



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE
SISTEMAS RIBEREÑOS DEL PARQUE NACIONAL IZTA-POPO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

P R E S E N T A:

SANDOVAL APARICIO JUAN CARLOS

DIRECTOR DE TESIS: DR. GERARDO CRUZ FLORES

2016, Ciudad de México

PROYECTO PAPIME-PE 215016





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.

*¡Que permanezca la Tierra!
¡Que estén en pie los montes!
Así venía hablando Ayocuan Cuetzpaltzin.
En Tlaxcala, en Huexotzinco.
Que se repartan
flores de maíz tostado, flores de cacao.
¡Que permanezca la tierra!*

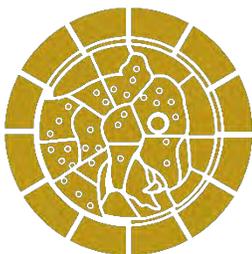
*¿Solo así he de irme
como las flores que perecieron?
¿Nada quedara de mi nombre?
¿Nada de mi fama aquí en la Tierra?
¡Al menos flores, al menos cantos!
¿Que podrá hacer mi Corazón?
En vano hemos llegado,
hemos brotado en la Tierra.*

Ayocuan (Siglo XV y XVI)



Indudablemente, cada generación se cree destinada a rehacer el mundo. La mía sabe, sin embargo, que no podrá hacerlo. Pero su tarea es quizás mayor. Consiste en impedir que el mundo se deshaga.

Albert Camus (1913-1960)



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por la oportunidad de pertenecer a esta gran comunidad, pero sobre todo, por la extraordinaria formación profesional que se me brindó.

A la Dirección General de Asuntos de Personal Académico por su apoyo al proyecto PE 215016.

A los profesores que a lo largo de mi formación despertaron en mí el amor, respeto y admiración por las ciencias del suelo.

Al laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal y los compañeros que se encuentran en él, cuya compañía y ayuda hacían muy amenas las salidas de campo y que de alguna u otra manera fueron partícipes de este trabajo.

A mis sinodales, la Biól. Elvia García Santos, la Dra. Rosalva García Sánchez, el M. en C. Enrique Suástegui Méndez, la M. en C. Alma Bella López López y el Dr. Gerardo Cruz Flores por enriquecer y mejorar este trabajo con sus observaciones.

Al M. en C. Enrique Suástegui Méndez por su asesoría, consejos y apoyo para llevar a cabo este trabajo, por sus conocimientos y enseñanzas, pero sobre todo por su amistad.

Con especial cariño y respeto a la M. en C. Alma Bella López López por ser una persona maravillosa. ¡Como las plantas frescas de la naturaleza! Mi más sincero agradecimiento por tu apoyo, tus consejos, pero sobre todo por tu amistad.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores por darme la oportunidad de aprender de un gran maestro que inspira admiración y respeto, por su tiempo y todas sus enseñanzas, por ser mi maestro, un buen amigo y un gran consejero. ¡¡MUCHAS GRACIAS!!

DEDICATORIA

A mi madre por quererme sin condición alguna, porque en los peores momentos siempre estuviste ahí iluminado el camino y protegiéndome, como formando parte de mi ser.

A Manuel, mi hermano y amigo, por tu apoyo incondicional, por haberme dado el mejor ejemplo. Eres la persona que más admiro y respeto. “El Omnissiah sabe todo, comprende todo. ¡¡Por Tanith. Por el Emperador!!”.

A Elizabeth, Yasmin, Andrés y Rosa, mis hermanos, por ser una parte fundamental de mi vida, por ser la mejor compañía en los momentos buenos y malos.

A mis sobrinos Karin, Juan Manuel e Isabela, tan esperados y amados, alegran mi vida con sus sonrisas y ocurrencias.

A mis amigos de la FES Zaragoza, por compartir con migo momentos inolvidables a lo largo de este periodo de formación académica, por todas esas tardes de charlas, fiestas y juegos en la palapa.

A todos ustedes ¡¡Muchas gracias!!

Espero morir como he vivido, respetándome a mí mismo como condición para respetar a los demás y sin perder la idea de que el mundo debe ser otro y no esta cosa infame.

José Saramago (1922-2010)

ÍNDICE

	Pagina
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	3
3. ANTECEDENTES	6
4. MARCO TEÓRICO	8
4.1. El suelo	8
4.2. Génesis de suelo y factores de formación	9
4.2.1. El clima	10
4.2.2. Material parental	11
4.2.3. Relieve	13
4.2.4. Organismos	14
4.2.5. El tiempo	15
4.3. Clasificación de suelos	15
4.3.1. Sistemas de clasificación de suelos	16
4.3.2. Soil Taxonomy	17
4.3.3. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo	17
4.4. Levantamiento de suelos	18
4.5. Métodos de muestreo de suelos para clasificación	19
5. JUSTIFICACIÓN	21
6. HIPÓTESIS	21
7. OBJETIVOS	21
7.1. Objetivo general	21
7.2. Objetivos específicos	22
8. ÁREA DE ESTUDIO	23
8.1. Ubicación	24
8.2. Suelos	24
8.3. Clima	26
8.4. Vegetación	26
9. MÉTODOS	28
9.1. Recopilación y adecuación de información cartográfica	28

9.2. Campo	29
9.3. Laboratorio	31
9.4. Análisis estadístico	32
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
10.1. Descripción de los sitios de estudio y perfiles de suelo	37
10.1.1. Perfil 1: Joyita “La ranita”	37
10.1.2. Perfil 2: Buenavista	42
10.1.3. Perfil 3: Xalitzintla	47
10.1.4. Perfil 4: San Nicolás	51
10.2. Propiedades físicas y químicas de los suelos	56
10.3. Caracterización de los suelos ribereños	65
10.4. Uso actual y potencial de los suelos ribereños	68
11. CONCLUSIONES	75
12. BIBLIOGRAFÍA	77
13. ANEXOS	84

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Perfil hipotético de un suelo mineral.	9
Figura 2: Formación de suelo.	10
Figura 3: Columna estratigráfica simplificada del volcán Popocatepetl que muestra los depósitos emplazados a partir del último colapso del cono ocurrido hace 23 000 años.	12
Figura 4: Influencia del relieve en la morfología de los suelos.	13
Figura 5: Métodos de muestreo de suelos: A) método de la calicata, B) método de la barra de sondeo y C) método del tubo de paredes delgadas.	19
Figura 6: Ubicación del área de estudio. La microcuenca del río Apol converge en la parte alta con el polígono del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl.	23
Figura 7: Andosol, suelo característico de la región del Parque Nacional Izta-Popo, donde se muestran diferentes depósitos de pómez de las últimas erupciones del Popocatepetl.	25
Figura 8: Esquema de las franjas ecológicas y su vegetación característica.	26
Figura 9: caracterización ecología de sistemas ribereños.	29
Figura 10: Diagrama para la descripción del suelo, calidad del sitio y evaluación de su aptitud.	30
Figura 11: Esquema de las barrenaciones en el suelo ribereño en un transecto de 30 m lo largo del río, a una distancia del cauce de 1, 3 y 5 metros.	31
Figura 12: Trabajo de laboratorio. Materia orgánica, pH en NaF e índice melánico.	31
Figura 13: Distribución de suelos reportada por Miehllich (1980). Los símbolos rojos indican los sitios en donde se realizaron los perfiles de suelo, las letras simbolizan la unidad de suelo.	33
Figura 14: Perfil altitudinal y condiciones climáticas de los sitios de estudio.	35
Figura 15: Vista panorámica del sitio donde se muestran la dominancia de gramíneas en el valle y pinos en las laderas, el suelo ribereño recibe aportes de materiales del arroyo y las laderas.	37
Figura 16: A) Mapa que muestra la distribución de las capas de pómez ocre. B) Deposito de pómez ocre encontrado en el sitio de estudio.	38
Figura 17: Depósito de pómez ocre (izquierda), afloramiento andesitas y riolitas en algunas secciones del sistema ribereño (derecha).	43

Figura 18: Exposición solana del sistema ribereño en donde se muestra la zona de cultivo (izquierda) y la pequeña franja de vegetación conservada a lo largo del cauce (derecha).	47
Figura 19: Cultivo de maíz a un lado del río, se puede observar la poca vegetación que protege el cauce (izquierda). En la imagen del centro, cultivo de haba localizado a 10 m del río. A la derecha obras para la instalación del drenaje municipal a un lado del río.	51
Figura 20: Comportamiento de algunos criterios de clasificación con respecto a la profundidad, los tres primeros datos corresponden a propiedad ándicas. La retención de fosforo (RF) cumple cuando abarca de la línea punteada a la derecha, mientras que para la densidad aparente (DA) y en carbono orgánico (CO) lo hacen de la línea punteada hacia la izquierda. El índice melánico (IM) menor de 1.7 indica la humificación de la materia orgánica.	57
Figura 21: A) Densidad aparente del suelo ribereño en diferentes usos de suelo. B) Porcentaje de humedad del suelo ribereño en diferentes usos de suelo. C) Porcentaje de porosidad de suelo ribereño bajo diferentes usos de suelo.	59
Figura 22: Porcentaje de materia orgánica en suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo por perfil y por horizonte.	60
Figura 23: Variación del pH de suelos ribereños por horizonte y perfil.	61
Figura 24: Capacidad de intercambio catiónico por horizonte. B) Porcentaje de saturación de bases por horizonte.	62
Figura 25: Variación del pH medido en NaF por sitio.	63
Figura 26: A) pH medido en NaF después de 60 minutos. B) Porcentaje de retención de fósforo por horizonte.	64
Figura 27: Variación de las características del suelo mientras se aleja de la corriente, el caso de la Joyita "La Ranita".	65
Figura 28: Variación de la profundidad de desarrollo del suelo en las franjas estudiadas.	67
Figura 29: Variación de la materia orgánica respecto a la distancia del cauce en suelo superficial ribereño.	67
Figura 30: A) Profundidad media del suelo por exposición. B) Porcentaje de materia orgánica por exposición.	68
Figura 31: Uso de suelo en la zona de estudio.	70
Figura 32: Tipos de suelo presentes en la microcuenca del río Apol.	71

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1: Ubicación de los sitios de estudio.	28
Cuadro 2: Métodos utilizados en el análisis físico y químico de las muestras de suelo.	32
Cuadro 3: Equivalencia en la WRB de los grupos de suelo reportados por Miehlich (1980) para la zona del Parque Nacional Izta-Popo.	34
Cuadro 4: Características ecológicas de los sitios de estudio.	38
Cuadro 5: Propiedades edafo-ecológicas del perfil de Joyita "La ranita".	39
Cuadro 6: Propiedades edafo-ecológicas del perfil de Buenavista.	43
Cuadro 7: Propiedades edafo-ecológicas del perfil de Xalitzintla.	48
Cuadro 8: Propiedades edafo-ecológicas del perfil de San Nicolás.	52
Cuadro 9: Descripción de los horizontes.	55
Cuadro 10: Clasificación de los suelos (IUSS, 2014) analizados en el Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia.	56
Cuadro 11: Resumen de análisis de varianza de las propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo ribereño.	58

1. RESUMEN

En la Cuenca Alta del Balsas dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl se realizó esta investigación para caracterizar y clasificar los suelos de cuatro sistemas ribereños adyacentes a sitios de uso de suelo forestal, agrícola, pecuario y urbano, a lo largo de un sistema fluvial de régimen permanente. El objetivo fue caracterizar y clasificar los suelos de estos sistemas utilizando la Base Mundial Referencial del recurso suelo (WRB) con la finalidad de elaborar un edafológico de la zona de estudio y proponer alternativas para el manejo adecuado de los suelos ribereños según sus potencialidades y limitaciones.

En cada sitio se realizó la descripción ecológica del sistema ribereño, se describió un perfil de suelo en una zona representativa y se colectaron muestras por horizonte, también se realizaron barrenaciones a diferentes distancias a ambos lados del río y se tomaron muestras, también se elaboró la evaluación edafo-ecológica por sitio y por horizonte. En el laboratorio se determinaron algunas propiedades físicas y químicas de los suelos. Con los resultados de los análisis de laboratorio, se realizaron pruebas estadísticas de correlaciones de Pearson, análisis de varianza y pruebas de Tukey.

Los suelos ribereños mostraron texturas gruesas entre arenosa franca y franco arenosa. En altitudes entre 3300 y 4000 m sobre tefras con antigüedad de 5,000 años, se han desarrollado andosoles vítricos en los que la formación de minerales de bajo orden estructural es incipiente por lo que la fijación de fósforo es menor del 85 % y el pH oscila entre ácidos a moderadamente ácidos. El principal proceso pedogenético es la acumulación de la materia orgánica humificada, que promueve el desarrollo de agregados granulares, a los que se asocia un gran espacio poroso, manifestado en una densidad aparente baja (entre 0.8 y 1 g·cm⁻³) y aumento en la retención de agua. En el intervalo altitudinal de 2600 a 2400 m predominan fluvisoles desarrollados a partir de material aluvial reciente y materiales coluviales acarreados de las laderas altas en distintos tiempos. Estos suelos se caracterizaron por una débil diferenciación de horizontes, baja capacidad para retener agua y densidades medias (1.2 a 1.4 g·cm⁻³), pH neutro (6.6 a 7.0), una saturación de bases mayor del 50 %, bajo porcentaje de carbono orgánico que varía con la profundidad de manera irregular y un alto contenido de fósforo (>1.5 g kg⁻¹). Aunque las diferencias entre las propiedades físicas, químicas y morfológicas de los suelos ribereños se relacionan con la altitud, el tipo de vegetación, clima, topografía local, el tipo de material parental, etc., hay parámetros como la materia y el carbono orgánicos, la densidad aparente, el contenido de fósforo y la disminución de la cobertura vegetal que se relacionan con el deterioro ambiental de estas zonas y que afectan su capacidad para realizar sus funciones ecológicas, entre las que destacan la preservación de la calidad del agua.

SUMMARY

In the Watershed Alto Balsas, from the Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park to the valley below, this research was conducted in four riparian ecosystems, distributed over a river system permanent regime which is adjacent to sites use forestry, agricultural land, livestock and urban. The aim of this study was to characterize and classify soils of these systems using the World Reference Base for Soil Resources (WRB) in order to propose distribution maps and alternative for the proper management of coastal soils according to their potential and limitations. At each site pedo-ecological and ecological description was made, soil characterization profiles in representative areas and river system one sample were collected by horizon. They combined with the above, drillings were also made at different distances on both sides of the river. With corresponding analytical methods, laboratory tests were performed. It was observed that coastal soils showed thick textures between frank sandy and sandy loam. At altitudes between 3300 and 4000 m on tephra with 5,000 years old have been developed Vitric andosols in which the formation of minerals of low structural order is incipient whereby phosphorus fixation is less than 85% and the pH is between strongly acidic to slightly acidic. The main pedogenic process observed, is the accumulation of humified organic matter that promotes the development of granular aggregates, which large pore space, manifested in low bulk density (between 0.8 and $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) and increase is associated in water retention. In the altitudinal range between 2600 and 2400 m, dominated fluvisoles developed from recent alluvial material and colluvial material carried from the high slopes at different times. These soils are characterized by weak horizon differentiation, low-capacity to retain water. The bulk density was observed between 1.2 and $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, the neutral pH (6.6 to 7) and base-saturation greater than 50%. They have a low percentage of organic carbon which varies irregularly with depth, and had high phosphorus content ($> 1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Although the differences between physical, chemical and morphological properties of riparian soils are related to altitude, vegetation type, climate, local topography, the type of parent material, etc., there are properties such as organic matter and carbon, bulk density, the content of phosphorus and decreased vegetation cover that relate to environmental degradation in these areas and affecting their ability to perform their ecological functions, among which the maintenance of water quality.

2. INTRODUCCIÓN

El suelo ha tenido una gran importancia para la vida humana, en un principio desde el punto vista agrícola al ser un recurso fundamental para la alimentación, pero conforme avanza el conocimiento sobre los suelos se sabe que este cumple con funciones reguladoras de gran importancia para el ambiente natural y humano.

El suelo es un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en las superficies de las tierras que ocupa un espacio y se caracteriza por uno o ambos de los siguientes: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía, materia y por la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 2014).

En los sistemas forestales la relación suelo-bosque es quizás la más relevante en cuanto a la capacidad protectora y reguladora de estos ecosistemas, en donde los suelos juegan un papel importante en la regulación del ciclo hidrológico y la recarga de acuíferos, influyen en la tasa de crecimiento del bosque, la calidad de la madera y la resistencia de las especies a enfermedades y factores abióticos como el viento, otra función importante del suelo es la de actuar como filtro que protege y amortigua a los otros componentes del ecosistema forestal de diversos procesos de daño o contaminación (Gayoso y Alarcón, 1999). Además es el medio en donde se realizan los ciclos biogeoquímicos necesarios para la reincorporación de los compuestos orgánicos, brindan soporte y suministro de nutrientes a las plantas, están también entre los depósitos de carbono más importantes y albergan una cuarta parte de la biodiversidad de nuestro planeta (Cotler *et al.*, 2007).

Pese a la gran importancia del suelo forestal, en México hay una creciente degradación de este recurso provocada en gran medida por la deforestación cuya principal causa es el cambio de uso de suelo, la expansión urbana y en mayor medida el desarrollo de actividades agropecuarias. Muchas veces en las zonas degradadas quedan inmersos algunos árboles aislados, así como franjas de vegetación distribuidas a lo largo de arroyos y ríos conocidas como vegetación ribereña (Vázquez *et al.*, 2015).

Los ríos, lagos y cuerpos de agua en general, cumplen funciones esenciales para la preservación de los ecosistemas y las relaciones territoriales (Naiman *et al.*, 1993; Naiman y Décamps, 1997; Allan,

2004), teniendo una dependencia estrecha y recíproca con la vegetación ribereña (Guevara *et al.*, 2008). Se reconoce esta última como sistema vegetal cercano a cursos y cuerpos de agua, siendo una transición entre hábitats terrestres y acuáticos en sus diferentes estratos verticales, incluidas las herbáceas. Weisberg *et al.* (2013) dan cuenta del papel ecológico significativo que cumple esta vegetación en la conservación de los servicios ecosistémicos asociados a las riberas.

Las zonas ribereñas son sistemas únicos y dinámicos, dependientes de cursos o cuerpos de agua con una matriz variable de vegetación, se sabe que el tamaño de la zona ribereña es proporcional al tamaño de la corriente y la topografía del sitio. Granados-Sánchez *et al.* (2006) la definen como regiones de transición e interacción entre los sistemas terrestre y acuático, en donde la composición de la flora y la fauna está fuertemente determinada por la intensidad luminosa, el contenido en agua y la granulometría del suelo. Además, los bosques de ribera juegan un papel importante al retener parte del nitrógeno y el fósforo transportados por la escorrentía evitando que lleguen a los flujos de agua, estas bandas de vegetación reducen la temperatura del agua en los días calurosos, estabilizan las orillas y son el hábitat de muchas especies de animales y vegetales. Por su parte Vázquez *et al.* (2015) mencionan que estos ambientes controlan el flujo de materia y energía entre ambos sistemas, mantienen una alta biodiversidad y son un hábitat crítico para la conservación de especies.

En general, estas zonas permiten al paisaje que los alberga procesar mayor cantidad de materia orgánica y capturar más nitrógeno, mejorar la cantidad y calidad del agua, facilitar el procesamiento de contaminantes y regular la temperatura y luz que ingresa a los sistemas acuáticos de mejor manera que aquellos sin este tipo de vegetación, reduciendo las probabilidades de afectar negativamente los ecosistemas río abajo (Scarsbrook *et al.*, 2001; Sirombra y Mesa, 2010). Además, los sistemas ribereños pueden categorizarse dentro de los más diversos, dinámicos y complejos hábitats presentes en la Tierra (Sweeney *et al.*, 2004), frecuentemente fértiles y productivos, debido principalmente a su ubicación cercana a los cursos y cuerpos de agua, donde los depósitos aluviales proporcionan un suelo rico en nutrientes y materia orgánica (Granados-Sánchez *et al.*, 2006).

La importancia del suelo y de estas zonas ecológicas nos conduce a la necesidad de desarrollar y proponer estrategias y planes de manejo para un adecuado uso de estos suelos, basados en el conocimiento de sus propiedades. La pérdida y degradación de estos ecosistemas así como el

deterioro de la tierra afecta la regulación del ciclo hidrológico, la cantidad y calidad del agua, pero sobre todo limita la capacidad de estas zonas para proporcionar servicios ambientales y actuar como un amortiguador ante los cambios climáticos promovido principalmente por la estabilidad del suelo y la permanencia de la cobertura vegetal.

Para poder conservar, restaurar y asignar un uso adecuado de los suelos es primordial conocerlos, por desgracia en México los estudios sobre suelos en ecosistemas ribereños están rezagados, algunos son muy generales, otros muy antiguos y a veces ni siquiera existen (Muñoz, 1999; Mikkelsen y Vesho, 2000), por ello es importante realizar estudios que nos permitan conocer el tipo de suelo que sostiene los ambientes riparios, su distribución y las características que tienen.

Los estudios de caracterización y clasificación de suelos aplicados como método científico son un instrumento importante para realizar planeamientos más adecuados del manejo del recurso suelo (Flores, 1977). Ya que permiten conocer sus características, predecir su comportamiento, identificar sus mejores usos, estimar su productividad y proporcionar objetos o unidades de investigación, así como extender y extrapolar resultados de investigaciones u observaciones (Buol *et al.*, 1990; Porta *et al.*, 2003), lo que nos permite conocer las potencialidades y limitaciones de los suelos.

Entre las utilidades prácticas que se pueden generar a partir de la sistemática de descripción, clasificación y cartografía de los suelos se encuentran: promover el desarrollo urbanístico sostenible, asignar usos de suelo, identificar y estudiar áreas con riesgo de erosión y monitorizar áreas con procesos erosivos activos, establecer áreas de protección para la captación de agua, proteger la biodiversidad de los suelos, los recursos naturales (agua, aire, paisaje suelo) y disponer de información de suelos para implementar planes de conservación hidrológico-forestales (IEC, 2016).

3. ANTECEDENTES

Existen numerosas definiciones de lo que constituye una zona ribereña, aunque los sistemas ribereños suelen ser muy variables generalmente se extienden desde el cauce del río o arroyo, incluyen los límites de las zonas de inundación y recorre el dosel de la vegetación de las orillas (Sedell *et al.*, 1991 en Mikkelsen y Vesho, 2000), estos paisajes adyacentes a las vías de drenaje muestran una vegetación, suelo y características hidrológicas a lo largo de gradientes topográficos y de humedad que son distintos de los del paisaje dominante (Manci, 1989). El tamaño de la zona de ribera es directamente proporcional al tamaño de la corriente y la topografía del lugar; pendientes pronunciadas características de las corrientes pequeñas pueden limitar el desarrollo de la vegetación de ribera, mientras que los sistemas acuáticos con topografía menos extrema presentan límites de ribera más grandes; por el contrario, la influencia de la zona de ribera en el sistema acuático disminuye a medida que aumenta el tamaño de la corriente (Mikkelsen y Vesho, 2000).

Como otros ecosistemas, los ambientes riparios son afectados principalmente por actividades tales como el pastoreo, la extracción de madera, uso recreativo, y la creación de estructuras físicas, como presas y carreteras, cuyos efectos en los suelos ribereños incluyen la compactación del suelo y la liberación de sedimentos debido a la excesiva eliminación de vegetación estabilizadora, mientras que la tala excesiva aumenta la erosión del suelo y altera los microclimas del suelo al aumentar la temperatura del suelo. Otras perturbaciones naturales tales como incendios, la acción del viento, y la acción del agua tienen efectos variables (Hall, 1988 en Mikkelsen y Vesho, 2000) Las perturbaciones antropogénicas tienden a aumentar la escorrentía superficial en sistemas de ribera, al eliminar la vegetación protectora de ribera, y alterar el flujo de agua a través de los sistemas acuáticos (Manci, 1989).

Los suelos ribereños tienden a ser más complejos en cuanto a las características minerales y sus propiedades físicas y químicas, en comparación con los suelos de las tierras adyacentes (Gayoso y Gayoso, 2003; Ceccon, 2003; Möller, 2011). En las franjas ribereñas las características físicas y químicas del suelo, la temperatura, la cantidad y el tipo de materia orgánica tienen un fuerte efecto en la composición de las especies de plantas del ambiente ribereño (Klapproth y Johnson, 2009). Pueden cambiar drásticamente y con frecuencia en periodos de tiempo relativamente cortos, pues

son influenciados por las inundaciones (temporales o a largo plazo); la deposición de sedimentos en las llanuras de inundación; la acumulación de materiales orgánicos en algunas áreas e incluso por la deshidratación (por ejemplo la desviación del cauce para la irrigación), como resultado de esta dinámica cada sistema ribereño y especialmente el suelo, tienen sus propias características y potencialidades (Lewis *et al.*, 2003).

