	6.90	32.50



317		DA	28-37	0.69	2.31	70.00	2.79	6.91	31.00
318		DA	37-52	0.62	2.16	71.18	2.46	6.95	25.00
319		DA	52->95	0.61	2.27	73.32	3.99	6.93	20.00
325	BC	DA1	Sup.	0.30	0.43	31.01	-	-	-
326		DA2	Sup.	0.61	0.67	9.52	-	-	-
327		DA3	Sup.	0.29	0.87	66.95	-	-	-
331	Perfil 4	DA	2-10	0.80	2.00	59.91	3.91	5.95	44.00
332		DA	10-23	1.12	2.38	52.94	2.26	6.48	27.50
333		DA	23-57	0.66	2.38	72.43	3.36	6.63	20.00
334		DA	57->90	0.59	2.04	70.87	5.91	6.80	20.50

Nota: El signo (-) indica que tal indicador no se determinó para esa muestra. Sup.: Superficial.

**Cuadro 39.** Textura de los horizontes de cada perfil de suelo

<b>Clave</b>	<b>Muestra</b>	<b>% Arcillas</b>	<b>% Limos</b>	<b>% Arenas</b>	<b>Textura</b>
208	Perfil 1 0-18	15.44	20	64.56	CA
209	18-40	10.8	17.64	71.56	CA
210	40-56	12.52	18	69.48	CA
211	56-89	9.8	16.64	73.56	CA
212	89->115	8.24	18.64	73.12	CA
235	Perfil 2 0-20	13.44	15.64	70.92	CA
236	20-52	9.44	19.64	70.92	CA
237	52-70	10.44	24.64	64.92	CA
238	70->105	10.44	22.28	67.28	CA
320	Perfil 3 0-13	10.88	18.28	70.84	CA
321	13-28	9.52	18.64	71.84	CA
322	28-37	15.52	16.64	67.84	CA
323	37-52	13.44	17	69.56	CA
324	52->95	13.44	18.64	67.92	CA
335	Perfil 4 2-10	12.44	16.64	70.92	CA
336	10-23	11.8	20	68.2	CA
337	23-57	9.8	21.64	68.56	CA
338	57->90	20.44	21.64	57.92	CRA

CA: Franco arenosa. CRA: Franco arcillo arenosa.

**Cuadro 40.** Porcentaje de agregados por tamaño y grupo de agregados (MA, MeA y  $\mu$ A)

Muestra		Clave	Agregados (%)	Clave	Agregados (%)	Clave	Agregados (%)	Clave	Agregados (%)	Clave	Agregados (%)	MA (%)	MeA (%)	$\mu$ A (%)
Bosque	Control1	1.1 a	54.62	1.1 b	14.78	1.1 c	5.80	1.1 d	6.10	1.1 e	0.53	54.62	27.20	18.17
	Control2	1.2 a	40.82	1.2 b	10.26	1.2 c	5.02	1.2 d	6.55	1.2 e	3.13	40.82	24.95	34.23
	Control3	1.3 a	33.51	1.3 b	0.26	1.3 c	0.70	1.3 d	5.21	1.3 e	1.92	33.51	8.10	58.39
Bosque	Frente1	1.4 a	22.16	1.4 b	12.63	1.4 c	18.03	1.4 d	21.80	1.4 e	4.64	22.16	57.10	20.75
Zanja	Frente2	1.5 a	41.42	1.5 b	7.18	1.5 c	5.77	1.5 d	10.12	1.5 e	2.13	41.42	25.20	33.38
	Frente3	1.6 a	11.13	1.6 b	14.65	1.6 c	6.65	1.6 d	15.78	1.6 e	2.54	11.13	39.62	49.25
Bosque	Bordo 1	1.7 a	17.53	1.7 b	14.26	1.7 c	4.38	1.7 d	4.75	1.7 e	2.21	17.53	25.59	56.88
Zanja	Bordo 2	1.8 a	12.51	1.8 b	10.40	1.8 c	4.29	1.8 d	5.65	1.8 e	2.39	12.51	22.74	64.76
	Bordo 3	1.9 a	26.93	1.9 b	8.36	1.9 c	2.89	1.9 d	4.68	1.9 e	2.20	26.93	18.12	54.95
Pasto	Control1	2.1 a	53.08	2.1 b	4.22	2.1 c	1,84	2.1 d	2.49	2.1 e	0.71	53.08	9.26	37.66
	Control2	2.2 a	11.72	2.2 b	9.82	2.2 c	5.53	2.2 d	7.00	2.2 e	3.03	11.72	25.39	62.89
	Control3	2.3 a	13.48	2.3 b	5.20	2.3c	1.55	2.3 d	3.79	2.3 e	1.69	13.48	12.23	74.29
Pasto	Frente1	2.4 a	10.14	2.4 b	8.87	2.4 c	2.57	2.4 d	4.74	2.4 e	2.07	10.14	18.26	71.60
Zanja	Frente2	2.5 a	2.08	2.5 b	8.80	2.5 c	3.49	2.5 d	6.27	2.5 e	2.55	2.08	21.10	76.82
	Frente3	2.6 a	27.03	2.6 b	9.89	2.6 c	4.48	2.6 d	6.08	2.6 e	2.29	27.03	22.75	50.23
Pasto	Bordo 1	2.7 a	1.13	2.7 b	3.08	2.7 c	2.09	2.7 d	7.20	2.7 e	3.61	1.13	15.99	82.88
Zanja	Bordo 2	2.8 a	1.30	2.8 b	4.09	2.8 c	2.04	2.8 d	5.81	2.8 e	3.44	1.30	15.38	83.33
	Bordo 3	2.9 a	2.53	2.9 b	9.76	2.9 c	4.27	2.9 d	7.21	2.9 e	3.18	2.53	24.42	73.06