Es gracias a todas estas características que la taxonomía de suelos en los sistemas ribereños está en pleno desarrollo y la mayoría de los trabajos de taxonomía y clasificación de suelos se han realizado en zonas ribereñas de ecosistemas lenticos, principalmente en zonas pantanosas y en sistemas ribereños loticos de zonas bajas, en donde los suelos no se han identificado más allá de suborden, e incluso a este nivel la taxonomía es de dudoso valor (Kovalchik y Clausnitzer, 2004; Lewis *et al.*, 2003).

En el caso del Parque Nacional Izta-Popo hay trabajos en los que se aborda la clasificación de suelos, algunos como el de Miehlich (1980) de gran relevancia debido a la gran cantidad de información edafológica generada, aun así, son pocos los trabajos enfocados a la clasificación de los suelos de ecosistemas ribereños de alta montaña. Es por ello que el estudio de los bosques ribereños de montaña es una de las tareas prioritarias pendiente, ya que el uso intensivo e indiscriminado de las áreas de ribera causan una degradación sustancial de su estructura ecológica.

4. MARCOTEORICO

4.1. El suelo

El suelo es uno de los elementos más comunes de nuestro entorno y sin embargo es lo que la mayoría de las personas menos conoce, aun cuando gran parte de nuestras actividades se relacionan o se ven influenciadas por sus características. Este recurso no goza del mismo reconocimiento ni aprecio que otros recursos naturales como, por ejemplo, el agua, los bosques o los yacimientos minerales, simplemente porque no es un recurso directamente consumible y porque hay una creencia común, pero errónea, de que los suelos son renovables (Zinck, 2005).

El suelo es un cuerpo natural tridimensional que se encuentra en la superficie de la tierra, está distribuido como un continuo en el paisaje con variaciones determinadas por las condiciones lito-climáticas del sitio, el drenaje, la historia geomorfológica y el uso de la tierra: por lo que los suelos no son uniformes, sino que presentan una gran variedad en el paisaje (Cotler *et al.*, 2007; Porta *et al.*, 2003). El suelo es un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en las superficies de las tierras que ocupa un espacio y se caracteriza por uno o ambos de los siguientes: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 2014).

La unidad de estudio y observación del suelo es el perfil, un corte vertical del terreno que permite estudiar el suelo en su conjunto desde su superficie hasta el material original, El perfil consta de varias capas que se dominan horizontes, cada uno de ellos suele tener características y propiedades diferentes en un mismo suelo (Duchaufour, 1994; Porta *et al.*, 2003). Universalmente los horizontes principales se designan con letras mayúsculas O, A, E, B y C (Figura 1) (Buol *et al.*, 1990; FAO, 2009).

Horizonte O: Horizonte donde predomina el material orgánico, algunas capas O están formadas por materiales forestal no descompuesto o parcialmente descompuesto como hojas, acículas, ramas, musgo y líquenes.

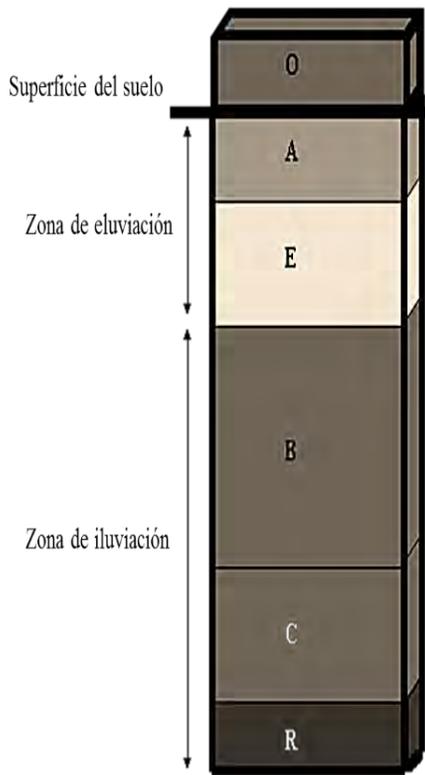


Figura 1: Perfil tipo de un suelo mineral (Modificado de Grunwald, 2015).

- Horizonte A: Son horizontes minerales que han sido formados en la superficie del suelo o subyacentes a un horizonte O, que muestran alteración de toda o gran parte de la estructura original de la roca y presentan acumulación de materia orgánica humificada.
- Horizonte E: Son horizontes minerales caracterizados por la pérdida de arcilla silicatada, hierro, aluminio, o alguna combinación de los mismos; con bajo contenido de materia orgánica y color claro.
- Horizonte B: son horizontes de acumulación de materiales coloidales, hay concentración iluvial de arcilla silicatada, hierro, aluminio, humus y carbonatos.
- Horizonte C: Horizontes que están poco afectados por procesos pedogenéticos, puede ser o no el material de los horizontes suprayacentes.
- Horizonte R: Roca continua o material parental sin alteración.

4.2. Génesis de suelo y factores de formación

Para que el suelo se forme a partir de la descomposición de la roca se debe pasar por una serie de etapas y fases, ninguna de ellas fácilmente separable e imperceptibles para el ojo humano. La formación del suelo tiene dos etapas fundamentales: a) acumulación de material parental y presencia de material orgánico y b) diferenciación de horizontes a base de la ganancia y pérdida de materiales, así como un conjunto de alteraciones. Al formarse el suelo se puede estar llevando a cabo la etapa uno y la dos pues es un proceso gradual y continuo (Arias, 2001). Tenemos entonces que las características de un suelo son el producto de la interacción de los denominados factores de formación (clima, biota, material parental, relieve y tiempo) actuando a través de los procesos de génesis (transformaciones, translocaciones, etc.) (Figura 2).

Estos factores formadores controlan el tipo e intensidad de los procesos edafogénicos, al tiempo que gobiernan también los procesos geomorfológicos y que la evolución del paisaje ésta

relacionada íntimamente con el desarrollo de los suelos (Ortiz y Dorronsoro, 2000 en Jiménez, 2013).



Figura 2: Formación de suelo (FAO, 2015).

Según Arias (2001) se conocen tres líneas de trabajo en lo referente a la génesis del suelo:

1. Génesis de los suelos que se fundamenta en el desarrollo del suelo en relación con la evolución del paisaje y los estudios multiformes de los procesos de formación del suelo.
2. Génesis de los suelos sobre la base de los procesos elementales de formación, en relación con los factores de formación que se reflejan en las propiedades de los horizontes genéticos.
3. Génesis de los suelos fundamentada en las propiedades de los suelos (sobre todo químico-mineralógicas) como resultado de los procesos de formación del suelo.

4.2.1. El clima

El clima tiene una acción directa sobre la humedad y la temperatura del suelo y una acción indirecta a través de la vegetación. Interviene en la formación del suelo, al controlar el tipo de procesos

posibles y su intensidad. La precipitación condiciona la transformación de sustancias en el suelo; y la radiación solar aporta energía al sistema (Hernández *et al.*, 2006). La temperatura influye sobre la velocidad de las reacciones químicas, la formación de la materia orgánica, la actividad biológica y la descomposición de la roca (Jiménez, 2013). El agua de la precipitación penetra en las fisuras de las rocas o interrelaciona con los sedimentos y provoca reacciones químicas de hidrólisis y de carbonatación que da lugar a transformaciones mineralógicas, que conjuntamente con la acción de los residuos vegetales conlleva a la formación del suelo, por ello se considera que el clima es un factor activo de mayor influencia en la edafogénesis (Porta *et al.*, 2003).

En el Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia la precipitación anual oscila entre 800 y 1200 mm, los regímenes de humedad del suelo presentes son el ácuico, údico y ústico. Mientras que el gradiente térmico del parque oscila de $-0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-0.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada 100 metros de altitud, por lo que se asume que el gradiente térmico varía en las diferentes laderas por las condiciones locales de topografía, orientación y microclima de cada una (CONANP, 2015; Escamilla, 2007 en López, 2014). Debido principalmente a la temperatura y la precipitación en la región así como el relieve y el material parental de los suelos, se ven acentuados los procesos de intemperismo hídrico y eólico, que ejercen efectos diferenciales sobre los suelos de esta región (CONANP, 2015).

4.2.2. Material parental

El material parental y relieve son considerados pasivos, sobre los que actúan el clima, los organismos y el hombre, a lo largo del tiempo (Arias, 2001). La composición mecánica, química y mineralógica de los suelos en las primeras etapas de desarrollo, casi se determina por la composición de la roca formadora, el material de origen ejerce una fuerte influencia en la composición y propiedades de la masa del suelo, en la formación de diferentes regímenes hídricos, térmico y gaseoso del suelo y en la velocidad e intensidad de los procesos que en el mismo tienen lugar (Hernández *et al.*, 2006).

En el volcán Iztaccíhuatl el material geológico dominante son las andesitas de piroxeno, minerales asociados a volcanes antiguos, mientras que las andesitas de hornblenda predominan en el volcán Popocatepetl. Durante los últimos 20 000 años debido a la constante actividad volcánica caracterizada por cuatro eventos mayores con producción de pómez de caída y flujos de ceniza (14 000, 5 000, 2 150, 1 1000 años) (Figura 3) (Macías, 2005).

Por ello el material parental de los suelos del Parque está compuesto por roca ígneas extrusiva de pómez, ceniza volcánica de diferentes etapas de actividad y por sedimentos; estos materiales influye de manera importante en la génesis y en las propiedades de los suelos del parque (Cruz *et al.*, 2009), una de ellas es el alofano, un silicato aluminico amorfo, que suele formar complejos con la materia orgánica. Los suelos ricos en alofano son generalmente profundos y por lo común con una estratificación definida; tienen compuestos húmicos en los horizontes superficiales, que son intensamente oscuros y resistentes a la descomposición microbiana. Tiene una baja densidad aparente, capacidad elevada para retener agua y agregados estructurales débiles, entre otras (Gama *et al.*, 1999; Shoji *et al.*, 1993).

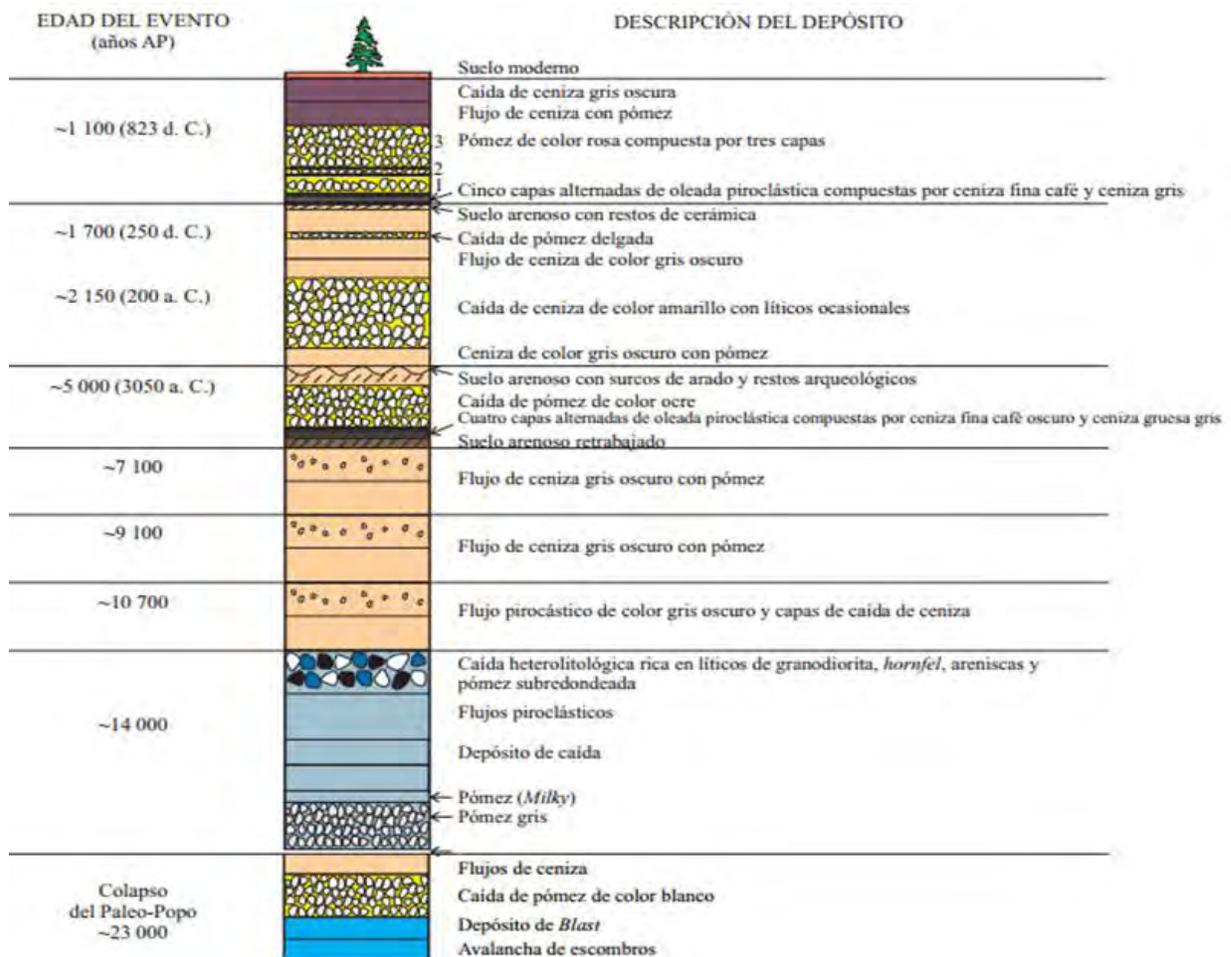


Figura 3: Columna estratigráfica simplificada del volcán Popocatepetl que muestra los depósitos emplazados a partir del último colapso del cono ocurrido hace 23 000 años (tomado de Macías 2005).

4.2.3. Relieve

El relieve comprende las deformaciones terrestres distadas por la geomorfología del paisaje e interactúa con los otros factores formadores (clima y biota) de manera dinámica determinando diferentes paisajes y diferentes unidades de suelos (Chorley *et al.*, 1984 en Jiménez, 2013).

El relieve afecta la formación de suelos al modificar las relaciones de humedad dentro del suelo, controla el grado de escorrentía, la remoción del suelo, el grado de erosión, así como la incidencia de los rayos solares sobre la superficie según la posición del relieve con respecto al sol. Existe siempre una relación entre el relieve y las propiedades de los suelos, las más comunes asociadas con la pendiente son: profundidad del horizonte A + B, espesor y contenido de materia orgánica, humedad del perfil del suelo, color del perfil, grado de desarrollo del perfil, reacción del suelo, contenido de sales solubles, temperatura y carácter de material parental inicial (Figura 4) (Arias, 2001).

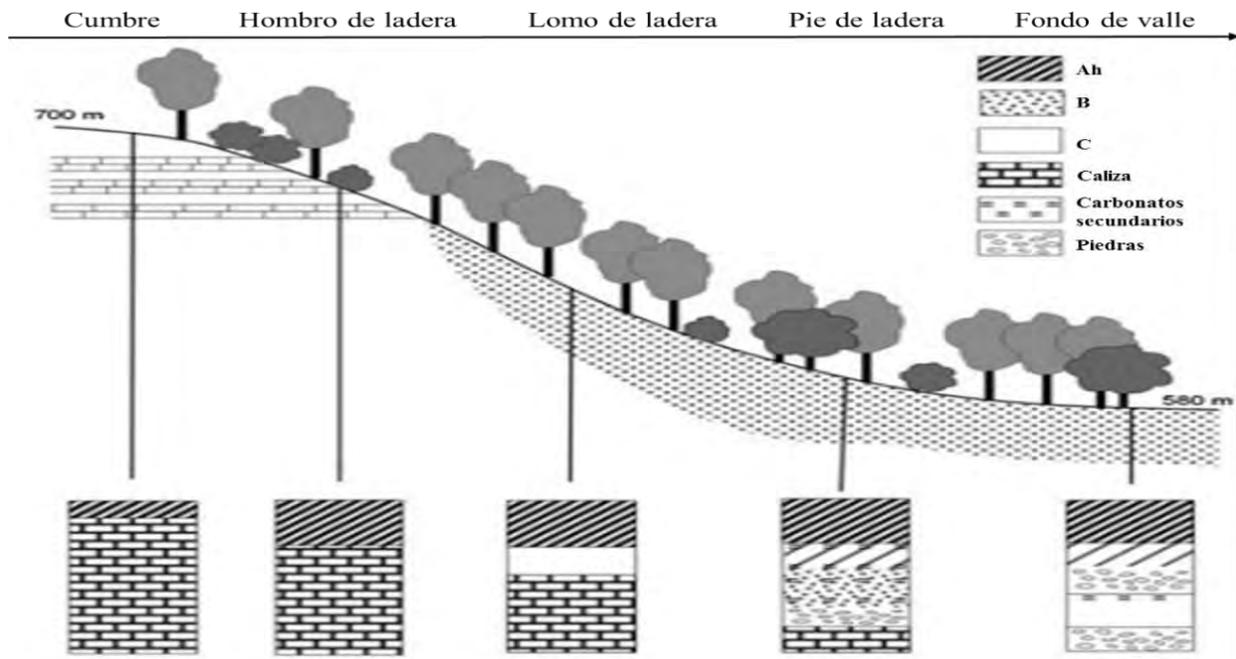


Figura 4: Influencia del relieve en la morfología de los suelos. (Modificado de Gallardo, 2015).

En México la influencia del factor topográfico en la formación del suelo es muy grande, pues casi todos los cambios en las unidades de suelo, que tienen lugar en distancias cortas, están relacionados con el factor topográfico (Gama *et al.*, 1999).

Las zonas montañosas de México con climas templados presentan una asociación típica de suelos: leptosol, regosol, phaeozem, andosol y cambisol. Los leptosoles dominan en las pendientes fuertes (36%), los regosoles se presentan en pendientes que aunque inclinadas permiten la acumulación de material erosionado; los phaeozems y cambisoles también se forman en superficies inclinadas pero estabilizadas por la vegetación. Los andosoles son muy comunes en las montañas de México, la mayoría bajo cobertura vegetal, si son deforestados, se erosionan rápidamente aun en sitios con poca pendiente (CONANP, 20015; Gama *et al.*, 1999).

4.2.4. Organismos

Los organismos que afectan la formación del suelo se dividen en tres grupos: la vegetación, los animales y los microorganismos. Son considerados como un factor activo en la formación de los suelos y que participa, no solo en la desintegración del material parental, sino también en la producción y descomposición de los materiales orgánicos (Arias, 2001; Jiménez, 2013).

La acción de este factor sobre el suelo involucra acciones como la translocación mecánica de partículas, la transformación y producción de síntesis de sustancias, la organización espacial (estructura), la producción y el consumo de nutrientes, la intervención sobre el pH y el potencial de óxido-reducción del medio; estas acciones repercuten a su vez sobre la biología del suelo (microorganismos). Mientras que la vegetación actúa de cuatro modos diferentes sobre la evolución del suelo: a) por el microclima que favorece, b) por la profundidad de enraizamiento, c) por el tipo de humus que produce y c) por la protección eficaz contra la erosión (Ferrera y Alarcón, 2001).

En los andosoles, suelos característicos del Parque Nacional Izta-Popo, la población de actinomicetos puede ser mayor que la de bacterias, fenómeno que se ha detectado en suelos de Japón y México (Palacios *et al.*, en Gama *et al.*, 1999; Hasinur-Rahman *et al.*, 2008).

En los suelos forestales el insumo más significativo es la materia orgánica, en este caso la hojarasca, que contribuye a la acumulación de la materia orgánica en el suelo y que influye considerablemente en la capa mineral subyacente así como en la biota del suelo (Colli, 2015). En el parque la vegetación es un componente dependiente del relieve y el clima, a tal grado que la dominancia de cierto tipo de vegetación: a altitudes de 2900 a 3000 m se encuentran bosque de Abies, con suelos bien desarrollados, alto contenido de materia orgánica y textura migajón arenosa; bosque de pino de 3400 a 3800 m, en donde los suelos son de textura migajón arenosa, de color marrón oscuro a

negros y con bajo contenido de materia orgánica; a 4000 m se observan afloramientos rocosos, laderas con pendientes fuertes y suelos negros con textura arenosa (CONANP, 2015).

También se ha observado que ciertas especies de pastos en conjunto con el clima contribuyen con la aldosalización, neutralizando la acides del suelo e impidiendo la movilización de los complejos (Shoji *et al.*, 1993; Barois *et al.*, 1998).

4.2.5. El tiempo

Todos los factores de formación del suelo interactúan entre sí a mayor o menor intensidad dependiendo de las condiciones óptimas para el proceso de formación a lo largo del tiempo. Un suelo no solamente se forma, sino que también se desarrolla, y esto ocurre con el tiempo (Arias, 2001). Entonces el tiempo es un proceso pedogenético que se refiere a un periodo en el que alcanza un estado estático o de casi equilibrio con el ambiente de tal forma que produce propiedades pedogénicas perturbables con el tiempo (Serguey y Solleiro, 2011 en Jiménez, 2013).

El desarrollo de los suelos del PN depende de la edad del material parental, en general los suelos más jóvenes (450 años) se localizan cerca del Popocatepetl y los de mayor antigüedad en la zona norte del Iztaccíhuatl. Sin embargo, los continuos aportes de ceniza irrumpen los procesos de erosión y formación de suelos (Macías, 2015; CONANP, 2015).

4.3. Clasificación de suelos

Los suelos son tan complejos y diversos que se dice que no existen dos iguales ya que sus características superficiales e internas cambian a lo largo del paisaje. El suelo es uno de los recursos naturales más valiosos por lo que una sociedad debe saber: ¿Qué suelos se tienen?, ¿Dónde se tienen? y ¿En qué cantidad? para así poder aprovechar los recursos y la cartografía de mapas edafológicos es una herramienta insustituible para este propósito (Reyes, 2013).

La clasificación de suelos se refiere al hecho de agrupar en categorías o clases con un rango de propiedades similares ya sean químicas, físicas o biológicas, a unidades de suelo que pueden ser mapeadas y georreferenciadas (FAOa, 2015). Una clasificación científica elabora una síntesis de propiedades y relaciones, de forma que resulte más fácil recordarlas y transmitir las, así que el propósito de la clasificación del suelo es organizar el conocimiento que se tiene sobre estos para que sus propiedades puedan ser recordadas y sus relaciones sean entendidas, además la clasificación está ligada al propósito de ubicar su localización y la superficie que ocupa; y esto se

resume en plasmar la información en un mapa para utilizarla de manera más fácil a través de un sistema de información geográfica (Porta *et al.*, 2003).

Las primeras clasificaciones de suelo se basan en características individuales como la textura y los suelos se clasificaban como francos, arcillosos, arenosos; o en base al material parental. La primera clasificación moderna surgió a finales del siglo XIX encabezada por Dokuchaev, considerado el fundador de la edafología, se basa en características visibles y tiene tres niveles: suelos zonales, basados en las zonas climáticas, suelos intrazonales, basados en el predominio de un proceso formador en particular y suelos azonales, basados en el material parental. Sin embargo muchos países han desarrollado su propia clasificación, entre ellos: Canadá, Estado Unidos de Norteamérica, Rusia, Polonia, Japón, China, Brasil, Cuba. Esto gracias a que la complejidad de los suelos ha dificultado que se desarrolle una clasificación que contenga y satisfaga completamente el recurso suelo de todos los países (Duchaufour, 1984; Kang y Tripathi, 2015).

En las clasificaciones modernas los criterios básicos utilizados se pueden agrupar de la siguiente forma: a) el grado de desarrollo del perfil en relación con el grado de evolución, b) la alteración climática, ligada a la arcilogénesis, c) los movimientos de materia como los procesos de emigración los ciclos biogeoquímicos, el lavado de arcillas y el grado de saturación de bases, d) el edafoclima caracterizado por las variaciones estacionales de temperatura y el contenido de agua. Recientemente gracias al avance en la edafología se incluyen: a) el factor tiempo como un factor ecológico básico del ciclo de evolución del suelo y b) la acción integradora de la materia orgánica ya que desempeña un papel importante en la edafogénesis al condicionar la formación de complejos órgano-minerales de los que dependen todas las propiedades del suelo (Duchaufour, 1984).

4.3.1. Sistemas de clasificación de suelo

Un sistema de clasificación se puede basar en las propiedades o bien en la interpretación de como el suelo ha llegado a tener estas propiedades y características. Esta última llamada clasificación genética que es muy especulativa y subjetiva. Es por ello que muchos autores han optado por utilizar una clasificación de suelos basada en la morfología y composición del suelo (Porta *et al.*, 2003).

4.3.2. Soil Taxonomy

Es uno de los sistemas de clasificación más ampliamente utilizados que se caracteriza por ser flexible y estar abierta a modificaciones a medida que avanza el conocimiento sobre los suelos. Esta tiene como propósito su uso en campo, considera los principios genético-geográficos de la escuela rusa, se basa y agrupa suelos con génesis y propiedades similares, con presencia o ausencia de algún horizonte de diagnóstico y regímenes de humedad y temperatura. Se diseñó con propósitos prácticos de inventario de suelos. Esta clasificación maneja definiciones operacionales y un sistema jerárquico, a veces resulta inoperante para suelos tropicales o subtropicales (Reyes, 2013; Jiménez, 2013; Soil Survery Staff, 2014).

El esquema de clasificación consta de 6 niveles que son; orden, suborden, gran grupo, subgrupo, familia y serie; actualmente comprende 12 órdenes de suelo. Los criterios principales que utiliza este sistema para clasificar los suelos son: separar los suelos minerales de los orgánicos, utiliza horizontes y características de diagnóstico, régimen de humedad y régimen de temperatura (Porta *et al.*, 2003).

4.3.3. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB)

La WRB surge como un sistema de correlación de suelos y comunicación internacional de la Unión Internacional de Ciencias del Suelo (IUSS), derivada de la leyenda del Mapa Mundial de Suelos FAO-UNESCO de 1971 y 1988 (IUSS, 2014), pero actualmente es aceptada como la terminología oficialmente recomendada para nombrar y clasificar suelos por el comité de la unión internacional de las ciencias del suelo (ISSS). Se considera que la WRB es un sistema de clasificación comprensivo de dos niveles, que actualmente cuenta con 32 grupos de suelos que se identifican por medio de una clave (la base de referencia) y más de 120 calificadores definidos de forma única para las características específicas del suelo (sistema de clasificación WRB) (ISRIC, 2016). La combinación de los calificadores del grupo I y grupo II con una definición única, agregados al nombre de grupo mayor, permiten la caracterización y clasificación muy precisa de los perfiles de suelos individuales (Reyes, 2013).

Su principal objetivo es proporcionar profundidad y base científica a la leyenda revisada de FAO 1998, incorporando el conocimiento actualizado sobre el recurso suelo y sus interrelaciones

Según Porta *et al.* (2003) los principios en los que se basa la WRB son:

- El sistema se basa en propiedades de suelos definidas en términos de horizontes de diagnóstico y características que tienen en cuenta los procesos formadores.
- No aplica parámetros climatológicos para la determinación de suelos ni para la clasificación.
- Permite correlaciones con los sistemas de clasificación utilizados para cada país, facilitando la comunicación a nivel internacional.
- El primer nivel jerárquico es el grupo de suelos.
- El segundo nivel jerárquico es la unidad de suelos, definida por el empleo de un conjunto de prefijos calificadores, para tener en cuenta un proceso formador secundario y para reflejar variaciones espaciales y poder establecer relaciones dentro del paisaje.
- El tercer nivel jerárquico debe acomodarse a la diversidad local a nivel de país, para dar mayor énfasis a los rasgos del suelo que sean importantes para el uso y manejo del suelo.
- La nomenclatura utilizada para cada grupo retiene la nomenclatura tradicional e introduce términos fáciles para el lenguaje común.

4.4. Levantamiento de suelos

Jaramillo (2002) se refiere al levantamiento de suelos como el conjunto de investigaciones necesarias para caracterizar, clasificar, delimitar y representar en un mapa, los diferentes suelos de una región, para luego interpretar la aptitud que tienen para un uso determinado y predecir su comportamiento y productividad bajo diferentes sistemas de manejo.

El levantamiento de suelos según la USDA describe las características de los suelos en un área específica, clasifica los suelos de acuerdo a un sistema de clasificación estándar, plotea los límites de los suelos en un mapa y hace predicciones acerca del comportamiento de los suelos. Además la información colectada en el levantamiento de suelos ayuda en el desarrollo de planes de uso de la tierra y evalúa y predice el efecto del uso de la tierra en el medio ambiente (Rossiter, 2004).

Para Rossiter (2004) el levantamiento de suelos o más propiamente el inventario del recurso suelo, es el proceso por el cual se determina el patrón de cobertura del suelo, caracterizándolo y presentándolo de forma entendible e interpretable para varios clientes. Sin importar la definición que tomemos, la meta de un levantamiento de suelos es mostrar la distribución geográfica de los suelos. Pero las diferencias se encuentran en el objetivo del levantamiento y de ahí los métodos. Según Rossiter (2004) y Vargas (2004 en Romero, 2010) se puede distinguir:

1. Levantamientos de suelo con carácter simple: Es un levantamiento que responde a una necesidad muy específica, como por ejemplo un mapa de salinidad y otro de capacidad de infiltración, ambos dentro de un proyecto de riego. En este caso se estudia una característica específica del suelo, la que es medida y lo que se mapea son los límites entre clases predefinidas de estas características.
2. Levantamiento de suelos con propósito especial. Este tipo de levantamiento responde a un objetivo simple y bien definido, por ejemplo el levantamiento para identificar zonas con aptitud al riego. Otro ejemplo es la planificación con fines de conservación de un área, donde el objetivo es asignar prácticas correctas de conservación a cada área.
3. Levantamiento con propósitos generales. Estos son los que proveen las bases para una variedad de interpretaciones de varios tipos de usos presentes y futuros. La ventaja es que el levantamiento puede ser reutilizado cuantas veces sea necesario con varios propósitos, asumiendo que el levantamiento tiene una correcta estratificación del paisaje. Los estratos pueden ser remuestreados posteriormente para identificar características que no fueron estudiadas en la primera fase.

4.5. Métodos de muestreo de suelos para clasificación

Según la FAOb (2015) el muestro de suelos para un levantamiento puede hacerse siguiendo tres métodos: el método de la calicata, el método de la barrena de sondeo y el método del tubo de paredes delgadas (Figura 5).

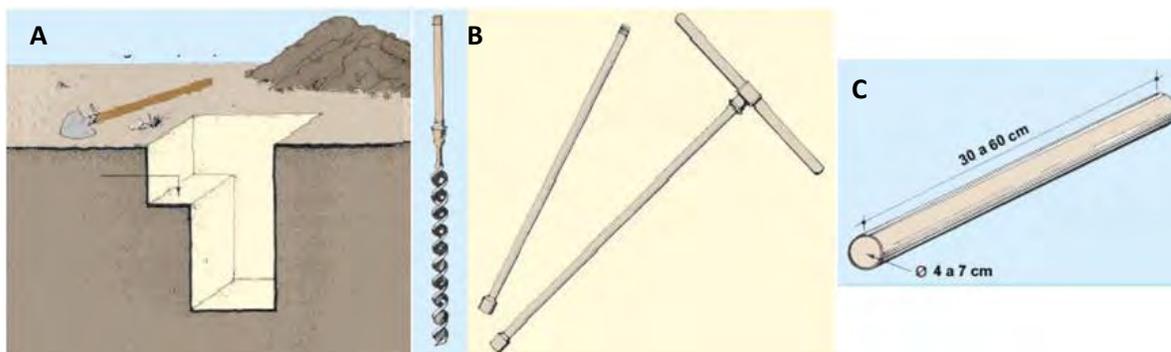


Figura 5: Métodos de muestreo de suelos: A) método de la calicata, B) método de la barra de sondeo y C) método del tubo de paredes delgadas (FAO, 2015).

El método de la calicata: Es el único medio disponible que realmente permite ver y examinar un perfil de suelo en su estado natural. Puede excavar a mano o con equipos especiales, como una

excavadora de zanjas. De ser necesario, podrá obtener muestras no alteradas de horizontes seleccionados de una calicata.

Método de la barrena de sondeo: Es un modo para obtener muestras de suelo de distintas profundidades mediante la perforación, sin tener que excavar una calicata. Con este método se puede tornar una serie continua de muestras de suelo y así juntar un testigo de perforación que muestre los horizontes del suelo. El método de la barrena de sondeo es barato y rápido; le permite revisar el suelo en varios lugares de su terreno, aunque sólo proporciona muestras alteradas. La barrena de sondeo puede utilizarse en la mayoría de los suelos que cubren la capa freática y en los suelos cohesivos que están debajo de ésta.

Método del tubo de paredes delgadas: Con este método se utiliza un tubo o conducto liviano abierto por ambos extremos. Se introduce en el suelo para obtener una muestra y luego se extrae de la cavidad. Si el método se aplica correctamente, se obtienen muestras no alteradas. Se pueden fabricar los tubos estándar de paredes delgadas de 30 a 60 cm de longitud y de 4 a 7 cm de diámetro con recortes de tuberías de acero de paredes de calibre N° 16 (1,6 mm) o N° 18 (1,25 mm).

5. JUSTIFICACIÓN

En los ecosistemas ribereños tanto del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (PN-IP) como de sus zonas de influencia, los suelos proporcionan una gran variedad de funciones ecológicas y al mismo tiempo se encuentran entre los más vulnerables a la degradación por el uso intensivo e indiscriminado de las áreas de ribera. A medida que estos suelos se enfrentan al cambio de uso de suelo, la degradación e incluso el cambio climático es vital entender sus características y su distribución, sobre todo para cuestiones de manejo del suelo y la utilización sostenible de la tierra.

Los estudios de caracterización y clasificación de suelos aplicados como método científico son un instrumento importante para realizar planeamientos más adecuados del manejo del recurso suelo, ya que proporcionan información sobre sus propiedades y su uso potencial para determinados propósitos. Aunque existen importantes estudios edafológicos dentro del Parque Nacional Izta-Popo, son pocos los trabajos enfocados a la clasificación de los suelos de ecosistemas ribereños de alta montaña. Es por ello que el estudio de los suelos ribereños de montaña es una de las tareas prioritarias pendiente.

6. HIPÓTESIS

No obstante que provienen de materiales parentales similares los suelos ribereños, de un sistema fluvial permanente del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia, presentan diferencias en sus características de diagnóstico útiles para su clasificación dadas las variaciones altitudinales y topográficas que se presentan a lo largo de un gradiente altitudinal entre 4000 m (origen del sistema fluvial) hasta las zonas de uso de suelo urbano en los valles altos de Puebla cerca de los 2200 m s.n.m.

7. OBJETIVOS

7.1. Objetivo general

Caracterizar y clasificar los suelos de ambientes ribereños a lo largo de un sistema fluvial permanente del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y la zona de influencia, orientada hacia los valles altos de Puebla, utilizando el sistema de la Base Mundial Referencial del recurso suelo (WRB) y elaborar un mapa edafológico, para proponer estrategias de manejo y conservación de suelos ribereños.

7.2. Objetivos específicos

- Hacer la descripción morfológica de los perfiles de suelo ribereño en campo en un gradiente altitudinal.
- Realizar la caracterización física y química de los suelos ribereños.
- Clasificar los suelos ribereños de acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo.
- Identificar y proponer las potencialidades de los suelos en ambientes ribereños.

8. ÀREA DE ESTUDIO

8.1.Ubicación

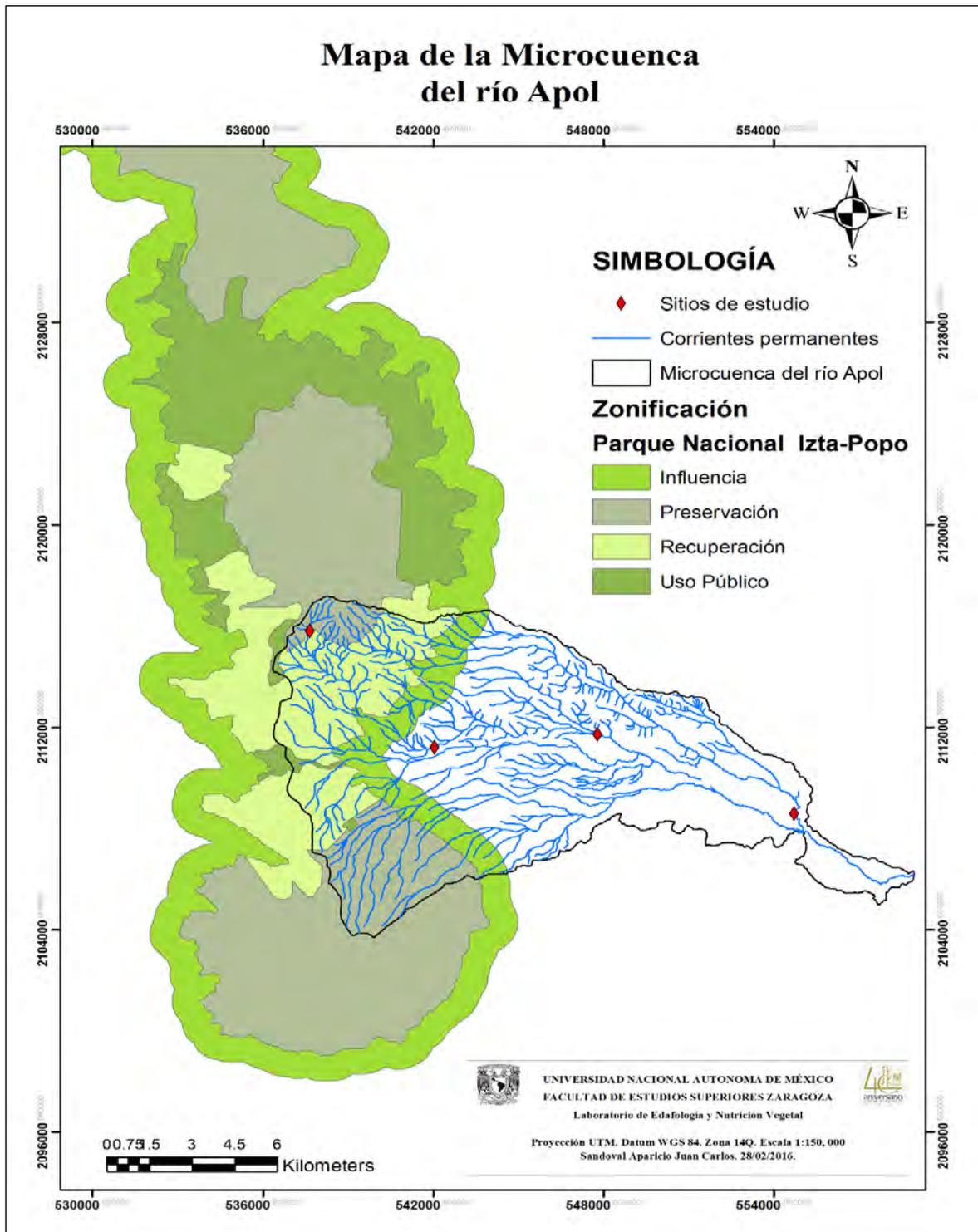


Figura 6: Ubicación del área de estudio. La Microcuenca del río Apol converge en la parte alta con el polígono del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl.

La microcuenca del río Apol está ubicada dentro de la subcuenca del río Nexapa (RH18Ae) en las coordenadas extremas 19°06'19.37634" N, 98°39'12.48825" W y 19°02'44.67638" N, 98°26'29.56032" W. abarca los municipios de San Nicolás de los Ranchos, Calpan, Nealtican y Tianguismanalco en el estado de Puebla, y partes de Atlautla y Amecameca en el Estado de México (Figura 6). Sus geoformas (sierra, conos volcánicos y laderas) son de origen volcánico, predominando rocas basálticas y andesíticas. El cauce principal tiene una longitud de 30457 m, una elevación máxima de 4610 m y una mínima de 2241 m, y drena un área de 155.13 km² (SIATL, 2016).

Al encontrarse dentro de un Área Natural Protegida, tiene un papel estratégico como un área de conservación de recursos ya que es una importante reserva hidrológica y forestal, que juega un papel clave en la captación de dióxido de carbono, la producción de oxígeno y la regulación climática y está catalogada como un área de conservación de flora y fauna por la riqueza de sus ecosistemas (CONANP, 2015; Hernández y Granados-Sánchez, 2006).

8.2. Suelos

El material parental de los suelos está compuesto por rocas ígneas extrusivas de pómez, por la acumulación de cenizas volcánicas de diferentes etapas de actividad volcánica y por sedimentos de origen volcánico. La múltiple superposición de capas de tefras (pómez) y cenizas, además de los efectos del intemperismo hídrico y eólico y del clima, ejercen efectos diferenciales sobre los procesos de formación de los suelos característicos de esta región que son los andosoles (Figura 7), los cuales debido a su composición y a la acción combinada de estos factores pueden ser vítricos, húmicos, mólicos y ócricos (CONANP, 2015).

De acuerdo con la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), las unidades de suelo presentes en el Parque Nacional y su zona de influencia son:

Litosoles. Suelos someros, con menos de 0.1 metros de espesor, formados sobre tepetates y que conservan las características del material parental. Aunque esos suelos pueden estar asociados con regosoles y andosoles en ciertas áreas muy restringidas, generalmente son poco desarrollados debido a la velocidad de percolación del agua que impide el establecimiento de algún tipo de

vegetación, lo que aunado al clima presente a altitudes mayores de 4 mil metros sobre el nivel del mar dificulta el desarrollo del suelo.

Regosoles. Del griego *rhegos*, manto. Son suelos formados a partir de material suelto como arena, grava o piedra; en el parque se localizan a altitudes por debajo de los 3 mil 900 metros sobre el nivel del mar y normalmente son pobres en contenido de materia orgánica y nutrientes.

Andosoles. Del japonés *an*, oscuro y *do*, suelo. Se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes, un alto contenido de materia orgánica; y la proporción de vidrios volcánicos presentes, pueden formar andosoles húmicos que se presentan en áreas forestales poco alteradas; también pueden formar andosoles vítricos en zonas con vegetación de coníferas cuando presentan más del 60 por ciento de vidrios, ceniza volcánica y texturas gruesas.

Cambisoles. Del latín *cambiare*, cambiar. Son suelos mejor desarrollados, con horizontes A y B bien definidos, pero pobres en contenido de nutrientes; presentan potencial para el desarrollo forestal con adecuadas prácticas de manejo para la conservación de suelo y captación de humedad.

Fluvisoles. Del latín *fluvius*, río. Son suelos formados en cañadas, escurrimientos y zonas de depósitos de material reciente; de textura gruesa, su fertilidad es baja debido al escaso contenido de nutrientes.



Figura 7: Andosol, suelo característico de la región del Parque Nacional Izta-Popo, donde se muestran diferentes depósitos de pómez de las últimas erupciones del Popocatepetl.

8.3. Clima

Debido a su topografía y ubicación, la zona de estudio tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío. El cambio del gradiente térmico en el oscila de -0.56 C a -0.68 ° C por cada 100 m de altitud, por lo cual se asume que el gradiente térmico varía en las diferentes laderas de la Sierra Nevada por condiciones locales de topografía, orientación y microclima de cada una. La precipitación anual oscila entre 800 y 1200 mm, se presenta en diversas formas: nieve, lluvia, aguanieve y granizo. Generalmente las tormentas se producen en el este y son dirigidas por los vientos hacia el oeste. En la estación húmeda, los volcanes son afectados por los vientos alisios del noreste y los ciclones tropicales, y en la seca por los vientos altos del oeste. Las lluvias ocasionales de invierno son generadas por los nortes del Golfo de México.

La precipitación alcanza su valor máximo (1200 mm) alrededor de la cota de 3600 m, a partir de la cual, tiende a decrecer, fenómeno conocido como: techo de nubosidad situado alrededor de los 3600 en montañas mayores a 4000 (CONANP, 2015).

8.4. Vegetación.

La Sierra Nevada es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país, dentro de los límites del parque y en los confines de su área de influencia es posible apreciar cuatro grandes franjas altitudinales (Figura 8).

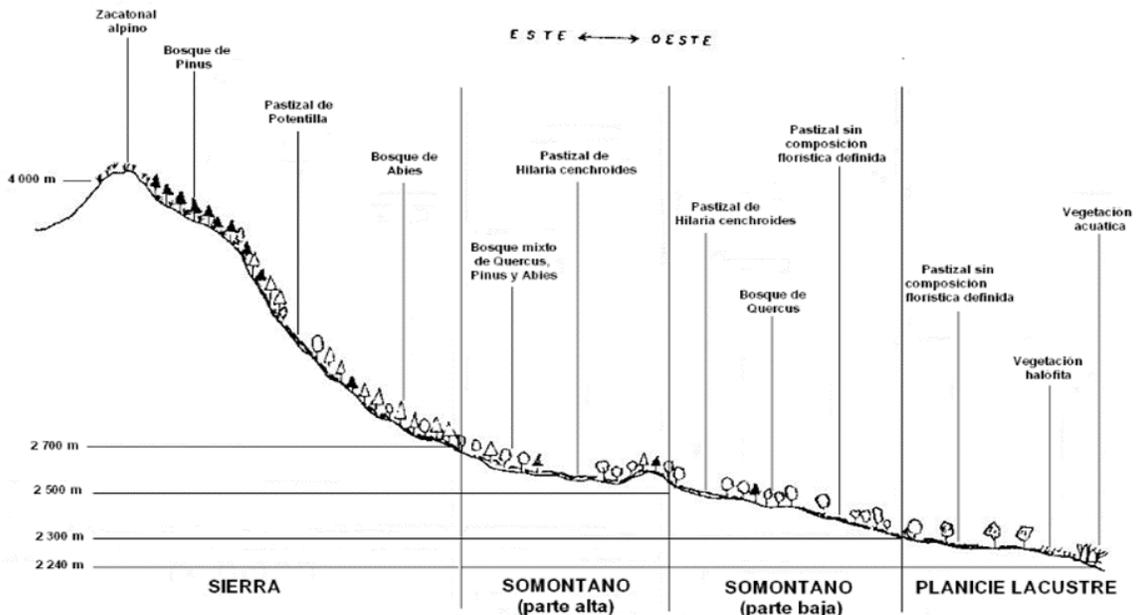


Figura 8: Esquema de las franjas ecológicas y su vegetación característica (tomado de Hernández y Granados, 2006).

Hasta los 3,100 m de altitud se encuentran asociaciones dominadas por *Pinus montezumae*, con especies de los géneros *Quercus*, *Abies*, *Arbutus*, *Alnus*, *Salix* y *Buddleia*. También se encuentran ecotonos de *Pinus ayacuhte* con *Abies religiosa* y *Pinus montezumae* con *Pinus hartwegii*. En estos bosques el dosel no es muy cerrado, por lo que pueden desarrollarse diversas herbáceas. En las partes más elevadas y abruptas a 3600 m se establece *P. hartwegii*. Mientras que *A. religiosa* posee un rango altitudinal entre 2400 y 3500 m. Las asociaciones de bosques de encino son complejas, de los 2400 a los 3100 m se hallan agrupaciones de *Q. laurina* con *Q. crassifolia*, *Q. rugosa*, *Abies*, *Arbutus*, *Juniperus* y *Pinus*. No obstante la vegetación también sigue un patrón horizontal determinado por la topografía, microclima y propiedades del suelo (CONANP, 2015).

El fuego y pastoreo constituyen los principales factores causantes de la alteración de las comunidades vegetales alpinas. Conforme incrementa la altitud disminuye el número de estratos, la riqueza, la talla y la cobertura de la vegetación.

9. MÉTODOS

9.1. Recopilación y adecuación de información cartográfica

La metodología empleada para la ubicación de los sitios, consistió en la recopilación, adecuación, manejo y extracción selectiva de información e integración de base de datos, que fueron necesarias para modelar la información bajo el ambiente de un sistema de información geográfica (SIG).

En esta actividad se recopiló información cartográfica disponible de la zona, analógica (en papel) o en formato digital, misma que se editó para poder ser ingresada al SIG. La zona de estudio se encuentra en la carta, con clave E14B42, y se utilizaron las cartas temáticas de vegetación y uso de suelo, edafología, geología y topografía, así como el modelo de elevación digital (MED), en escala 1:50,000, material elaborado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

Una vez generada la información, se trabajó en formato vector y raster, el cual permite aprovechar las ventajas de despliegue de polígonos, líneas y puntos; así como la flexibilidad de sobreposición de capas y su análisis. Con la información en un mismo formato, se depuró para crear la topología y se delimitó el área de estudio. Para la presente investigación se utilizó la cuenca del Alto Balsas.