Nota: MA: macroagregados. MeA: mesoagregados.  $\mu$ A: microagregados.

**Cuadro 41.** Dimensiones de las zanjas y bordos medidos en campo

Sitio	Zanja	Zanja			Distancia entre zanjas		Bordo		
		Ancho (cm)	Largo (m)	Profundo (cm)	Lateral	Frontal (m)	Frente (m)	Ancho (m)	Superficie bordo
Pastizal	1	52	2.13	76	1.6	4.13	1.7	2.3	3.91
	2	50	2.1	70	1.9	4.7	0.8	2.2	1.78
	3	50	2.08	63	1.8	5	1.64	2.2	3.66
	4	46	1.98	64	1.8		1.6	2.3	3.68
	5	50	2.1	65	1.45		1.4	2.1	2.94
	6	70	2.3	74			1.7	2.6	4.42
	7	61	2.24	65			2.2	2.3	5.10
	8	52	2.13	68			2.33	1.8	4.08
	9	60	1.85	70			1.8	2.4	4.23
Bosque	1	56	2.1	55	2.23	4.45	1.76	2.4	4.22
	2	55	2.24	58	2.23	4.55	1.76	2.5	4.40
	3	47	2.2	55	2.2	3.15	1.72	2.4	4.13
	4	46	1.97	55	2.2		1.83	1.9	3.57
	5	46	2.1	40	2.2		1.8	2.3	4.12
	6	47	2.04	59			1.8	2.3	4.14
	7	52	2.05	58			1.8	2.6	4.75
	8	47	2.05	59			1.8	2.4	4.23
	9	55	2	59			1.8	2.4	4.25

### Anexo 3. Zanjas trinchera

**Cuadro 42.** Toneladas calculadas de suelo removido de las zanjas en el sitio de pastizal

Zanja 1					
Profundidad (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
76	18	199368	0,86	171,5	0,17
76	22	243672	1,04	253,4	0,25
76	16	177216	0,76	134,7	0,13
76	20	221520	0,98	217,1	0,22
<b>Suma:</b>					<b>0,78</b>
Zanja 2					
Profundidad (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
70	18	189000	0,86	162,5	0,16
70	22	231000	1,04	240,2	0,24
70	16	168000	0,76	127,7	0,13
70	14	147000	0,98	144,1	0,14
<b>Suma:</b>					<b>0,67</b>
Zanja 3					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
63	18	187200	0,86	161,0	0,16
63	22	228800	1,04	238,0	0,24
63	16	166400	0,76	126,5	0,13
63	7	72800	0,98	71,3	0,07
<b>Suma:</b>					<b>0,60</b>
Zanja 4					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
64	18	163944	0,86	141,0	0,14
64	22	200376	1,04	208,4	0,21
64	16	145728	0,76	110,8	0,11
64	8	72864	0,98	71,4	0,07
<b>Suma:</b>					<b>0,53</b>
Zanja 5					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
65	18	189000	0,86	162,5	0,16
65	22	231000	1,04	240,2	0,24
65	16	168000	0,76	127,7	0,13
65	9	94500	0,98	92,6	0,09
<b>Suma:</b>					<b>0,62</b>
Zanja 6					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
74	18	289800	0,86	249,2	0,25
74	22	354200	1,04	368,4	0,37
74	16	257600	0,76	195,8	0,20
74	18	289800	0,98	284,0	0,28
<b>Suma:</b>					<b>1,10</b>
Zanja 7					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
65	18	245952	0,86	211,5	0,21
65	22	300608	1,04	312,6	0,31
65	16	218624	0,76	166,2	0,17
65	9	122976	0,98	120,5	0,12
<b>Suma:</b>					<b>0,81</b>
Zanja 8					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)

68	18	199368	0,86	171,5	0,17
68	22	243672	1,04	253,4	0,25
68	16	177216	0,76	134,7	0,13
68	12	132912	0,98	130,3	0,13
<b>Suma:</b>					<b>0,69</b>
Zanja 9					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
70	18	199800	0,86	171,8	0,17
70	22	244200	1,04	254,0	0,25
70	16	177600	0,76	135,0	0,13
70	14	155400	0,98	152,3	0,15
<b>Suma:</b>					<b>0,71</b>
<b>Promedio total de suelo removido (ton):</b>					<b>0,72±0,17</b>