Se utilizaron las cartas hidrográfica 1: 50,000 (RH18Ae) del SIATL para ubicar las principales corrientes de agua permanentes y posteriormente se seleccionaron cuatro sitios al este del Iztaccíhuatl pertenecientes a la cuenca del Alto Balsas, con diferente altitud, tipo de vegetación y uso de suelo, aledaños a una corriente de agua permanente (Cuadro 1).

Cuadro 1: Ubicación de los sitios de estudio

Perfil	Sitio	Altitud	Longitud	Latitud
			m	
1	Joyita “La ranita”	3961	537650	2115807
2	Buenvista	3300	542037	2111204
3	Xalitzintla	2678	547792	2111726
4	San Nicolás	2419	554726	2108585

9.2. Campo

En campo se verificaron los puntos y se les asignó una clave. Se realizó la caracterización ecológica de cada sitio (Figura 9) registrando las coordenadas geográficas, la altitud, el porcentaje de humedad ambiental, temperatura ambiente, exposición y pendiente, se describió la vegetación dominante y los estratos vegetales presentes además del material geológico predominante (Cruz-Flores y Guerra-Hernández, 2014).

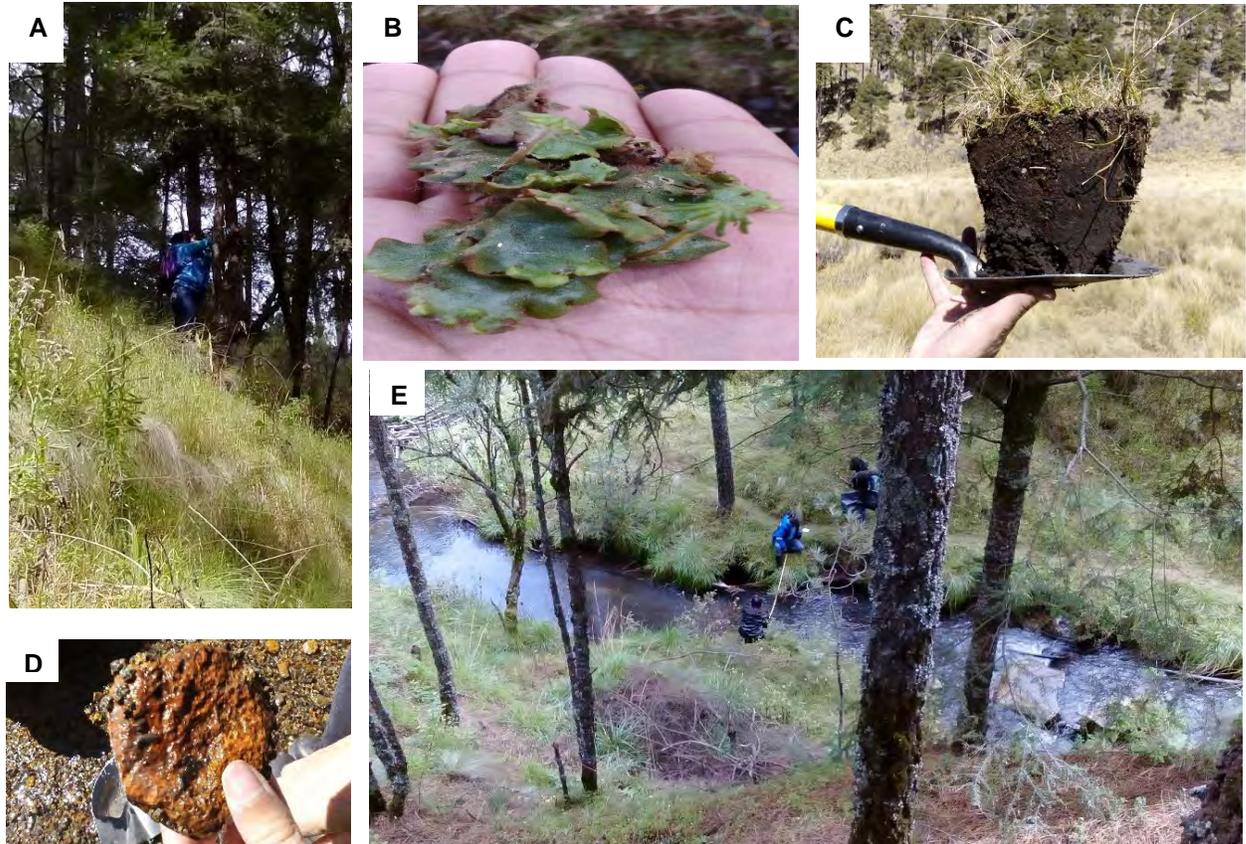


Figura 9: caracterización ecología de sistemas ribereños A) mediación de altura y diámetro (DAP) de árboles, B) identificación de plantas presentes en el cauce, C) caracterización de suelo ribereño, D) material arrastrado por el arroyo, E) determinación del ancho del cauce y perfil batimétrico.

En cada sitio se realizó la apertura de un perfil de un metro de profundidad por un metro de ancho en una zona representativa del sistema ribereño. Posteriormente se realizó la descripción morfológica con base en los manuales de Cuanalo (1981) y Siebe *et al.* (2006), de la siguiente manera: se anotó el número del perfil, quien lo describe, fecha, localización, localidad, elevación, relieve, drenaje superficial, flora y fauna; y de cada uno de los horizontes: color, límites, espesor, humedad, textura, pedregosidad, estructura, consistencia, concentraciones e inclusiones de origen

pedogenético (estratos endurecidos, cutanes y nódulos), poros permeabilidad, raíces, fauna, reacción del suelo y drenaje del perfil. (Figura 10). La toma de muestras de cada horizonte se realizó de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, estas fueron colocadas en bolsas de plástico y etiquetadas.

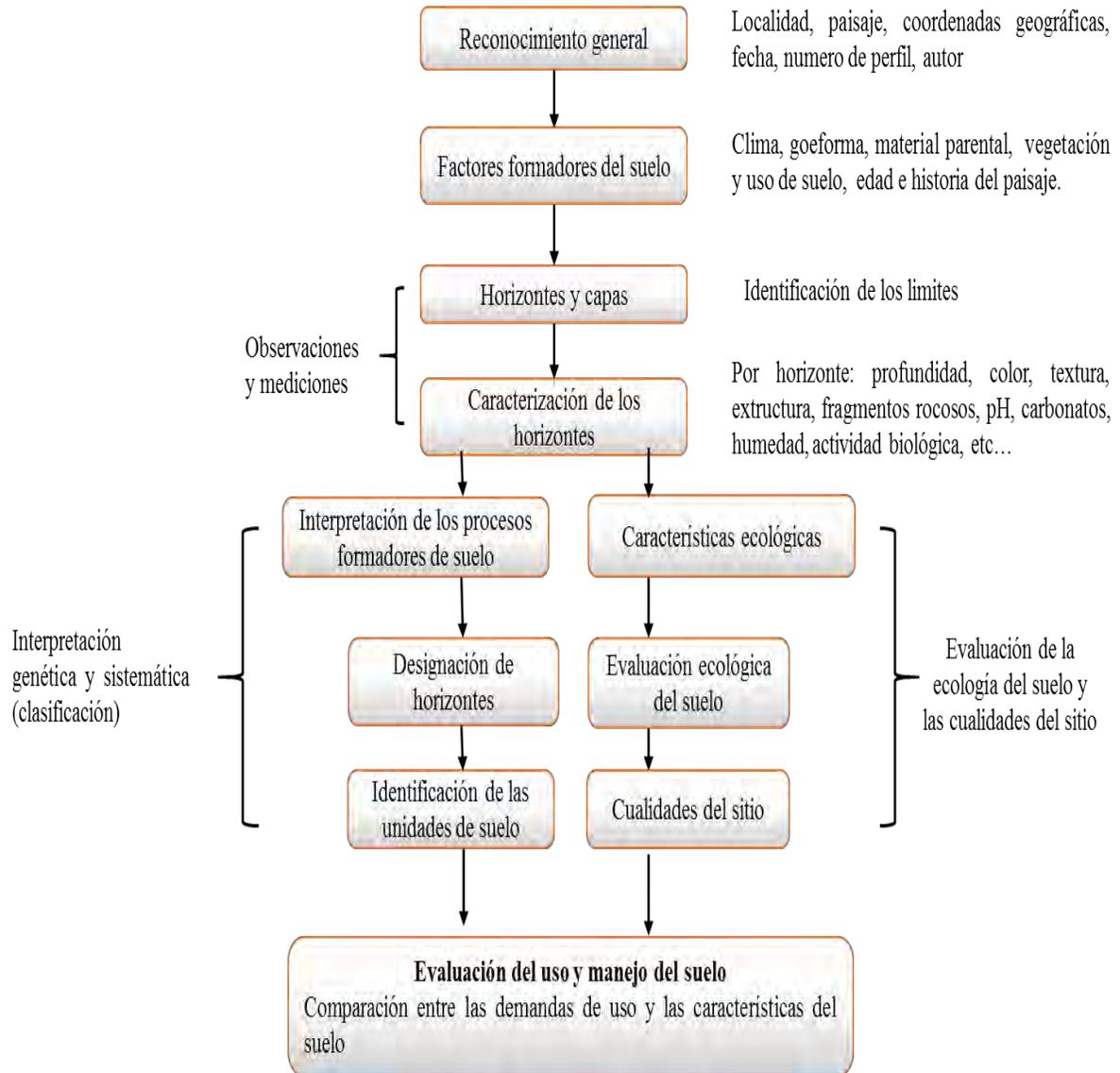


Figura 10: Diagrama para la descripción del suelo, calidad del sitio y evaluación de su aptitud (FAO, 2009; Siebe *et al.*, 2006).

El suelo ribereño se caracterizó por medio de barrenaciones en un transecto de 30 m a lo largo del río y a distancias de 1, 3 y 5 m en ambos márgenes (Figura 11) en donde se reconocieron *in situ* horizontes y se realizaron pruebas de campo como color, textura, aluminio activo, materia orgánica

y carbonatos presentes. Se usaron las muestras de la barrena para formar muestras compuestas de las amplitudes de 1, 3 y 5 m a ambos lados del río (umbría y solana), también se tomaron muestras para densidad aparente mediante el método del cilindro de volumen conocido.

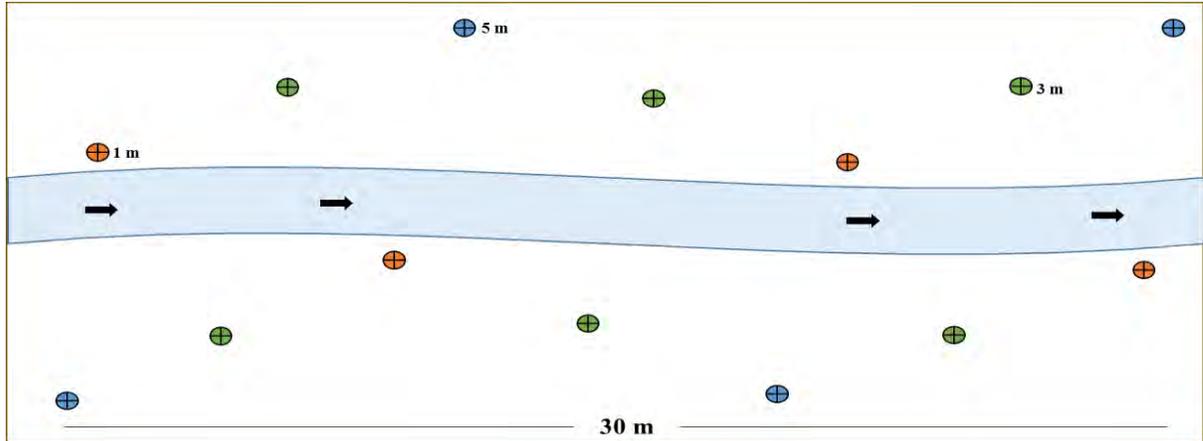


Figura 11: Esquema de las barrenaciones en el suelo ribereño en un transecto de 30 m lo largo del río, a una distancia del cauce de 1, 3 y 5 metros.

9.3. Laboratorio

Las muestras fueron secadas al aire a temperatura ambiente, tamizadas con una malla de 2 mm de abertura y guardadas en frascos de plástico. Los análisis químicos y físicos (Cuadro 2) de las muestras se realizaron en el Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal de la FES Zaragoza, para cada parámetro se realizaron tres repeticiones (Figura 12).

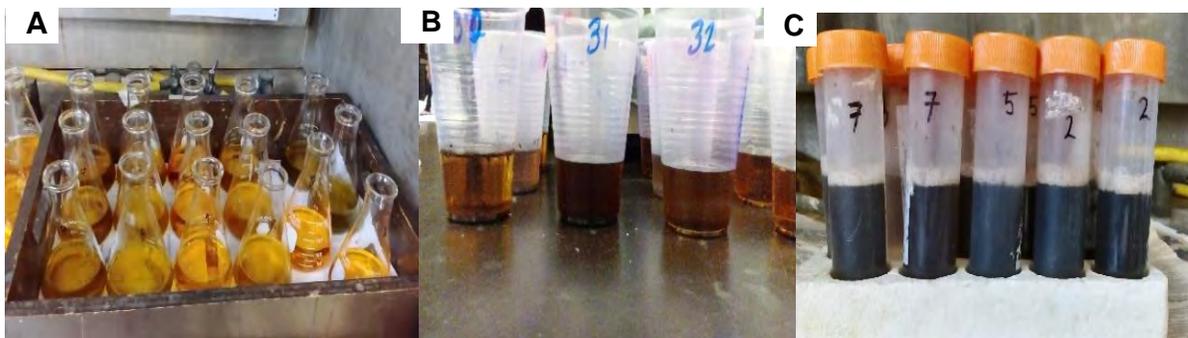


Figura 12: Trabajo de laboratorio A) Materia orgánica, B) pH en NaF, C) índice melánico).

Los suelos fueron clasificados de acuerdo a los lineamientos de la IUSS grupo de trabajo WRB (2015). Los criterios utilizados para la elaboración del mapa edafológico a través del SIG, fueron: tipo de vegetación, altitud y pendiente.

Cuadro 2: Métodos utilizados en el análisis físico y químico de las muestras de suelo.

Parámetro	Método
pH activo	Potenciométrico (relación 1:2.5) (Black, 1965 en Reeuwijk, 2002)
Conductividad eléctrica	En agua destilada (Relación 1:5)
pH potencial	Potenciométrico (relación 1:2.5 en CaCl_2 0.01 M) (AS-23, NOM-21-RECNAT, 2000)
pH en NaF	Potenciométrico (relación 1:50 en NaF 1 M) (Fieldes y Perrott, 1966 en Reeuwijk, 2002)
Color	Comparación con Tablas Munsell (en seco y húmedo) (MUNSELL, 1990)
Densidad real	Del picnómetro (Gavande, 1979)
Densidad aparente	Del cilindro (SAMLA, 1996)
Espacio poroso	$E.P. = (1 - \text{Densidad aparente} / \text{densidad real}) \times 100$
Textura	Bouyoucos (1963)
Materia orgánica, carbono orgánico	Walkley y Black (1934 en Reeuwijk, 2002)
Índice melánico	Extracción de Ácidos húmicos y fulvicos (Reeuwijk, 2002)
Humedad del suelo	Por gravimetría
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Del Versenato (Jackson, 1982)
Retención de fósforo	De Blakemore (Reeuwijk, 2002)
Fósforo soluble en ácido cítrico	Ácido cítrico al 1 % (Reeuwijk, 2002)

9.4. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con el programa SAS (Statistical Analysis System) mediante correlaciones simples entre las propiedades químicas y físicas del suelo. Mientras que para evaluar los efectos de la altitud, la pendiente, y el espesor de horizonte (Ah) se utilizó un análisis de varianza (modelo lineal generalizado) y pruebas de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$).

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Numerosos estudios edafológicos de las zonas volcánicas de México muestran que la distribución de los suelos se relacionan estrechamente con el tipo y edad del material parental, el clima, la vegetación, diferencias debidas a la erosión (grado y tipo de erosión), y el tiempo de desarrollo (Montero, 2002). En este estudio se encontró que hay una alta correlación ($p \leq 0.05$) entre los pisos altitudinales y las propiedades físicas y químicas de los suelos ribereños, así como el tipo de suelo y el grado de desarrollo (Anexo 1). Cada sitio de estudio varió principalmente en la topografía local (relieve y pendiente), el tipo de vegetación dominante, clima (temperatura y precipitación) e incluso hay variaciones en el tipo de material parental y su grado de intemperismo, lo que origina suelos con diferencias notables en el desarrollo de los perfiles edáficos.

Con base en la distribución de suelos propuesta por Miehlich (1980) se sabe que los principales suelos presentes en los sitios de estudio corresponden a **B2** (Andosol vítrico-andosol húmico) y **C1** (Andosol vítrico), mientras que para el sitio con menor altitud (2400 m) no hay un grupo de suelo reportado en el sistema de Miehlich (Figura 13; Cuadro 3). De acuerdo con el tiempo necesario para su formación, en el PNIP se tienen suelos jóvenes (450 años) en las cercanías del Popocatepetl y suelos con mayor antigüedad en la zona norte del Iztaccíhuatl.

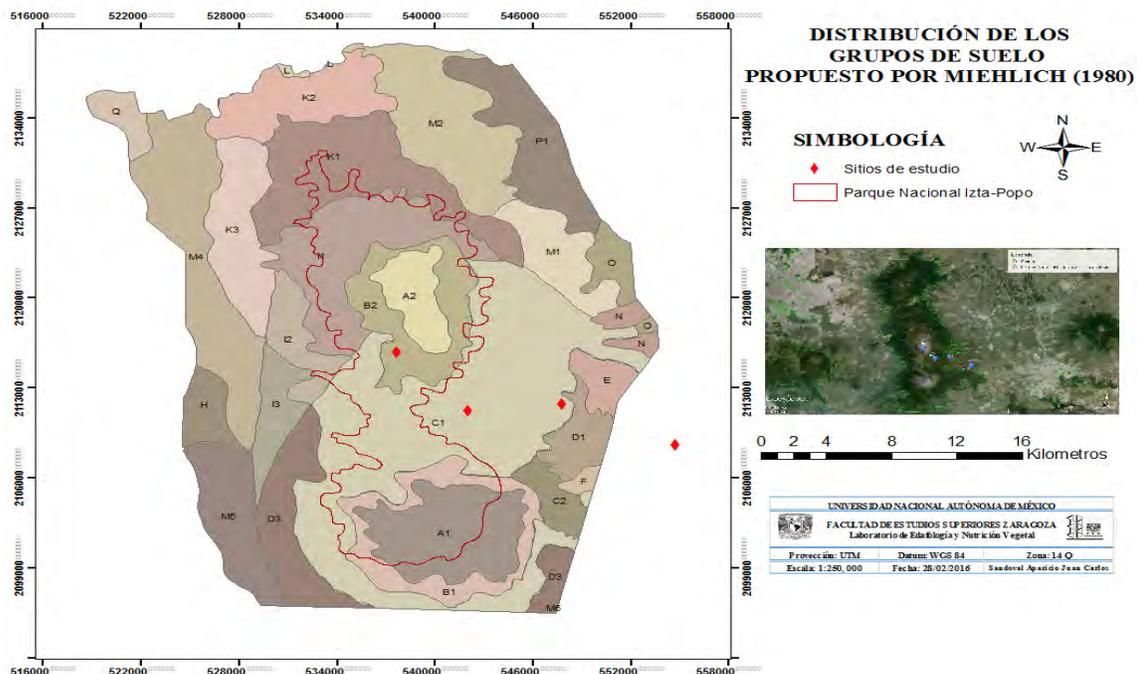


Figura 13: Distribución de suelos reportada por Miehlich (1980). Los símbolos rojos indican los sitios en donde se realizaron los perfiles de suelo, las letras simbolizan la unidad de suelo.

Cuadro 3: Equivalencia en la WRB de los grupos de suelo reportados por Miehlich (1980) para la zona del Parque Nacional Izta-Popo.

Unidad	Clasificación de acuerdo a Miehlich		Superficie ha
	Suelos dominantes	Suelos acompañantes	
A1	Regosol dístico-Leptosol	Andosol vítrico	5967.77
A2	Leptosol-Regosol dístico	Andosol vítrico	2326.77
B1	Andosol vítrico	Regosol dístico-Leptosol	3898.40
B2	Andosol vítrico-Andosol húmico	Regosol dístico-Leptosol	4335.40
C1	Andosol vítrico	Fluvisol-Andosol húmico-Andosol vítrico	22612.16
C2	Andosol vítrico	Andosol vítrico-Leptosol	1321.17
D1	Andosol vítrico	Fluvisol	1835.19
D3	Andosol vítrico	Fluvisol	4715.12
E	Regosol eútrico-Cambisol eútrico	Andosol vítrico-Fluvisol	1218.68
F	Leptosol-Andosol vítrico	Fluvisol	334.21
H	Cambisol eútrico-Regosol eútrico	Fluvisol	1494.82
I1	Andosol húmico-Cambisol dístico	Leptosol	6847.74
I2	Andosol húmico-Cambisol dístico	Andosol vítrico	2228.06
I3	Andosol húmico-Andosol húmico/ótrico	Andosol vítrico	2071.16

Por el amplio intervalo altitudinal (2400-4000 m \approx) con el que se trabajó, los sitios de estudio difieren en aspectos como el uso de suelo, régimen climático, microclimas, topografía local, el microrelieve y tipo de vegetación (Cuadro 4). El clima va de templado húmedo a altitudes de 2000-3000 m hasta climas fríos y muy fríos en altitudes mayores a los 3000 m (CONANP, 2015), es un factor de gran importancia para los ecosistemas ribereños pues es una de las fuerzas directrices que promueven los procesos que causan cambios en los suelos o en los ecosistemas durante el curso de la pedogénesis (Gama *et al.*, 1999) e influye directamente en la temperatura y humedad presentes en cada uno de los sitios. Según los datos del INEGI (2015) los regímenes de humedad del suelo en los sitios de estudio son en altitud descendente: ácuico (365 días de humedad) para la joyita “La ranita” (LR), údico (270 a 330 días de humedad) en Buenavista (Bv) y ustíco (180 a 270 días de humedad) para Xalitzintla (Xl) y San Nicolás (SN).

En la figura 14 se presenta un perfil altitudinal y la topografía o relieve que sigue el cauce principal a lo largo de la microcuenca, el microrelieve tiene una influencia considerable en la formación del

suelo ribereño, pues algunos atributos del suelo están estrechamente correlacionados ($p \leq 0.05$) con la naturaleza del relieve ya que principalmente modifica la orientación del flujo de agua dentro del suelo, estas propiedades del suelo son: a) profundidad del suelo, b) espesor del horizonte A y contenido de materia orgánica, c) humedad relativa del perfil, d) grado de diferenciación de horizontes, e) temperatura del suelo y características del material parental. Esta influencia del relieve sobre las propiedades del suelo está bien documentada (Duchaufour, 1984; Jaramillo, 2002) y coincide con lo reportado por Peña (2013) y Gama *et al.* (1999), pues mencionan que en las zonas volcánicas del territorio nacional casi todos los cambios en las unidades de suelo, en distancias cortas, están relacionadas con el factor topográfico.

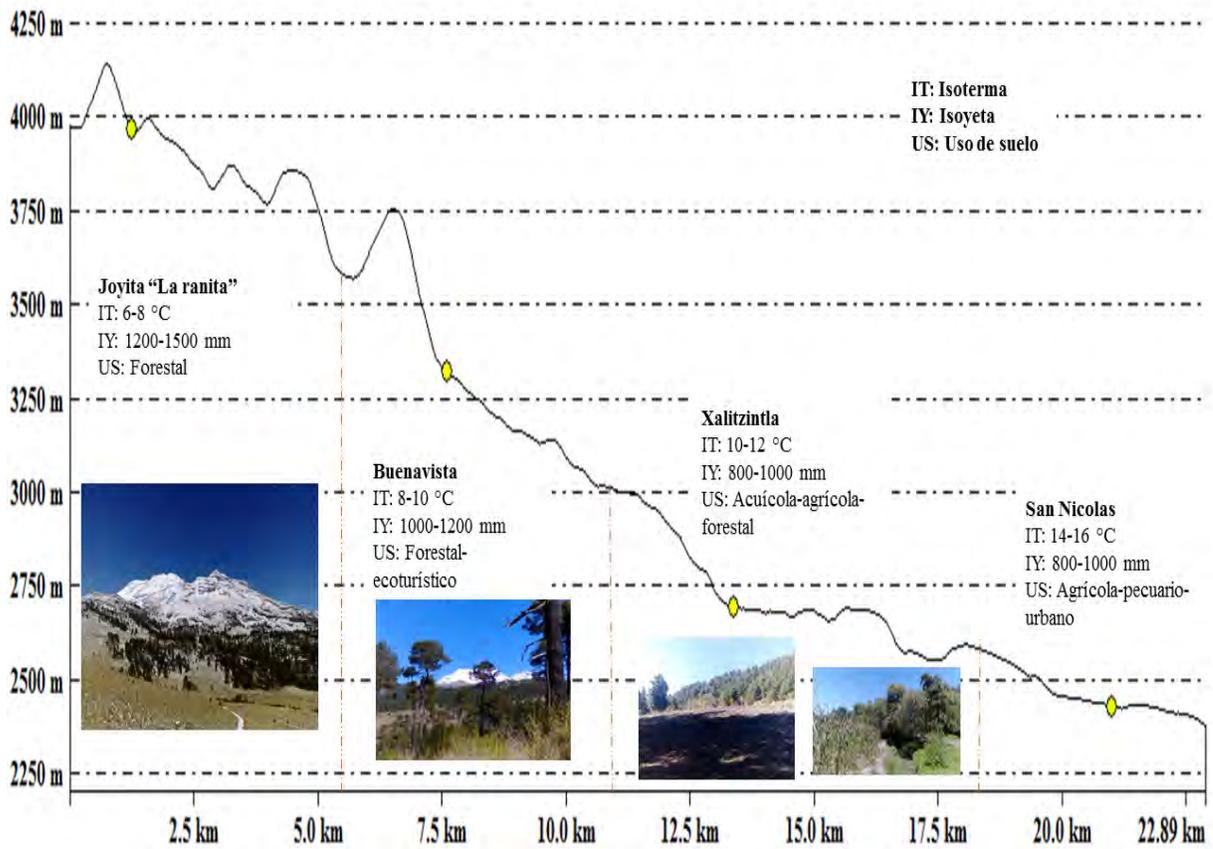


Figura 14: Perfil altitudinal y condiciones climáticas de los sitios de estudio (elaborado con Global Mapper v15.0, datos climáticos INEGI, 2015).

Resulta congruente que en los sistemas ribereños del PNIP y su zona de influencia el relieve influya fuertemente en otros factores formadores del suelo, pues el gradiente altitudinal está asociado con

los cambios en las variables climáticas y la asociación de estos factores afecta la estructura y composición de la vegetación ribereña y por lo tanto el desarrollo del suelo. Además se ha observado que el establecimiento de la vegetación ribereña está determinado por factores topográficos y edáficos como la pendiente, la exposición de ladera, la profundidad de suelo, su porcentaje de humedad y su capacidad de infiltración (Colli, 2015).

10.1. Descripción de los sitios de estudio y perfiles de suelo

10.1.1. Perfil 1: Joyita “La Ranita”

Corresponde al sitio más alto, a 3996 m en las coordenadas 537650 m W y 2115807 m N. localizado dentro del polígono del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (Figura 6), donde el uso del suelo tiene un fin ecológico, principalmente: provisión de agua, captura de carbono, regulación del clima, generación de oxígeno, asimilación de contaminantes, protección de la biodiversidad, protección del suelo, refugio de fauna silvestre y belleza escénica (Colli, 2015; CONANP, 2015). El sitio es un micro valle de relieve cóncavo-convexo y pendiente de 2 a 5 % ligeramente ondulado con exposición sureste, rodeado de colinas con pendientes de 15 a 30 % escarpadas (Figura 15). La temperatura ambiental fue de 8 °C con una humedad de 37.4 %.



Figura 15: Vista panorámica del sitio donde se muestran la dominancia de gramíneas en el valle y pinos en las laderas, el suelo ribereño recibe aportes de materiales del arroyo y las laderas.

El suelo en el valle está protegido por una densa vegetación compuesta por gramíneas amacolladas *Muhlenbergia* sp. y *Festuca* sp, también se encuentran *Cirsium* sp. y *Lupinus montanus*, mientras que las colinas adyacente están cubiertas por *P. hartwegii* achaparrados (altura no mayor de 20 m.). El arroyo es una corriente de agua permanente que aumenta su volumen con las lluvias, tiene un ancho promedio de un metro y una profundidad de entre 6 y 12 cm, la velocidad de la corriente fue de 0.63 m/s y el gasto de corriente de 133.87 l/s. la temperatura del agua fue de 6.6 °C y el pH observado fue de 7.1.

El suelo se clasificó como **Andosol vítrico úmbrico (dístico, tixotrópico, endoarénico)** y se ha formado a partir de depósitos de caída de pómez de 5000 años, lo que se deduce a partir del mapa de distribución de ceniza y pómez propuesto por Arana *et al* (2010) (Figura 16), y la columna

estratigráfica propuesta por Macías (2015) El depósito de pómez ocre cumple con las características descritas por Arana *et al* (2010), color gris anaranjado (10YR 7/4) en las muestras inalteradas y un color naranja amarillento pálido (10YR 8/6) en muestras alteradas, señala también que este depósito se caracteriza por una alta vesicularidad (de cm a μ de diámetro) y tienen una textura porfídica con plagioclasa, piroxeno, y fenocristales de olivino y minerales opacos embebidos en una matriz vítrea.

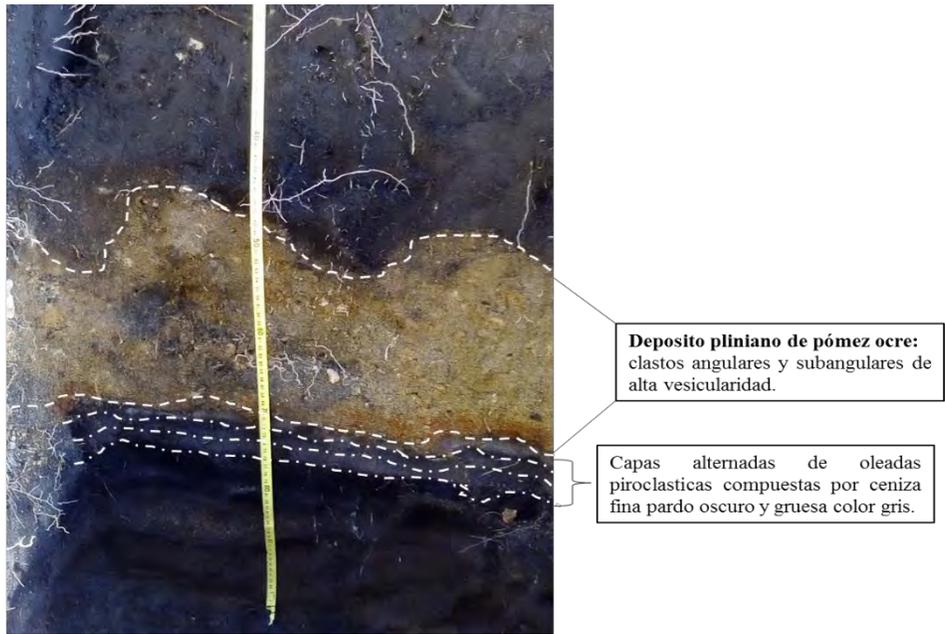
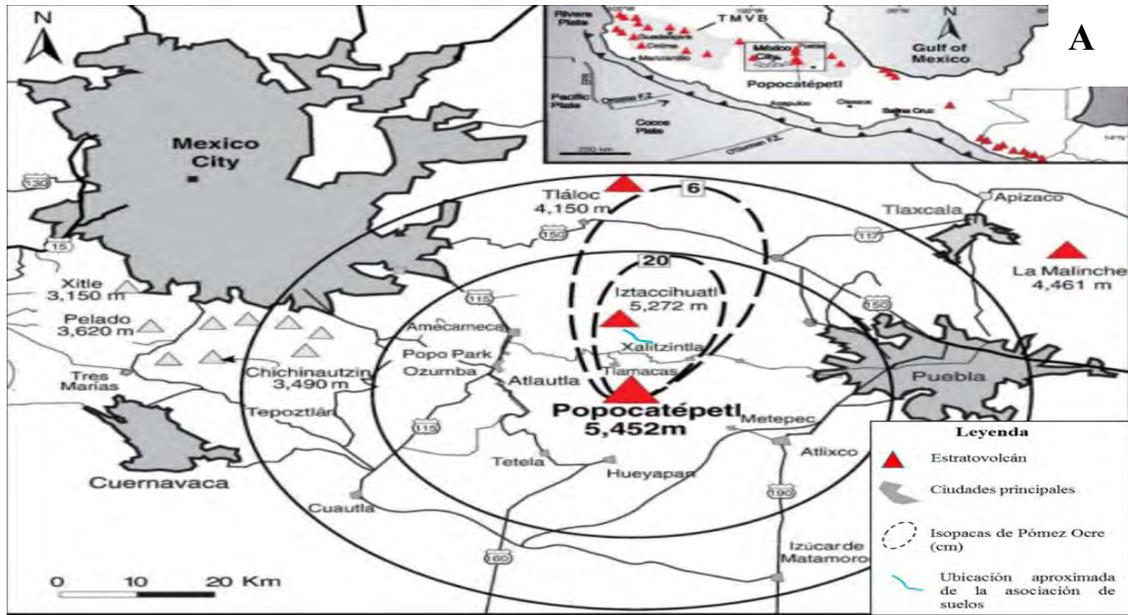


Figura 16: A) Mapa que muestra la distribución de las capas de pómez ocre (Arana *et al.*, 2010). B) Deposito de pómez ocre encontrado en el sitio de estudio.

El pH es moderadamente ácido en el horizonte superficial, la acidez disminuye con la profundidad hasta el horizonte C y aumenta nuevamente en el suelo enterrado (Ab), la conductividad eléctrica es mayor en el suelo superficial y disminuye con la profundidad. La materia orgánica varía en el perfil de 7 a 3 %, es mayor en el horizonte superficial y disminuye a lo largo del perfil hasta llegar al suelo enterrado, donde se incrementa considerablemente.

En los horizontes Ah₁ y Ah₂ presentan un color negro (10YR 2/1), alta estabilidad de agregados, presentan tixotropía, la prueba para alofano en campo es positiva (fuerte-moderada) (Cuadro 9) y el pH en NaF (mayor de 9.2), lo que indicaría que estos suelos se encuentran en proceso de andosolización (Bockheim y Gennadiyev, 2000; Espinoza y Rubiano, 2015), caracterizado por la acumulación de materia orgánica humificada y la formación de alofano y complejos órgano-minerales (Gaitán y López, 2007; Verde, 2009).

La profundidad fisiológica es media, con muy buena penetrabilidad de raíces. La evaluación en campo (Anexo 2) muestra que la capacidad de agua disponible para las plantas así como la capacidad de retención de agua son altas, conductividad hidráulica alta, saturación de bases menor del 50 % y un factor de erodabilidad medio. El nitrógeno disponible (N_d) y el fósforo movilizable (P_{mo}) fueron bajos (Cuadro 5).

Cuadro 5: Propiedades edafo-ecológicas del perfil de Joyita "La Ranita"

Profundidad fisiológica	Horizonte	Espesor	VPT	CA	dCC	CC	Kf	Factor K	Humus	N _d	P _{mo}
[dm]		[dm]	___ [Vol %] ___		___ [L m ⁻²] ___		[cm d ⁻¹]		[kg m ⁻²]	___ [g m ⁻²] ___	
4.5	Ah	1.8	56.5	8			40-100	0.38	13.6	0.4	10.88
	Ah ₂	1.9	56.5	8	297	475	40-100		11.33	0.33	9.06
	C	2.5	46.5	22.5			>300		1.18	0.035	0.94
	Awb	3.7	52.5	6			40-100		4.57	0.13	3.65

VPT: volumen total de poros
 CA: capacidad de aireación
 dCC: capacidad de agua disponible
 Kf: conductividad hidráulica
 N_d: nitrógeno disponible
 P_{mo}: fósforo movilizable
 Factor K: factor de erodabilidad

Descripción del perfil de suelo

Perfil 1 (Oe, Ah₁, Ah₂, C, Ab)

Descrito por: Sandoval-Aparicio Juan Carlos

Fecha de descripción y muestreo: 03-10-2015

Localidad: Cascada Volkswagen

Ubicación: 537650 E, 2115807 N

Elevación: 3961 m

Exposición: Sureste

Pendiente: 2-5 % ligeramente ondulado

Relieve: Cónvexa

Posición del perfil: Pie monte coluvial

Drenaje: Sitio receptor

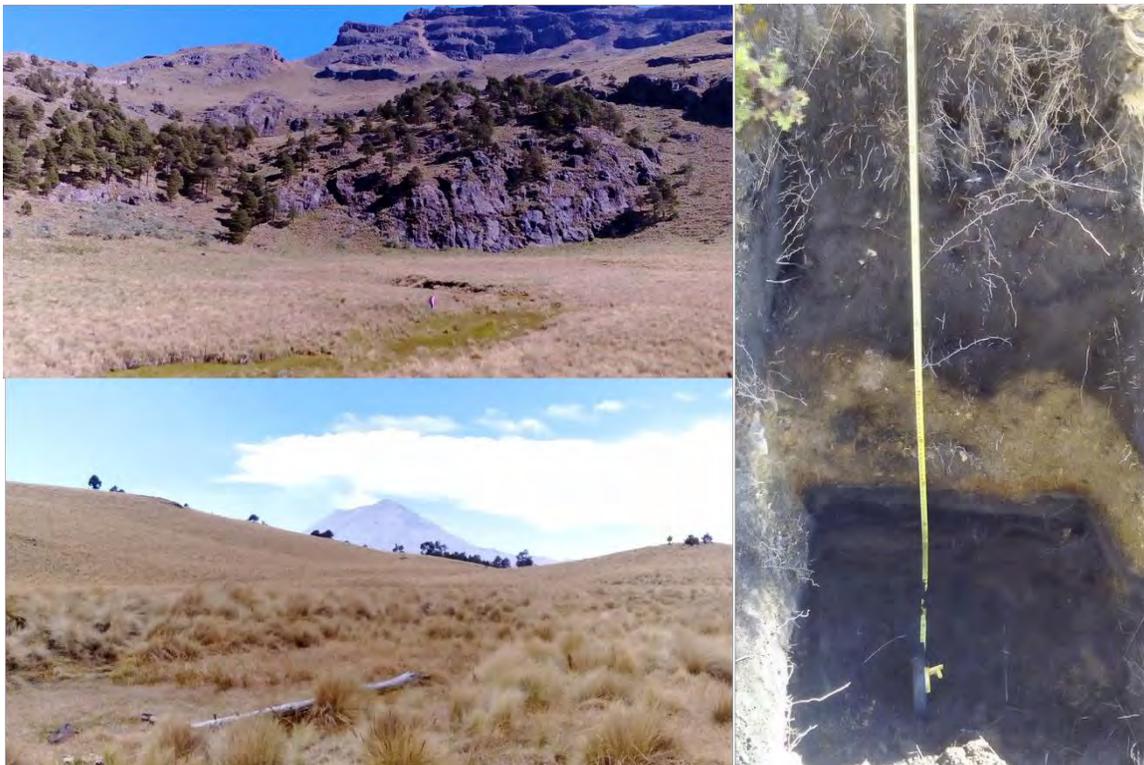
Material parental: Piedra pómez.

Erosión: Sin evidencias de erosión.

Uso del suelo: Forestal-conservación

Vegetación: *Pinus hartwegii*, *Muhlenbergia* sp., *Festuca* sp

Tipo de suelo: Andosol vítrico úmbrico (dístico, tixotrópico, endoarénico)



Horizonte	Profundidad cm	Descripción
Oe	0-8	Horizonte orgánico con materia orgánica ligeramente humificada, y abundantes raíces de gramíneas, de color negro muy húmedo.
Ah ₁	8-26	Húmedo al momento de la descripción. Transición al horizonte Ah ₂ marcada y horizontal. Color 10YR 2/1 (negro) en húmedo y 5YR 3/1 (gris muy oscuro) en seco. Textura es franco limosa fina. Pedregosidad del 1 %, cantos finos angulares y subangulares de pómez. Estructura granular media moderada y subangular fina débil. Consistencia blanda en seco y muy friable en húmedo. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Poros frecuentes (de 50 a 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y caóticos, fuera y dentro de los agregados, vesiculares. Permeabilidad moderada Raíces comunes (de 10 a 100 por 3 dm ²), finas (menos de 1 mm de diámetro) y medias (de 3 a 10 mm de diámetro). Presencia de alofano (intensa), reacción al H ₂ O ₂ ligera efervescencia en frío.
Ah ₂	26-45	Húmedo al momento de la descripción. Transición al horizonte C marcada y ondulada. Color 10YR 2/1 (negro) en húmedo y 7.5YR 4/1 (gris oscuro) en seco. Textura es franco limosa gruesa. Pedregosidad menor de 1 %, cantos finos. Estructura granular fina media y subangular medial. Consistencia blanda en seco y muy friable en húmedo. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Poros frecuentes (de 50 a 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y horizontales, fuera y dentro de los agregados, vesiculares. Permeabilidad moderada. Pocas raíces (de 5 a 10 por 3 dm ²), medias (de 3 a 10 mm de diámetro). Presencia de alofano (moderada), reacción al H ₂ O ₂ ligera efervescencia en frío.
C	45-70	Húmedo al momento de la descripción. Transición al horizonte Ab marcada y ondulada. Color en húmedo 10YR 7/4 (pardo oliva claro) y en seco 2.5Y 6/3 (pardo amarillento). Extremadamente pedregoso (de 60 a 70 %), pómez pequeñas (de 1 a 5 cm), angulares y subangulares. Estructura de grano simple. Consistencia en seco suelto en húmedo friable, no pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Poros numeroso (más de 200 por dm ²), medianos (de 2 a 5 mm), continuos y horizontales, fuera de los agregados, vesiculares e intersticiales. Permeabilidad rápida. Raíces raras (de 3 a 5 por dm ²) medias (de 3 a 10 mm de diámetro). Presencia de alofano (intensa), reacción al H ₂ O ₂ ligera efervescencia en frío.

Ab	70-107	Húmedo al momento de la descripción. Color en húmedo 5YR 2.5/1 (negro) y en seco 5YR 3/2 (pardo rojizo oscuro). Textura franco arcillo arenosa. Ligeramente pedregoso (1 %), cantos pequeños (de 1 a 2 cm) subangulares. Estructura subangular-granular media débilmente desarrollada Consistencia en seco suelto en húmedo friable, ligeramente pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Poros numeroso (más de 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y caóticos, fuera y dentro de los agregados, vesiculares e intersticiales. No hay presencia de raíces. Presencia de alofano (intensa), reacción al H ₂ O ₂ reacción inmediata con efervescencia en frío
-----------	---------------	---

10.1.2. Perfil 2: Buenavista

El sitio se ubica a 3300 m dentro de área de influencia del parque, el uso del suelo es principalmente ecoturístico. En este sistema ribereño se encuentra un río tipo A (Rosgen, 1994), con un ancho de 1.18 m que en su punto más profundo llega a 50 cm, el gasto de la corriente calculado fue de 910 l/s. La ladera solana tiene una pendiente de 8 a 10 %, mientras que en la ladera umbría la pendiente registrada esta entre 10 y 12 % y con pendientes casi planas en el lecho del río. A pesar de la pendiente encontrada en estos sitios, el suelo de las laderas no presenta signos de erosión pues está protegido por una gran cantidad de herbáceas.

En el intervalo altitudinal de 3000-3500 m se observa una alta densidad de especies de coníferas con una gran abundancia y diversidad de arbustos y herbáceas, pese al impacto que causan las actividades antrópicas en los sistemas ribereños (Colli, 2015). En el caso de este sitio, el estrato arbóreo está constituido *Pinus hartwegii* que superan fácilmente los 20 m de altura y algunos individuos de *Abies religiosa*.

El suelo dominante en este sistema ribereño se clasificó como **Andosol vítrico úmbrico (dístico, epiarénico)** desarrollados a partir de depósitos de pómez ocre (de 5000 años), estos depósitos se subdividen en cuatro camas (A, B, C y D) por lo que varían en color y tamaños (Arana *et al.*, 2010). En este caso el fósforo movilizable (PO) tuvo un color marrón muy pálido (10YR 8/4), un pH moderadamente ácido (5.3) y cantos angulares y subangulares con tamaños que van de 5 a 12 cm (Figura 17). Se observaron afloramientos de rocas ígneas andesíticas, dacitas y riolitas en la ladera umbría, estos son los principales materiales sobre los que se desarrollan leptosoles con un desarrollo de 7 a 13 cm, ricos en materia orgánica (8 a 10 %).



Figura 17: Depósito de pómez ocre (izquierda), afloramiento andesitas y riolitas en algunas secciones del sistema ribereño (derecha).

La profundidad de desarrollo es de 5.6 dm ya que el horizonte C forma parte del *solum*, pues en él se desarrollan raíces finas y su pedregosidad es menor del 70 % (Siebe *et al.*, 2006). La penetrabilidad de raíces es buena. Estos suelos tienen una alta capacidad de agua disponible para las plantas, pero su capacidad de retención de agua es baja, la conductividad hidráulica es alta y el factor de erodabilidad para estos suelos fue calculado como medio. El nitrógeno disponible (N_d) y el fósforo movilizable (P_{mo}) fueron medio y bajo respectivamente (Cuadro 6).

Cuadro 6: Propiedades edafo-ecológicas del perfil de Buenavista

Profundidad fisiológica	Horizonte	Espesor	VPT	CA	dCC	CC	Kf	Factor K	Humus	N_d	P_{mo}
[dm]		[dm]	___ Vol %] ___		___ [L m ⁻²] ___		[cm/d ⁻¹]		[kg m ⁻²]	___ [g m ⁻²] ___	
	Ah	2	59	12			40-100		13	1.04	19
4.1	C	2.1	45	27	188	475	<100	0.36	0.94	0.07	1.41
	Ab	2.2	54	6			100-300		9.83	0.78	14.74

VPT: volumen total de poros

CA: capacidad de aireación

dCC: capacidad de agua disponible

Kf: conductividad hidráulica

N_d : nitrógeno disponible

P_{mo} : fósforo movilizable

Factor K: factor de erodabilidad

Los rasgos pedológicos encontrados fueron: coloración negra en el horizonte Ah por la humificación de la materia orgánica y cantidades limitadas de minerales de bajo grado de ordenamiento (reacción al NaF ligera) (Cuadro 9). En el perfil el pH tiende a ser ácido (4.9) y la acidez disminuye con la profundidad, La materia orgánica varía en el perfil de 6.8 a 3.8 %, es mayor en el horizonte superficial y disminuye drásticamente a lo largo del perfil. Se presenta hidrofobicidad en todo el espesor del horizonte A, lo que se atribuye principalmente por la acumulación de materia orgánica proveniente de pinos, pues la hojarasca de este tipo de vegetación

aporta gran cantidad de compuestos orgánicos hidrofóbicos (lípidos y ceras), fenómeno que ha sido reportado en andosoles cubiertos por *Pinus patula* (Jaramillo, 2003; Jaramillo *et al.*, 2000). Pero también se ha reportado repelencia al agua en varios tipos de suelo y con diversas coberturas, siendo los suelos más susceptibles a ella los de textura gruesa (Duque *et al.*, 2004) aunque se presenta en suelos con amplias diferencias en su composición textural, desde arenosa hasta arcillosa.

Descripción del perfil

Perfil 2 (Oe, Oa, Ah, C, Ab)

Descrito por: Grupo de trabajo sistemas ribereños

Fecha de descripción y muestreo: 31-10-2015

Localidad: Buenavista

Ubicación: 542037 E, 2111204 N

Elevación: 3300 m

Exposición: Este

Pendiente: 8-12 % moderadamente ondulado

Relieve: Cóncava

Posición del perfil: Ladera superior cóncava

Drenaje: Sitio donador

Material parental: Piedra pómez.

Erosión: Solo arrastre de hojarasca

Uso del suelo: Forestal-Ecoturístico.