**Cuadro 43.** Toneladas calculadas de suelo removido de las zanjas en el sitio de bosque

Zanja 1					
Profundidad (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
55	20	235200	0,66	155,61	0,16
55	32	376320	0,87	327,28	0,33
55	3	35280	0,92	32,62	0,03
<b>Suma:</b>					<b>0,52</b>
Zanja 2					
Profundidad (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
58	20	246400	0,66	163,02	0,16
58	32	394240	0,87	342,87	0,34
58	6	73920	0,92	68,36	0,07
<b>Suma:</b>					<b>0,57</b>
Zanja 3					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
55	20	206800	0,66	136,82	0,14
55	32	330880	0,87	287,77	0,29
55	3	31020	0,92	28,69	0,03
<b>Suma:</b>					<b>0,45</b>
Zanja 4					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
55	20	181240	0,66	119,91	0,12
55	32	289984	0,87	252,20	0,25
55	3	27186	0,92	25,14	0,03
<b>Suma:</b>					<b>0,40</b>
Zanja 5					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
40	20	193200	0,66	127,82	0,13
40	20	193200	0,87	168,03	0,17
<b>Suma:</b>					<b>0,30</b>
Zanja 6					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
59	20	191760	0,66	126,56	0,13
59	32	306816	0,87	266,84	0,27
59	7	67116	0,92	62,06	0,06
<b>Suma:</b>					<b>0,46</b>
Zanja 7					
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)
58	20	213200	0,66	140,71	0,14
58	32	341120	0,87	296,67	0,30
58	6	63960	0,92	59,15	0,06

<b>Suma:</b>						<b>0,50</b>
Zanja 8						
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)	
59	20	192700	0,66	127,18	0,13	
59	32	308320	0,87	268,14	0,27	
59	7	67445	0,92	62,37	0,06	
<b>Suma:</b>						<b>0,46</b>
Zanja 9						
Profundo (cm)	Perfil (cm)	Vol (cm <sup>3</sup> )	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Vol (kg)	Vol (ton)	
59	20	220000	0,66	145,20	0,15	
59	32	352000	0,87	306,13	0,31	
59	7	77000	0,92	71,20	0,07	
<b>Suma:</b>						<b>0,52</b>
<b>Promedio total de suelo removido (ton):</b>						<b>0,46±0,08</b>

#### Anexo 4

Resultados de los datos proporcionados por las Estaciones Meteorológicas Automáticas EMAs): Izta-Popo y Altzomoni del Servicio Meteorológico Nacional. Periodos Octubre 2014-Septiembre 2015. A continuación se muestran los valores promedio por mes de las variables consideradas.

**Cuadro 44.** Precipitación, temperatura y humedad relativa de las EMAs y valores promedio

EMA	Mes /Año	Precipitación (mm)	Temperatura del aire (°C)	Humedad Relativa (%)
<b>Altzomoni</b>	Octubre/14	91.8	5.53	81.72
	Noviembre/14	10.4	4.55	74.16
	Diciembre/14	48.2	3.80	64.9
	Enero/15	1	3.29	64.98
	Febrero/15	6	3.61	59.93
	Marzo/15	65.8	3.77	79.23
	Abril/15	32.6	6.49	76.36
	Mayo/15	151.6	5.73	84.63
	Junio/15	154	5.73	87.62
	Julio/15	135	5.72	82.15
	Agosto/15	124	6.27	82.65
Septiembre/15	148	5.73	91.57	
Suma		968.4		
Promedio			5.02	77.49
<b>Izta-Popo</b>	Octubre/14	989.4	8.98	73.55
	Noviembre/14	0.8	10.07	65.19
	Diciembre/14	4.6	9.26	58.84
	Enero/15	0	8.55	59.12
	Febrero/15	1	6.72	59.24
	Marzo/15	76.2	7.20	73.65
	Abril/15	25	9.94	70.78

	Mayo/15	39.2	9.27	77.50
	Junio/15	135.2	9.1	80.53
	Julio/15	118.4	8.79	77.68
	Agosto/15	143.2	9.29	77.29
	Septiembre/15	216.6	9.12	83.14
Suma		1749.6		
Promedio			8.86	71.38
<b>Promedio total</b>	Octubre/14	540.6	7.25	77.63
	Noviembre/14	5.6	7.31	69.68
	Diciembre/14	26.4	6.53	61.87
	Enero/15	0.5	5.92	62.05
	Febrero/15	3.5	5.17	59.58
	Marzo/15	71	5.49	76.44
	Abril/15	28.8	8.22	73.57
	Mayo/15	95.4	7.50	81.07
	Junio/15	144.6	7.41	84.07
	Julio/15	126.7	7.26	79.91
	Agosto/15	133.6	7.78	79.97
	Septiembre/15	182.3	7.42	87.35
Suma total		1359		
Promedio total			6.94	74.43