Vegetación: *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa*

Tipo de suelo: Andosol vítrico úmbrico (dístrico, epiarénico)



Horizonte	Profundidad cm	Descripción
Oe	0-8	Horizonte orgánico con materia orgánica ligeramente humificada, restos de hojarasca de pino fácilmente identificables.
Oa	8-13	Horizonte orgánico con materia orgánica fermentada y muy descompuesta, restos vegetales no identificables, de color pardo claro, muy húmedo. Transición al horizonte mineral Ah marcada e irregular.
Ah	13-33	Húmedo al momento de la descripción. Transición al horizonte C media e irregular. Color en húmedo 2.5Y 3/1 (gris muy oscuro) y en seco 5Y 4/1 (gris oscuro). Textura franco arenosa. Ligeramente pedregoso (2 %), cantos pequeñas (de 1 a 2 cm) subangulares. Estructura granular media moderadamente fuerte y subangular fina débilmente desarrollada. Consistencia en seco suelto en húmedo friable, ligeramente pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Poros numeroso (más de 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y caóticos, fuera y dentro de los agregados, vesiculares e intersticiales. Hidrofobicidad. Raíces comunes (de 10 a 100 por 3 dm ²), finas (menos de 1 mm de diámetro) y medias (de 3 a 10 mm de diámetro). Presencia de alofano (ligera), reacción al H ₂ O ₂ poca efervescencia en frío.
C	33-54	Húmedo al momento de la descripción. Transición al horizonte Ab marcada y ondulada. Color en húmedo 10YR 8/4 (marrón muy pálido), y en seco. 10YR 8/6 (amarillento claro). Muy pedregoso (de 60-65 %), cantos pómez grandes (de 5 a 12 cm), angulares y subangulares. Sin estructura, de grano simple. Consistencia en seco suelto en húmedo friable, no pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Poros frecuentes (de 50 a 200 por dm ²), medianos (de 2 a 5 mm) y gruesos (de más de 5 mm), continuos y caóticos, fuera de los agregados, vesiculares e intersticiales. Permeabilidad muy rápida. Raíces finas (menos de 1 mm de diámetro) y medias (de 3 a 10 mm de diámetro) comunes (de 10 a 100 por 3 dm ²), gruesas (de 10 a 30 mm de diámetro) pocas (de 5 a 10 por dm ²). Presencia de alofano (Intensa), reacción al H ₂ O ₂ ligera efervescencia en frío.
Ab	54-76	Húmedo al momento de la descripción. Color en húmedo 5YR 3/1 (gris muy oscuro) y en seco 2.5Y 6/2 (pardo grisáceo claro). Textura franco arcillo arenosa. Ligeramente pedregoso (3 %), cantos pequeñas (de 1 a 2 cm) subangulares. Estructura granular y subangular débilmente desarrollada. Consistencia en seco suelto, en húmedo friable, ligeramente pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Poros frecuentes (de 50 a 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y caóticos, fuera y dentro de los agregados, vesiculares e intersticiales. Permeabilidad moderada. La presencia de raíces es muy rara (menos de 1 por dm ²), gruesas (de 10 a 30 mm de diámetro). Presencia de alofano (Intensa), reacción al H ₂ O ₂ ligera efervescencia en frío.

10.1.3. Perfil 3: Xalitzintla

El sitio se ubica a 2678 m en esta zona se realizan actividades económicas como la producción piscícola, aprovechamiento forestal, pero esta destina mayoritariamente al cultivo de maíz (cultivo de temporal). El ancho del río fue de 1.50 m con un gasto de corriente de 922 l/s, pero el caudal disminuye drásticamente durante la temporada de estiaje hasta casi desaparecer, la reducción del caudal también se puede relacionar con la producción piscícola en la parte alta de la cuenca. La pendiente es ligeramente inclinada (4-7 %), la vegetación natural fue eliminada a ambos lados del río para abrir un camino (umbría) y establecer áreas de cultivo (solana) de maíz, situación que acentúa los fenómenos de erosión hídrica y eólica en la zona. Pero a lo largo del cauce se conserva una franja de vegetación de 4 a 5 m en donde se puede encontrar una gran densidad de especies vegetales como *Salvia elegans*, *Senecio* sp., *Salix* sp., *Geranium* sp., *Alchemilla* sp., algunos helechos del genero *Asplenium* y *Cheilanthes*, mientras que el estrato arbustivo consta de algunos individuos de *Pinus teocote* y *Pinus ayacahuite* (Figura 18)



Figura 18: Exposición solana del sistema ribereño en donde se muestra la zona de cultivo (izquierda) y la pequeña franja de vegetación conservada a lo largo del cauce (derecha).

El suelo de este sitio se clasificó como **Fluvisol mólico (ántrico, húmico, endoéutrico, endoesqueletico)**. La pedregosidad oscila en el perfil desde el 40 % en la superficie hasta más del 60 % en los horizontes más profundos. Considerando las diferencias de pedregosidad, color en húmedo y seco y los ligeros cambios en la textura del suelo nos lleva a inferir que el suelo se desarrolló a partir de materiales acarreados de ladera arriba en distintos tiempos.

En el perfil el pH es ligeramente ácido en todo el perfil, la materia orgánica decrece en el perfil de 6.5 a 2.5 %, la prueba de NaF en campo indica la presencia de alofano y la reacción es más intensa con la profundidad (Cuadro 9). La profundidad de desarrollo es de 5.2 dm; fisiológicamente es

somera, aunado al aumento de la pedregosidad que disminuye el desarrollo de las raíces. La capacidad de aireación es muy alta, el agua disponible para las plantas es media y la capacidad de retención de agua es baja (Cuadro 7). Tiene un bajo factor de erodabilidad atribuido principalmente a la pedregosidad de la superficie, pero hay evidencias de erosión por cárcavas y azolve del cauce por suelo acarreado de la zona de cultivo.

Cuadro 7: Propiedades edafo-ecológicas del perfil de Xalitzintla.

Profundidad fisiológica	Horizonte	Espesor	VPT	CA	dCC	CC	Kf	Factor K	Humus	Nd	Pmo
[dm]		[dm]	___ Vol %] ___		___ [L m ⁻²] ___		[cm/d ⁻¹]		[kg m ⁻²]	___ [g m ⁻²] ___	
	Ap	2.2	48.5	19			100-300		7.4	0.5	11
2.4	2AC	2.3	55	12	106	182	40-100	0.2	9.6	0.75	11.1
	3C	5.5	46.5	24			>300		7.6	0.6	11.4

VTP: volumen total de poros
 CA: capacidad de aireación
 dCC: capacidad de agua disponible

Kf: conductividad hidráulica
 N_d: nitrógeno disponible
 P_{mo}: fosforo movilizable

Factor K: factor de erodabilidad

Perfil 3 (Ap, 2AC, 3C)

Descrito por: Grupo de trabajo sistemas ribereños

Fecha de descripción y muestreo: 30-10-2015

Localidad: Xalitzintla

Ubicación: 547792 E, 2111726 N

Elevación: 2678 m

Exposición: Sureste

Pendiente: 4-7 % ligeramente ondulado

Relieve: Cónvexa

Posición del perfil: Pie monte coluvial

Drenaje: Sitio receptor.

Material parental: Piedra pómez.

Erosión: Hídrica laminar con arrastre de hojarasca, erosión eólica.

Uso del suelo: Agrícola-Forestal, cultivos de maíz.

Vegetación: *Pinus ayacahuite* y vegetación secundaria

Tipo de suelo: Fluvisol mólico (ántrico, húmico, endoéutrico, endoesqueletico)



Horizonte	Profundidad cm	Descripción
Ap	0-22	Horizonte mineral alterado por labranza. Transición al horizonte 2AC marcada e irregular. Color en húmedo 10YR 3/1 (gris muy oscuro) y en seco 10YR 6/1 (gris). Textura arenosa franca. Pedregosidad de 20 a 35 %, pómez de 1 a 2 cm, angulares y subangulares. Suelo disturbado, presencia de terrones. Consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo friable, ligeramente pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Reacción al peróxido de hidrogeno moderada, reacción al NaF ligera, reacción al HCl audible. Poros pocos (de 1 a 50 por dm ²), medianos (de 2 a 5 mm), discontinuos y caóticos, fuera de los agregados, intersticiales. Raíces raras (de 3 a 5 por 3 dm ²), medias (de 3 a 10 mm de diámetro).
2AC	22-45	Húmedo al momento de la descripción. Transición al horizonte C tenue e irregular. Color en húmedo 10R 2.5/1 (pardo rojizo) y en seco 10YR 5/2 (pardo grisáceo). Textura arenosa franca. Extremadamente pedregoso (de 40 a 55 %), cantos y gravas de pómez medianas (de 2 a 10 cm) subangulares y redondeados. Estructura granular fina débilmente desarrollada Consistencia en seco blando, en húmedo friable, ligeramente pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Reacción al peróxido de hidrogeno ligera, reacción al NaF moderada. Poros frecuentes (de 50 a 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y horizontales, fuera de los agregados, intersticiales. Raíces comunes (de 10 a 100 por dm ²), finas (menos de 1 mm de diámetro) y medias (de 3 a 10 mm de diámetro).
3C	45-100	Húmedo al momento de la descripción. Color en húmedo 10YR 6/1 (gris) y en seco 5Y 4/2 (gris oliva). Textura franco arcillo arenosa. Extremadamente pedregoso (de 60 a 70 %), cantos y gravas grandes (de 10 a 20 cm) y medianas (de 5 a 10 cm) angulares y subangulares y redondeados. Estructura granular media y subangular fina débilmente desarrollada Consistencia en seco blando, en húmedo friable, ligeramente pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Reacción al peróxido de hidrogeno ligera, reacción al NaF intensa. Poros frecuentes (de 50 a 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y caóticos, fuera de los agregados, intersticiales. Raíces raras (de 3 a 5 por 3 dm ²), medias (de 3 a 10 mm de diámetro). pH 6.47

10.1.4. Perfil 4: San Nicolás

Este sistema ribereño se localiza en la parte baja de la cuenca a 2419 m, se presentan en este sitio zonas urbanas, pecuarias y en la cercanía del río actividades agrícolas como el cultivo de maíz y haba. Estas actividades tienen un impacto negativo muy marcado sobre el sistema ribereño, que se traduce en contaminación del agua, suelo, compactación de suelo y disminución de la cobertura vegetal y destrucción del sistema ribereño (Figura 19).



Figura 19: Cultivo de maíz a un lado del río, se puede observar la poca vegetación que protege el cauce (izquierda). En la imagen del centro, cultivo de haba localizado a 10 m del río. A la derecha obras para la instalación del drenaje municipal a un lado del río.

La vegetación está constituida por relictos de bosque de encino, dominada por vegetación secundaria, con predominio de especies oportunista e indicadoras de perturbación ambiental como *Alnus* sp., también se pueden encontrar *Salix* sp., *Buddleia* sp., *Cestrum* sp., *Senecio* sp., y diversos frutales como tejocote (*Crataegus mexicana*), pera (*Pyrus*) y manzana (*Malus domestica*). El ancho del río fue 1.3 m con una profundidad promedio de 12 cm y un gasto de la corriente de 2696 l/s.

El suelo de esta zona se ha desarrollado a partir de depósitos de origen fluvial y material autóctono como pómez y riolita. El sitio es un aluvión activo con relieve cóncavo, por lo que recibe materiales acarrados por el río que son depositados en las orillas y materiales de las laderas, la prueba para alofano en campo resulto positiva, lo que indica la presencia de alofano en el perfil. El suelo se clasificó como **Fluvisol háplico (ántrico, éutrico, tefrico, Arénico)** con anegamiento ocasional de agua dulce, es un suelo fisiológicamente profundo (casi 7 dm), con estratificación y una débil diferenciación de horizontes.

El pH del suelo es neutro (pH de 7.01) y aun que la conductividad eléctrica es mayor que en los tres sitios anteriores la salinidad se considera despreciable. La materia orgánica varía de forma

irregular a lo largo del perfil, el volumen total de poros y la capacidad de aireación son bajos, el agua disponible para las plantas y la capacidad de campo son medias. La conductividad hidráulica del suelo es alta, el nitrógeno disponible es medio-alto y el fósforo disponible bajo. Debido a la textura arenosa, el bajo contenido de MO y la baja estabilidad de los agregados el factor de erodabilidad de estos suelos es alto (Cuadro 8).

Cuadro 8: Propiedades edafo-ecológicas del perfil de San Nicolás

Profundidad fisiológica	Horizonte	Espesor	VPT	CA	dCC	CC	Kf	Factor K	Humus	Nd	Pmo
[dm]		[dm]	___ Vol %] ___		___ [L m ⁻²] ___		[cm/d ⁻¹]		[kg m ⁻²]	___ [g m ⁻²] ___	
	Ah	1.5	40.5	16			100-300		3.17	0.25	4.75
6.9	2Ah ₂	2	42.5	12	113	191	40-100	0.67	4.4	0.35	6.6
	3C	6.7	42.5	14			40-100		15.79	1.2	23

VTP: volumen total de poros

CA: capacidad de aireación

dCC: capacidad de agua disponible

Kf: conductividad hidráulica

N_d: nitrógeno disponible

P_{mo}: fosforo movilizable

Factor K: factor de erodabilidad

Perfil 4 (Ap, 2AC, 3C,)

Descrito por: Grupo de trabajo sistemas ribereños

Fecha de descripción y muestreo: 02-10-2015

Localidad: San Nicolás (La Barranquita)

Ubicación: 537650 E, 2115807 N

Elevación: 2419 m

Exposición: Sureste

Pendiente: 2-5 %

Relieve: Cóncavo

Posición del perfil: Base aluvial del pie de monte

Drenaje: Sitio receptor

Material parental: Materiales aluviales (aluvión activo)

Erosión: Hídrica ligera

Uso del suelo: Agrícola-urbano, cultivo de maíz.

Vegetación: Relictos de bosque de *Quercus* y vegetación secundaria.

Tipo de suelo: Fluvisol háplico (ántrico, éutrico, tefrico, Arénico)



Horizonte	Profundidad cm	Descripción
O	0-6	Horizonte orgánico formado principalmente por raíces de pastos y herbáceas, con muy poca hojarasca y color gris oscuro, se observó la presencia de lombrices.
Ah	6-16	Húmedo al momento de la descripción. Color en húmedo 10YR 3/1 (gris muy oscuro) y en seco 10YR 5/1 (gris). Textura arenosa. Ligeramente pedregoso (10 %), pómez de 2 mm a 1 cm redondeados y subangulares. Sin estructura, grano simple. Consistencia en seco suelto y no coherente, en húmedo muy friable, no pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Reacción al peróxido de hidrogeno y al NaF ligera. Poros frecuentes (de 50 a 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y caóticos, fuera de los agregados, vesiculares. Permeabilidad moderada. Raíces abundantes (de 100 a 500 por 3 dm ²), finas (menos de 1 mm de diámetro) a medias (de 3 a 10 mm de diámetro). Se observó la presencia de lombrices.
2Ah₂	16-26	Húmedo al momento de la descripción. Color en húmedo 10YR 3/1 (gris muy oscuro) y en seco 10YR 5/1 (gris). Textura arenosa franca. Pedregosidad de 20 a 25 %, pómez y riolita de 5 a 10 cm subangulares y redondeados. Sin estructura, grano simple. Consistencia en seco suelto y no coherente, en húmedo muy friable, no pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. Reacción al peróxido de hidrogeno y al NaF ligera. Poros frecuentes (de 50 a 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y caóticos, fuera de los agregados, vesiculares. Permeabilidad moderada. Raíces abundantes (de 100 a 500 por 3 dm ²), finas (menos de 1 mm de diámetro) a medias (de 3 a 10 mm de diámetro).
3C	26-100	Húmedo al momento de la descripción. Color en húmedo 10YR 2/1 (negro) y en seco 10YR 3 /1 (gris muy oscuro). Textura arenosa franca. Pedregosidad de 40 %, pómez, riolita, andesita de 9 a 17 cm, angulares y redondeadas. Sin estructura, grano simple. Consistencia en seco suelto y no coherente, en húmedo muy friable, no pegajoso. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes ni nódulos. No calcáreo. No hay reacción al peróxido de hidrogeno y al NaF ligera. Poros frecuentes (de 50 a 200 por dm ²), tamaño micro (menos de 0.075 mm) y muy finos (de 0.075 a 1 mm), continuos y caóticos, fuera de los agregados, vesiculares e intersticiales. Permeabilidad moderada Raíces raras (de 3 a 5 por 3 dm ²), medias (de 3 a 10 mm de diámetro).

Cuadro 9: Descripción general de los horizontes

Perfil	H	Espesor [cm]	Color	Textura	Hum	Estructura	% Cantos	pH	Al
1	Ah	18	10YR 2/1	CLf	1	Granular m(mo)	1 Cf	5.24	2
	Bw	19	"10YR 3/1	CLg	2	Granular-subangular fmo	1 Cf	5.36	3
	C	25	10YR 8/6	A	2	Grano simple	70 Cfm	5.82	3
	Ab	37	5YR 2.5/1	CLf	1	Subangular m(mo)	1 Cm	5.75	2
2	Ah	18	10YR 3/2	CRL	2	Granular mf	2 Cm	4.38	1
	C	21	10YR 8/6	A	2	Grano simple	60 Cfm	5.1	2
	Ab	24	5YR 3/1	CRA	1	Subangular-Granular fmo	3 Cm	5.33	2
3	Ap	25	10YR 3/1	A	4	En terrones	35 Cf	6.61	1
	2AC	22	10R 2.5/1	AC	3	Granular fd	40 Cfm	6.42	2
	3C	52	10YR 6/1	AC	2	Granular fd	60 Cmg Gfm	6.51	2
4	Ap	15	10YR 3/1	AC	3	Grano simple	10 Cf Gf	7.2	1
	2Ah ₂	25	10YR 3/1	AC	2	Grano simple	25 CGfm	7.05	1
	3C	60	10YR 2/1	A	2	Grano simple	40 CGfm	6.98	1

H= horizontes.

Estructura: clase gruesa (g) mediana (m) y fina (f); grado débil (d) fuerte (f) y moderada (mo).

Hum= humedad actual: 1=mojada, 2= húmeda, 3=fresca, 4=seca.

Reacción de Al activo: 0= negativa, 1=ligera, 2= moderada, 3= fuerte

Piedras: forma de C= cantos y G= gravas; de tamaño f= fino (2-6 mm), m= medio (6-20 mm) y g = grueso (20-60 mm)

10.2. Propiedades física y químicas de los suelos

En el cuadro 10 se muestra los resultados de la clasificación de los suelos analizados, y en la figura 20 se muestran algunos de los criterios de diagnóstico establecidos por la WRB para clasificar los suelos (IUSS, 2014).

Cuadro 10: Clasificación de los suelos (IUSS, 2014) analizados en el Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia

Sitio	Grupo de suelo	Calificadores grupo I	Calificadores grupo II
Joyita “La ranita”	Andosol	Vítrico, úmbrico	Dístrico, tixotrópico, endoarénico
Buenavista	Andosol	Vítrico, úmbrico	Dístrico, epiárenico
Xalitzintla	Fluvisol	Mólico	Ántrico, húmico, endoéutrico, endoesquelético
San Nicolás	Fluvisol	Háplico	Ántrico, éutrico, tefrico, endoarénico

Como se puede ver en la Figura 20 los suelos ribereños de las zonas altas no cumplen con propiedades ándicas como densidad aparente (D.A) baja ($\leq 9 \text{ g cm}^{-3}$) y alta retención de fósforo (RF) ($\geq 85 \%$), por lo que estos suelos ribereños ubicados a mayor altitud en los sitios de la Joyita y Buenavista se clasificaron como Andosoles vítricos, en el que el desarrollo de minerales de rango corto puede ser incipiente (Delmelle *et al.*, 2015), mostraron colores negros en húmedo y grises a pardo oscuros en seco, en los horizontes Ah presentan estructura granular y grumosa (migajón) por la alta actividad biológica, en los fluvisoles se presentan color gris oscuro en los horizontes superficiales y pardos rojizos en los más profundos, generalmente no estructurados (grano suelto) (Cuadro 9), pero en los horizontes con actividad biológica de raíces se presenta estructura granular o subangular muy débil. Todos los suelos analizados son friables a muy friables aun en horizontes subsuperficiales. Los colores oscuros y la estructura granular en los andosoles son el resultado de la descomposición y la acumulación de la materia orgánica (Ping *et al.*, 1989), lo que le confiere a estos suelos una permeabilidad rápida. Los andosoles presentaron textura franca y los fluvisoles arena franca.

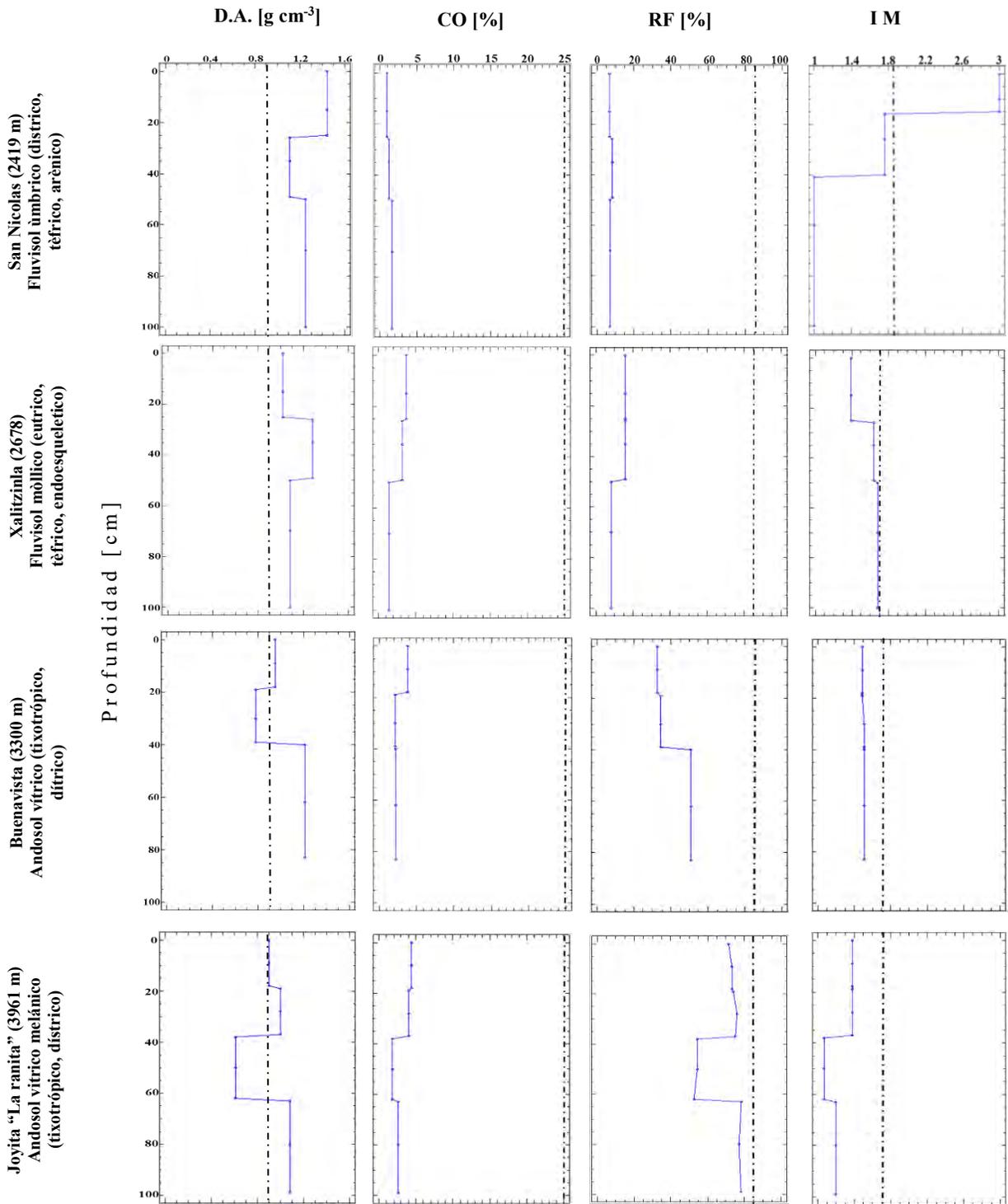


Figura 20: Comportamiento de algunos criterios de clasificación con respecto a la profundidad, los tres primeros corresponden a propiedad ándicas. La retención de fósforo (RF) cumple cuando abarca de la línea punteada a la derecha, mientras que para la densidad aparente (DA) y en carbono orgánico (CO) lo hacen de la línea punteada hacia la izquierda. El índice melánico (IM) menor de 1.7 indica la humificación de la materia orgánica.

El cuadro 11 presenta un resumen del análisis de varianza (modelo lineal generalizado) de las propiedades físicas y químicas más importantes utilizadas para ampliar la caracterización y la clasificación de los suelos ribereños.

Cuadro 11: Resumen de análisis de varianza de las propiedades físicas y químicas de los perfiles de suelo ribereño.

Variable	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > 0.05
Humedad del suelo	12	2638.401	219.866	81.24	<.0001
pH activo	12	19.717	1.643	3008.50	<.0001
pH potencial	12	22.523	1.876	59.12	<.0001
pH en NaF	12	80.888	6.740	586.41	<.0001
Densidad aparente	12	1.581	0.131	338.13	<.0001
Densidad real	12	1.489	0.124	18.27	<.0001
Porcentaje de porosidad	12	2940.632	245.052	61.42	<.0001
Materia orgánica	12	146.559	12.213	77.91	<.0001
Carbono	12	49.4786	4.123	77.39	<.0001
Índice melánico	12	221.826	18.485	4.21	0.0010
CIC	12	577.129	48.094	157.27	<.0001
Porcentaje de saturación de bases	12	13778.376	1148.198	12185.3	<.0001
Retención de fósforo	12	22885.824	1907.152	1150.03	<.0001

En los andosoles la baja D.A. se explica por la formación de agregados estables y alta porosidad promovidos por la acumulación de materia orgánica, la presencia de minerales de rango cortó y las fracciones de arena y limo (Shoji *et al.*, 1993). Los resultados obtenidos para la D.A. en los andosoles oscilan entre 0.9 y 1 g cm⁻³, si bien los valores >0.9 g cm⁻³ no corresponden a un criterio para establecer propiedades ándicas pueden señalar una gran cantidad de ceniza y vidrio volcánico inalterados que aún se presentan en los suelos (Ping *et al.*, 1989).

En los fluvisoles de las zonas bajas presentan valores altos de D.A., comparados con los suelos de zonas altas conservadas (Figura 21 gráfica A), oscila entre 1.2 y 1.4 g cm⁻³ valores altos para suelos francos, de modo que se atribuyen a la compactación por el uso de suelo urbano y agrícola. El uso agrícola de estos suelos, sin prácticas de conservación y manejo, provoca una rápida erosión de las partículas de limo y arcilla incrementando la fracción arenosa (Sustaita *et al.*, 1999), lo cual,

sumado al bajo contenido de MO, crean condiciones adecuadas para la compactación del suelo y la capacidad de retención de agua.

Una de las propiedades del suelo relacionada estrechamente con la densidad es la humedad del suelo, pues la capacidad de retención de humedad, al igual que la D.A., se ve afectada por el manejo del suelo, en la figura 21 gráfica B se observa que los suelos ribereños de uso agrícola y urbano son significativamente menos húmedos ($p \leq 0.05$) que los de uso forestal, pues la compactación del suelo disminuye la porosidad total (Figura 21 gráfica C) impidiendo la infiltración del agua.

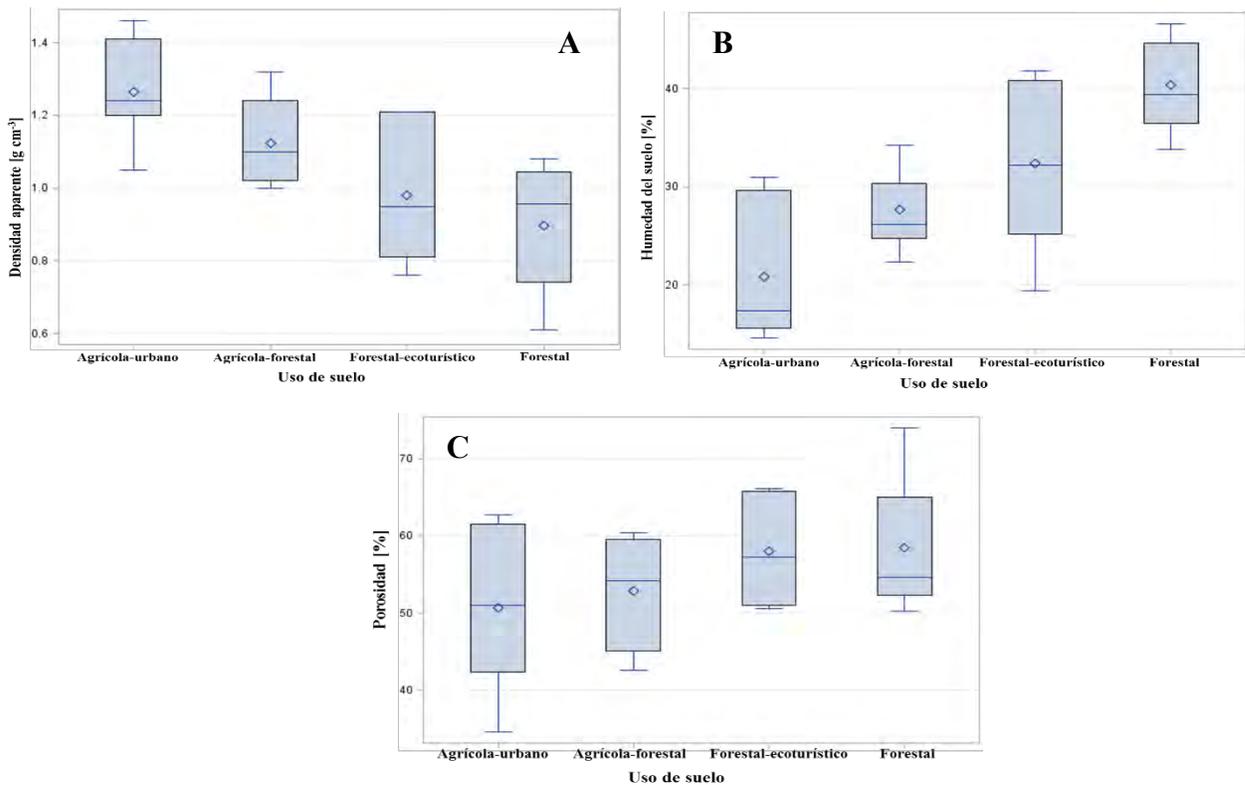


Figura 21: A) Densidad aparente del suelo ribereño en diferentes usos de suelo. B) Porcentaje de humedad del suelo ribereño en diferentes usos de suelo. C) Porcentaje de porosidad de suelo ribereño bajo diferentes usos de suelo.

El contenido de materia orgánica varía de media a baja (7.85 a 1.13 %) tomando en cuenta todos los perfiles, los suelos con mayor contenido de materia orgánica son los andosoles de las zonas altas (Joyita “La ranita y Buenavista) bajo cubierta conservada de zacatonal y pino, en comparación con los fluvisoles de las zonas bajas con algún grado de degradación (Xalitzintla y San Nicolás) (Figura 22). En los andosoles los porcentajes más grandes de MOS se encuentran en los horizontes superficiales (Ah) y en los suelos sepultados (Ab). El porcentaje de materia orgánica y el índice

melánico (Figura 20) indican que en los andosoles vítricos uno de los principales procesos pedogenéticos es la acumulación de la materia orgánica humificada, que conlleva a la formación de microagregados estables, desarrollo de la estructura e incremento de la porosidad, con el consiguiente descenso de la densidad y un aumento progresivo de la capacidad de retención de agua (Verde, 2009; Peña, 2013; Sánchez y Rubiano, 2015), estas características confieren a los andosoles ribereños una elevada velocidad de infiltración y conductividad hidráulica.

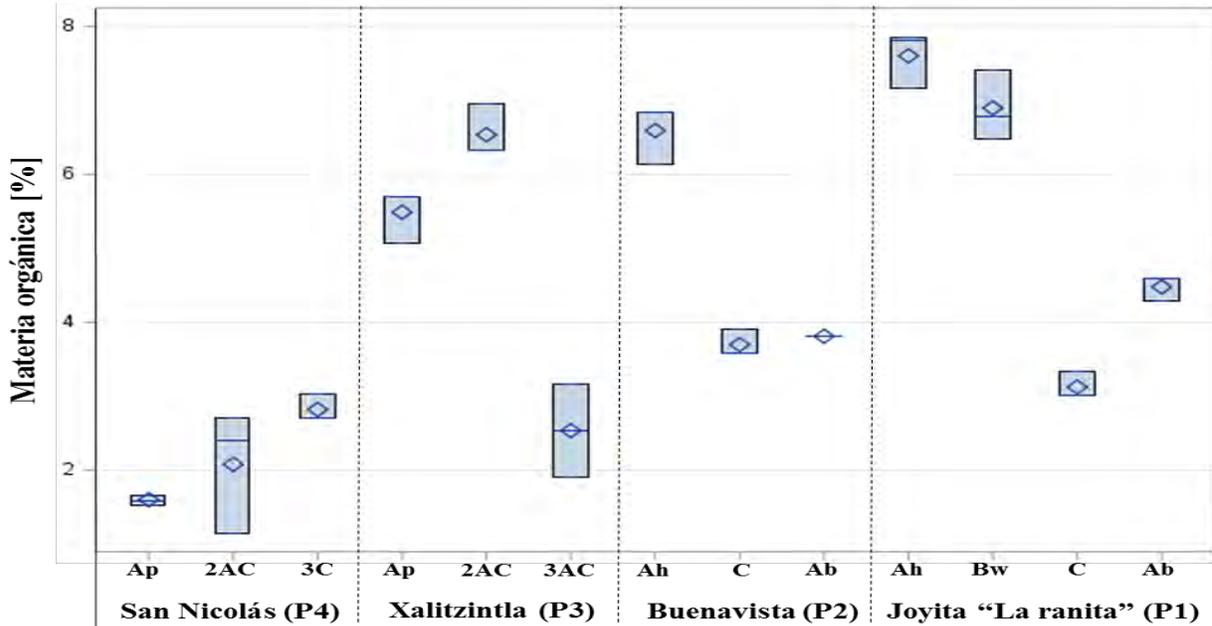


Figura 22: Porcentaje de materia orgánica en suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo por perfil y por horizonte.

En los fluvisoles la MOS decrece de forma irregular encontrándose los porcentajes más altos en horizontes subsuperficiales. En San Nicolás la MOS oscila de 1 al 3 % valores considerados bajos, Sustaita *et al.* (1999) mencionan que en estos suelos la MOS tiende a decrecer a largo plazo en función de la labranza. En Xalitzintla el suelo ribereño se ha desarrollado a partir de materiales coluviales aportado de las zonas altas y el contenido de MOS varía del 5 al 3 % de manera irregular a lo largo del perfil, las texturas gruesas en estos suelos y la pedregosidad (pómez) le brindan a estos suelos una alta conductividad hidráulica cuando no hay compactación del suelo (Cuadro 7 y 8).

Tomando en cuenta todos los horizontes de los perfiles, los valores de pH abarcan desde fuertemente ácidos a ligeramente alcalinos (4.8 a 7.3). Los suelos más ácidos su ubicaron en las

zonas altas bajo cubiertas de zacatonal y pino, y menos ácidos en las zonas agrícolas y urbanas (Figura 23). En los suelos ribereños el pH tiene una alta correlación (Anexo 1) con el porcentaje de MO, CO y con la retención de fósforo (RF). Esto indica que la materia orgánica contribuye significativamente a la acidez de los suelos estudiados, lo que concuerda con lo reportado por Shoji *et al.* (1993), Broquen *et al.* (2004) y Delmelle *et al.* (2015) que encontraron que en los suelos derivados de ceniza volcánica la MO influye sustancialmente el pH causando acidez moderada (5.3 a 6.2), mientras que Wada (1989 en Alcalá *et al.*, 2001) señaló que en andosoles las reacciones del suelo de 4.0 a 6.5 se deben principalmente a la MO, mientras que de 5.0 a 7.0 se presenta el alofano y la imogolita minerales, característicos de los andosoles.

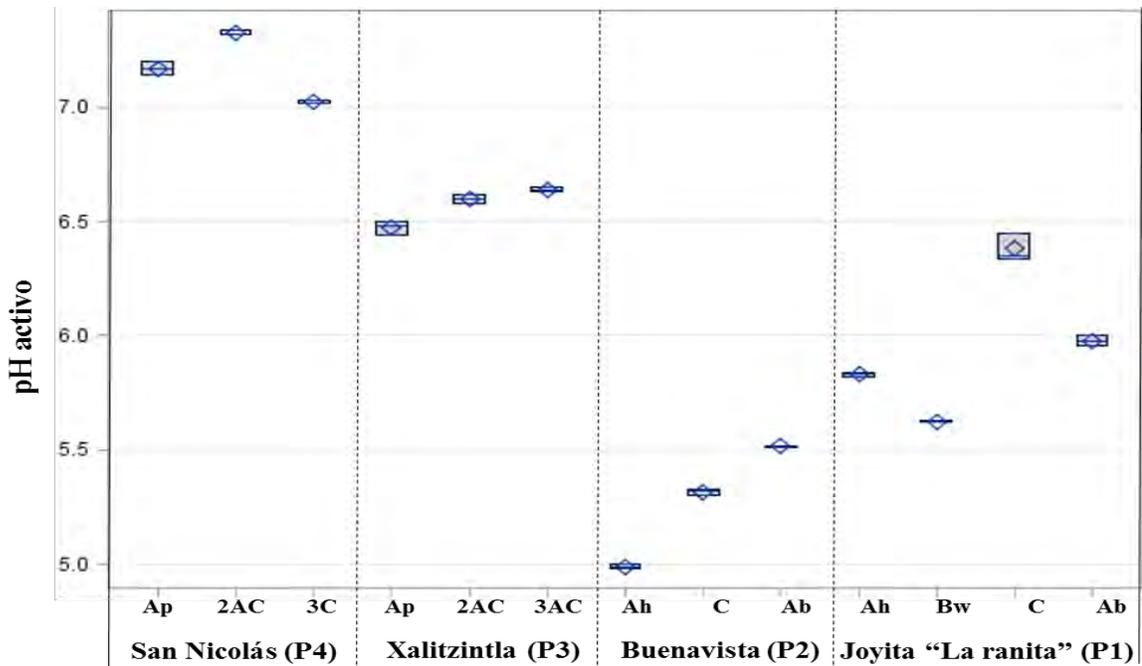


Figura 23: Variación del pH de suelos ribereños por horizonte y perfil.

En la zona de mayor altitud la vegetación de pastizal promueve la formación de alofano e imogolita, ya que estos pastos tienen la capacidad de reciclar bases intercambiables, manteniendo el pH en valores moderadamente ácidos, mientras que a los 3300 m en Buenavista la vegetación de pino promueve la formación de complejos humus-metal (aluminio, hierro) (Shoji *et al.*, 1993), el matillo de bosque es rico en polifenoles que contribuyen a la producción de ácidos orgánicos que mantiene en el suelo un pH ácido. Al descender el gradiente altitudinal hay incorporación de materiales producidos por la erosión, disminución de la materia orgánica y otros productos derivados de las

actividades antropogénicas, además algunos autores como Nezeyimana (1997), Arana *et al.* (2010) y Delmelle *et al.* (2005) mencionan que en altitudes bajas con temperaturas más cálidas la intemperización del material parental (pómez y ceniza volcánica) es más rápida y la descomposición de estos materiales libera bases intercambiables, lo que aumenta el valor de pH en los suelos, en la figura 23 se puede observar que los horizontes C (depósitos de pómez ocre) y los suelos sepultados (Ab) de La joyita y Buenavista tienden a ser menos ácidos que los horizontes superficiales. La salinidad de los suelos tiene un efecto despreciable pues los valores promedio de la conductividad eléctrica fueron de 0.03 a 0.67 dS.m⁻¹

En los suelos volcánicos la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se relaciona estrechamente con la carga variable del alofano y el humus, de manera que tiende a aumentar con el pH (Shoji *et al.*, 1993). En los suelos analizados la CIC varía de baja a media (5.1 a 20.2 cmol(+) kg⁻¹) valores atribuidos al alofano y la materia orgánica, estos valores son semejantes a los reportados por Pinochet *et al.*(2005), Cruz y Geissert (2000) en suelos derivados de ceniza volcánica. La saturación de bases varía de 29.8 al 80 %, los valores más altos se encuentran en las zonas bajas y en los suelos enterrados de los sitios altos (Figura 24).

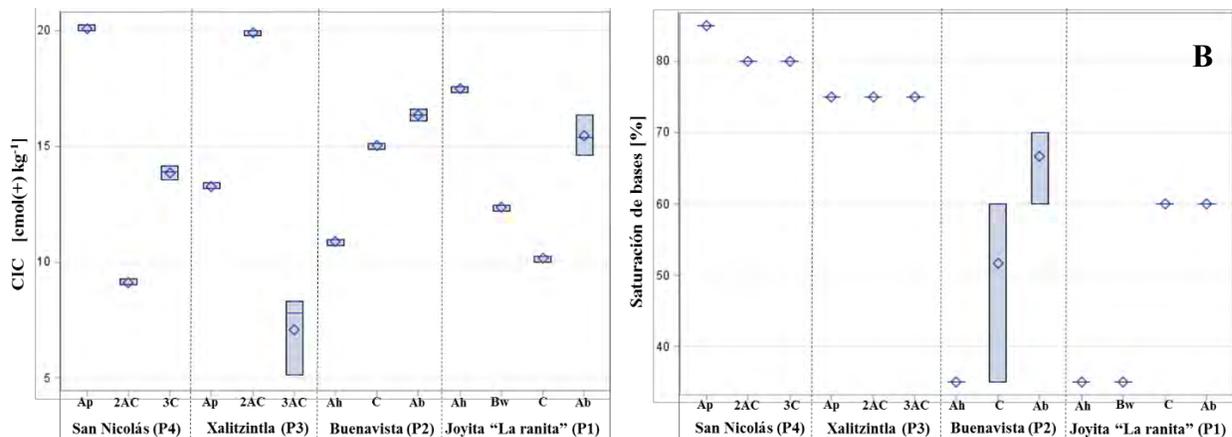


Figura 24: Capacidad de intercambio catiónico por horizonte. B) Porcentaje de saturación de bases por horizonte

El pH medido en fluoruro de sodio (NaF 1N) es un método desarrollado por Fieldes y Perrot (1966 en Reeuwijk, 2003) para determinar el contenido de minerales no cristalinos. Este test se basa en la propiedad de los alofanos para producir una reacción alcalina con fluoruro de sodio, esto se debe a que estos minerales poseen una elevada cantidad de grupos hidroxilo cuya presencia puede ser testada a través de una reacción de intercambio con aniones fluoruro (Egawa *et al.*, 1960 en Gaitán

y López, 2007), cuando el pH es mayor a 9.4, sin embargo numerosos trabajos (Mizota, 1982; Mizota y Reeuwijk, 1989; Alves y Lavorenti, 2004) han demostrado que esta prueba no es específica para alofano, si no que permite detectar óxidos amorfos de aluminio en general.

Los resultados del pH medido en NaF 1N variaron de forma significativa entre perfiles, se obtuvieron valores de 9.2 a 11.6 en andosoles, aunque se sugiere realizar esta prueba en campo para reconocer suelos volcánicos (Siebe *et al.*, 2006), los resultados obtenidos son cualitativos y la prueba no está considerada como criterio para identificar andosoles (Ping *et al.*, 1989; Nizeyimana, 1997). Los resultados para los fluvisoles varían de 7.5 a 9.5. Estos resultados indican que en el andosol ribereño de Buenavista la presencia de alofano y la formación de complejos humus-Aluminio (Gaitán y López, 2007; Alvarado y Buol, 1985). Mientras que en el andosol de la Joyita los valores superiores a 9.4 indican la presencia de ceniza volcánica y/u óxidos amorfos de Al (Mazzarino *et al.*, 1985). Mientras que en los fluvisoles de Xalitlitzintla y San Nicolás los resultados señalan la presencia de alofano de manera incipiente (Figura 25)

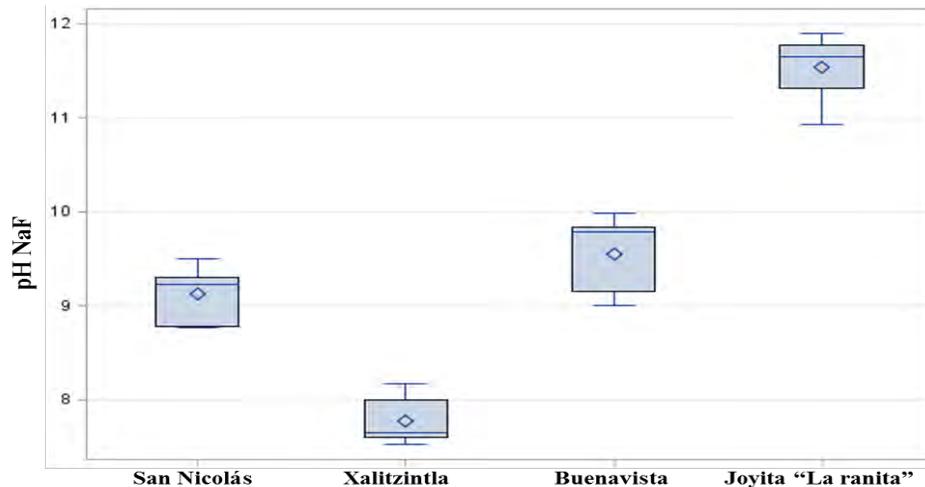


Figura 25: Variación del pH medido en NaF por sitio.

La relación entre el pH medido en NaF y retención de fósforo había sido establecida con anterioridad por muchos autores, entre los que destacan Alvarado y Buol (1985); Campos *et al.* (2001) y Alves y Lavorenti (2004) que han establecido, en andosoles tropicales y andosoles no vítricos, que los valores de pH medido en NaF después de 2 minutos mayores de 9.4 están asociados a valores altos de retención de fósforo.

En este estudio se encontró una alta correlación ($p \leq 0.05$) entre el pH medido en NaF y la retención de fósforo, Alvarado (1982 en Mazzarino *et al.*, 1985) reporta para andosoles de Guatemala y Costa Rica, que valores mayores a 10.7 indican una fijación de P de más del 90 %, aunque en este trabajo los valores mayores a 10,7 se relacionan con una fijación de P del 75 %, pero es bien sabido que los andosoles menos alterados, o vítricos, tienen una menor capacidad para retener fósforo (Shoji *et al.*, 1993). No obstante Zapiola y Frugoni (2004) menciona que el pH en NaF que se relaciona mejor con la RF es el medido después de 60 minutos, en la figura 26 se puede observar que a medida que los valores de pH medido en NaF después de 60 minutos aumentan, también lo hace el porcentaje de retención de fósforo, lo que coincide con lo reportado por Mazzarino *et al.* (1985) y Zapiola y Frugoni (2004).

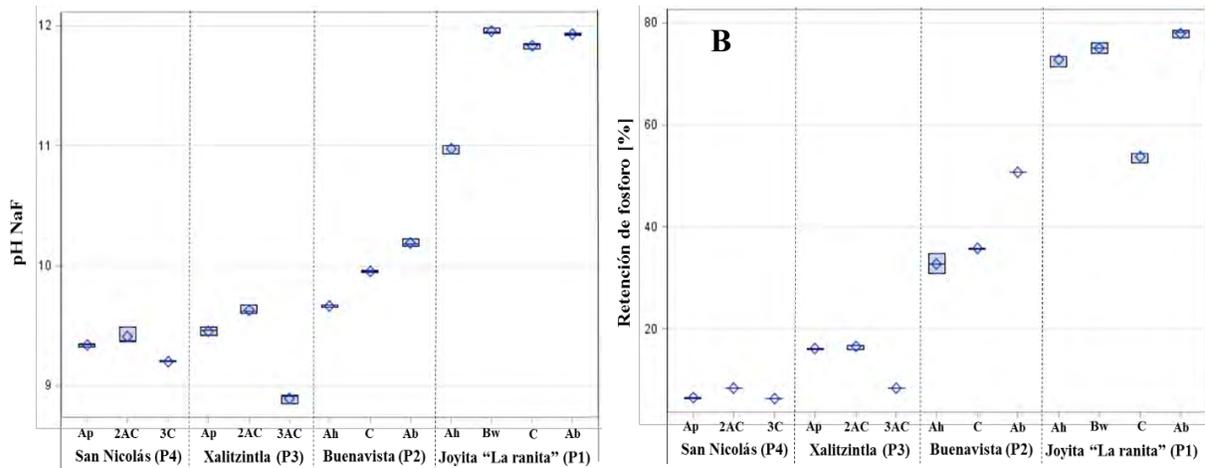


Figura 26: A) pH medido en NaF después de 60 minutos. B) Porcentaje de retención de fósforo por horizonte.

Gaitán y López (2007) y Zapiola y Frugoni (2004) relacionan el incremento de este parámetro con el clima (principalmente la precipitación) y grado de alofanización del suelo, ya que el régimen de humedad tiene una influencia importante sobre los procesos de formación de minerales no cristalinos, bajo un régimen de humedad údico predominan la formación de minerales no cristalinos y en condiciones xéricas se promueve la formación de minerales cristalinos (Shoji *et al.*, 1993; Delmelle *et al.*, 2005). En este sentido se explicaría la correlación altamente significativa entre variables como la altitud, el pH medido en NaF, la textura del suelo (principalmente el porcentaje de arcillas) y la retención de fósforo. En el sitio de mayor altitud, La joyita, con un régimen de humedad údico se favorecería una mayor formación de minerales no cristalinos, contribuyendo a un mayor porcentaje de fijación de P.

10.3. Caracterización de los suelos ribereños.

En estos ambientes el desarrollo del suelo es muy variable, pues están sometidos a continuos procesos de erosión y sedimentación causados por las inundaciones, creando un complejo mosaico en las características del suelo en las planicies de inundación (Kovalchik y Clausnitzer, 2001; María, 2011; Lewis *et al.*, 2013)

Con el muestreo del suelo ribereño a través de barrenaciones a diferentes distancias del río (1, 3 y 5 m) se observó que el desarrollo de los suelos puede ser muy variable, en gran parte gracias al microrelieve local y la presencia de vegetación que controla los procesos de erosión y sedimentación, que crean condiciones diferentes en las planicies de inundación. De forma tal que en los sitios altos como la Joyita y Buenavista, en las zonas de inundación del cauce que van de 1 a 3 m, se forman fluvisoles cuyo material parental es la roca madre y en los sitios adyacentes se desarrollan los andosoles vítricos (Figura 27). Mientras que en los sistemas ribereños de las zonas bajas los suelos dominantes son los fluvisoles, cuyo componente mineral son los sedimentos depositados por el río y los aportes de material de las laderas adyacentes (material coluvial). De modo que los suelos ribereños tienden a ser muy heterogéneos

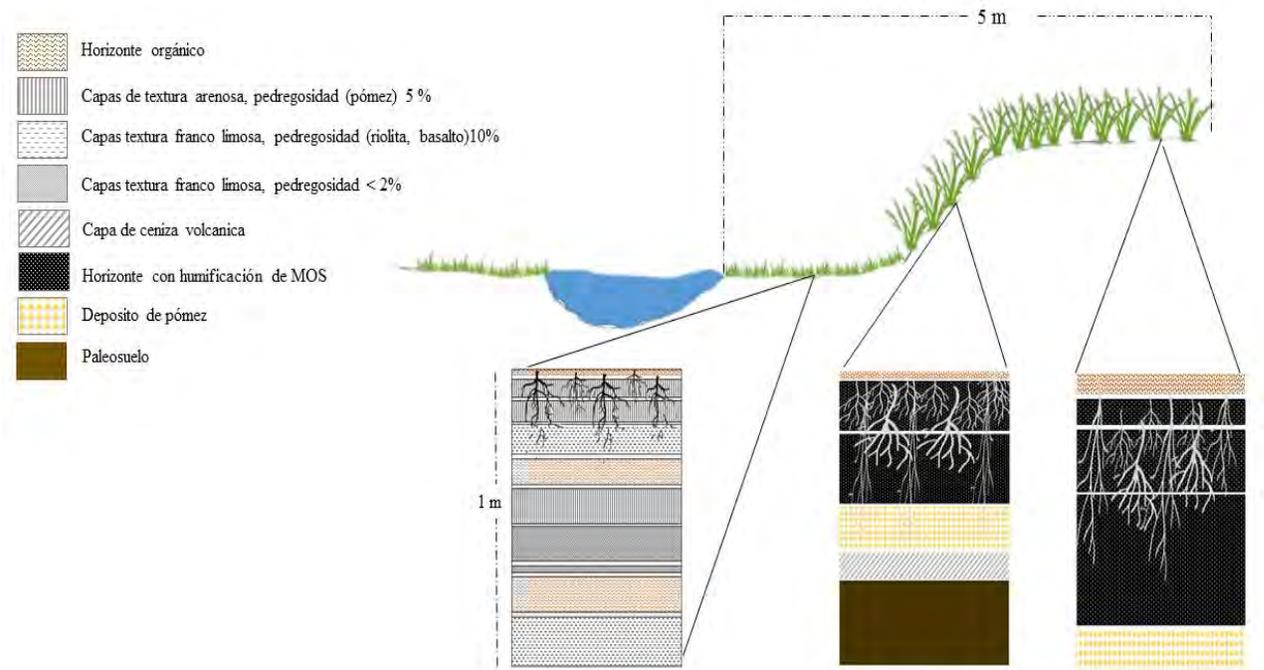


Figura 27: Variación de las características del suelo mientras se aleja de la corriente, el caso de la Joyita "La Ranita"

Es por ello que la vegetación ribereña, sobre todo en las zonas de inundación es fundamental en los sistemas fluviales, pues controlan la geomorfología del corredor el río a través de una serie de procesos hidráulicos, sedimentológicos y biológicos. Los cambios causados por la remoción de la vegetación y la introducción de plantas exóticas, pueden dar lugar a cambios en el régimen de río, alterar los procesos de sedimentación, acelerar la erosión y modificar la disponibilidad de nutrientes, afectando la biodiversidad nativa (Sweeney, 1993; Ceccon E. 2003; Kovalchik, y Clausnitzer, 2001; Meier *et al.*, 2013).

En sitios como Xalitzintla y San Nicolás, el detrimento de la vegetación ribereña y la compactación superficial del suelo incrementan la escorrentía y aceleran la erosión del suelo ribereño y las orillas del cauce, incrementan la carga de sedimentos que se aportan al río y que se transportan aguas abajo; lo que trae como consecuencia el riesgo de inundaciones, azolve y contaminación de aguas superficiales, lo que ha sido estudiado ampliamente por Rijdsdijk *et al.* (2006) en riberas fluviales degradadas de alta y media montaña como Xalitzintla y San Nicolás, que en este caso, son el principal factor de contaminación de nutrientes, en particular P. Lo que coincide con lo reportado por Lyons *et al.* (1998) y Schindler (1977) que encontraron que las malas prácticas agrícolas en las partes altas de la cuenca son la principal fuente de contaminación de P en los cuerpos de agua dulce y el aumento de la carga de P en estos ecosistemas a menudo conduce a la eutrofización acelerada (Wetzel, 1983 en Lyons, et al., 1998). Aunque las franjas ribereñas actúan como un amortiguador absorbiendo nutrientes, contaminantes y reteniendo sedimentos, zonas como Xalitzintla y San Nicolás, en donde la franja de vegetación ribera se ve reducida (1 a 3 m) no pueden cumplir con estas funciones.

Por otra parte, la profundidad de desarrollo de los suelos ribereños es significativamente ($p \leq 0.05$) más profunda mientras se aleja del río (Figura 28). En las franjas cercanas a la corriente (zonas de anidación) el horizonte Ah (si está presente) es de poco espesor, en zonas conservadas (La Joyita y Buenavista) el establecimiento de vegetación en el cauce y las zonas de inundación permite la estabilización del cauce, de sedimentos y la formación de suelo (María, 2011; Kovalchik y Clausnitzer, 2001). En periodos de abundante precipitación la gran carga de sedimentos interrumpe el proceso de formación del suelo iniciado uno nuevo sobre el enterrado (Figura 28), mientras que en las franjas de tres a cinco metros la profundidad de los horizontes Ah depende en gran medida

de la pendiente, además también se observó que los suelos en la exposición umbría son más profundos que la exposición solana (Figura 29, gráfica A).

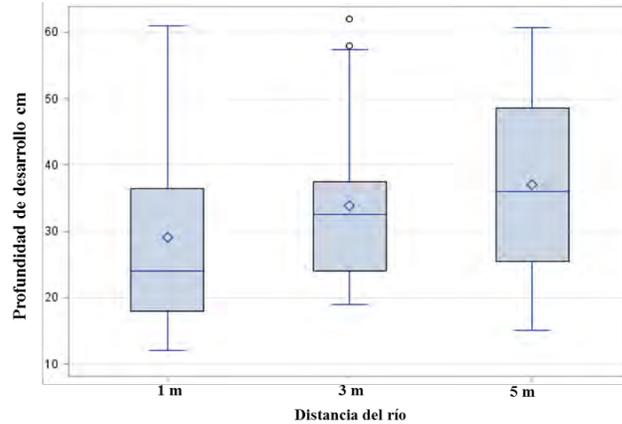


Figura 28: Variación de la profundidad de desarrollo del suelo en las franjas estudiadas.

La distancia del río también afecta de manera significativa los contenidos de MOS en el suelo superficial. En las zonas conservadas los valores más bajos se registraron a un metro de distancia del río, esto debido al lavado y aporte de sedimentos minerales que tienen lugar en el sitio (Lewis *et al.*, 2003) y aumentan mientras con la distancia. Mientras que en los sitios con algún grado de perturbación como Xalitzintla y San Nicolás, los contenidos más altos de MOS se localizan en la franja más cercana al río, zonas que aún conservan vegetación, y disminuyen a medida que se apartan del cauce (Figura 29).

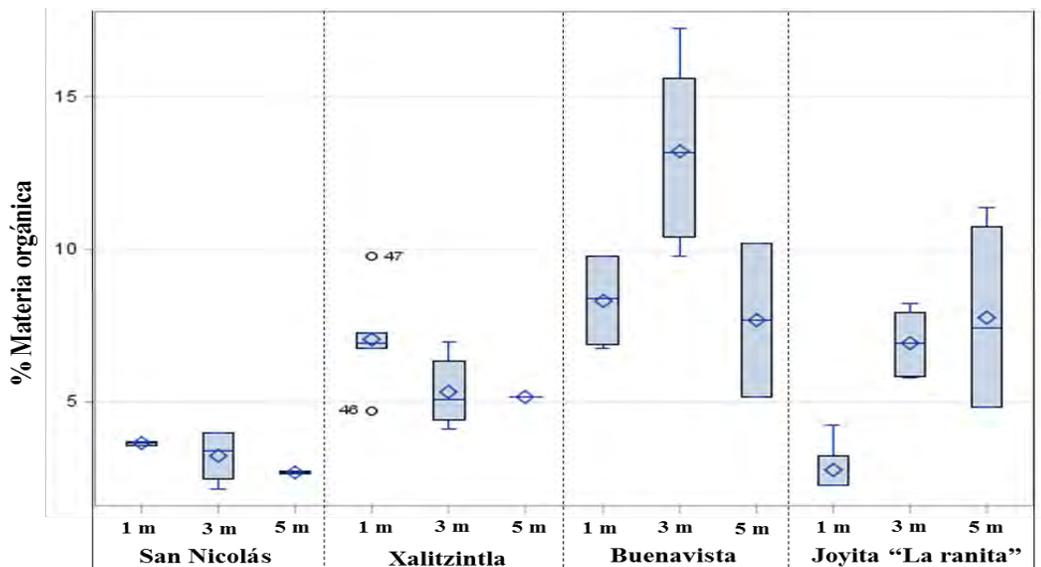


Figura 29: Variación de la materia orgánica respecto a la distancia del cauce en suelo superficial ribereño.

El contenido de materia orgánica en la exposición umbría es significativamente más alto que en la exposición solana ($p \leq 0.05$). Blanco y Senciales (2001) y Reyes *et al.*, (2011) encontraron que la exposición afecta los contenidos de materia y carbono orgánico en el suelo, principalmente por la radiación recibida y la humedad del suelo que influyen en la cantidad de biomasa generada por las plantas. De modo tal que en la exposición umbría hay un mayor contenido de materia orgánica y los suelos suelen ser más profundos, como consecuencia del aporte de MO y el efecto protector de la vegetación ante la erosión (Figura 29).

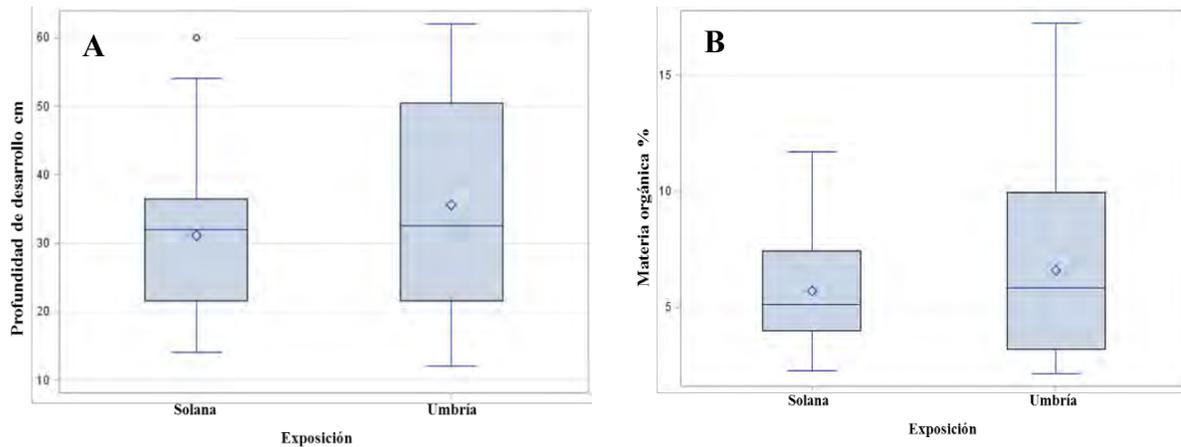


Figura 30: A) Profundidad media del suelo por exposición. B) Porcentaje de materia orgánica por exposición.

10.4. Uso actual y potencial de los suelos ribereños

Como ya se ha señalado anteriormente las franjas ribereñas juegan un papel importante en la conformación de los ecosistemas fluviales, influyen entre otras cosas en la complejidad del hábitat, la biodiversidad y los flujos de energía y nutrientes (Naiman *et al.*, 1988; Sweeney, 1993). Las funciones ecológicas que desempeñan estas zonas se pueden agrupar en tres categorías: a) hidrología y dinámica de sedimentos, b) biogeoquímica y ciclo de nutrientes, y c) hábitat y mantención de redes tróficas (Möller, 2011). Pero la utilización intensiva de los ríos pone en riesgo la integridad ecológica, en cuanto a la calidad y el funcionamiento del sistema ribereño asociado a la corriente superficial. En los sitios de estudio los efectos más notables son la pérdida de la calidad del agua, la belleza escénica y la presencia de plantas indicadoras de perturbación.

En la figura 30 se muestra el mapa del uso actual del suelo en la zona de estudio, en donde se puede ver que dentro del área del Parque Nacional predominan la pradera de alta montaña y los bosques

de pino y oyamel. Mientras que en los límites de esta Área Natural Protegida y la zona de influencia predominan los pastizales inducidos, bosques con vegetación secundaria y zonas de agricultura de temporal. Mientras que en la figura 31 se muestran los tipos de suelo presentes en el área.

Dentro del polígono del Parque Nacional y su zona de influencia la pradera de alta montaña y los bosques de pino se desarrollan principalmente sobre andosoles y leptosoles. En los sistemas ribereños de La Joyita y Buenavista, estos suelos se caracterizan por ser ricos en materia orgánica, estructura bien desarrollada, con densidades aparentes bajas, buena retención de agua disponible para las plantas y alta conductividad hidráulica y retención de fósforo. En estas zonas nacen una gran cantidad de arroyos y escurrimientos que alimentan varias de las corrientes principales del declive oriental, es por ello que estos sitios (y los sistemas ribereños similares en este intervalo altitudinal) cobra mayor valor al ser zonas de captación y provisión de agua hacia las zonas bajas.

Sin embargo dentro del Parque Nacional, el turismo descontrolado, la construcción de senderos, albergues, comedores y antenas promueve la permanencia de coberturas distintas a la natural dentro de esta Área Natural Protegida. Mientras que el crecimiento de la población al rededor del Parque y la creciente demanda de recursos ha generado cambios en la cobertura/uso de suelo en esta región, pues como se puede ver en la figura 30, en los límites del Parque se puede encontrar zonas de pastizal inducido y cultivo de temporal, como consecuencia de la ganadería extensiva, la expansión de la frontera agrícola y crecimiento del uso de suelo urbano.

En las zonas bajas de Xalitzintla y San Nicolás de los Ranchos la agricultura de temporal anual y permanente se lleva a cabo en suelos de texturas gruesas (arenosoles, fluvisoles y cambisoles) con pendientes de entre el 12 y el 6 %. En los sitios de estudio estos suelos tienen un horizonte A incipiente, con un bajo contenido de materia orgánica, baja retención de agua disponible para las plantas y alto porcentaje de pedregosidad y susceptibilidad a la erosión. Las diversas actividades antrópicas en estos sistemas ribereños se traducen en pérdida de la vegetación ribereña, disminución de la estabilidad de los agregados y la porosidad, alto contenido de fósforo, compactación superficial del suelo que disminuye la infiltración y aumenta la escorrentía, erosión del suelo y contaminación del agua.

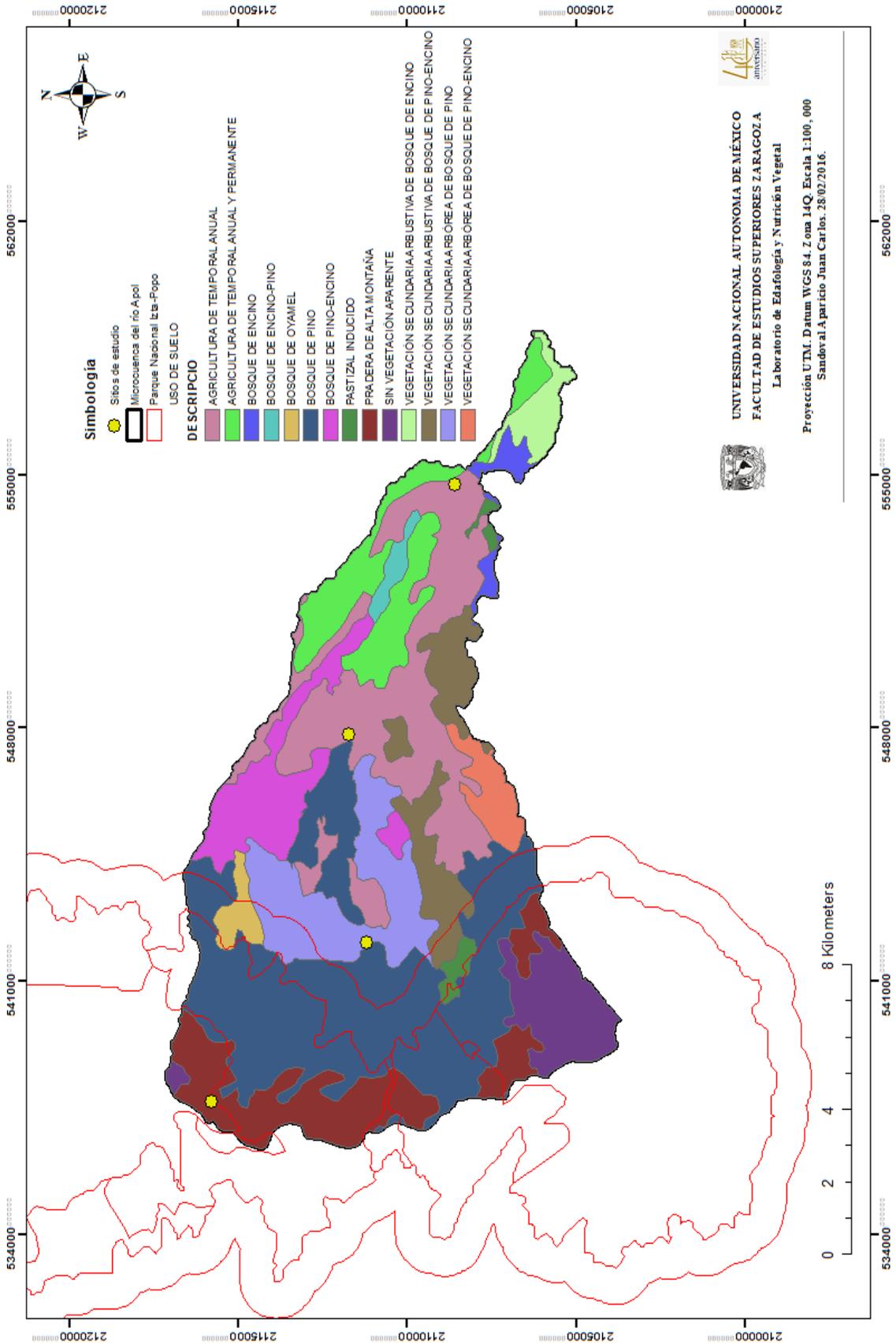


Figura 31: Uso de suelo en la zona de estudio.

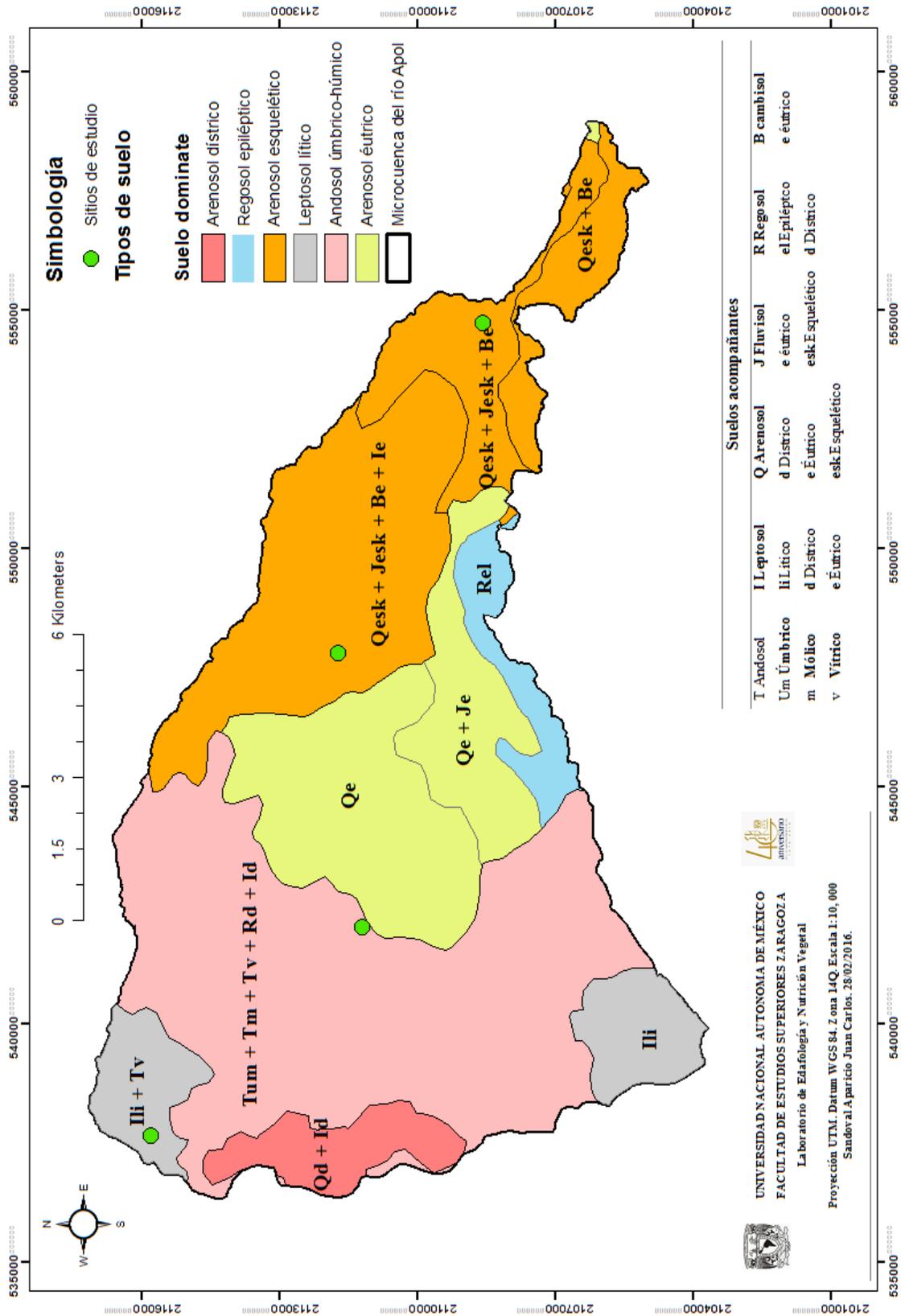


Figura 32: Tipos de suelo presentes en la microcuena del río Apol

Tomando en cuenta lo anterior el uso actual de los suelos ribereños no es el más apropiado de acuerdo a sus características físicas y químicas, y entre los usos potenciales de estos suelos se destacan:

Como archivos naturales del paisaje: El estudio de los perfiles de suelo y los paleosuelos, son una herramienta eficiente para la reconstrucción paleoambiental y la evaluación de los periodos de estabilidad-inestabilidad del paisaje (Jasso *et al.*, 2006). Los diversos depósitos fluviales, coluviales y de materiales volcánicos encontrados en los sitios de estudio se pueden interpretar mediante los métodos de la geomorfología, paleoedafología, sedimentología y la cronoestratigrafía, que brindan información sobre los cambios y las condiciones ambientales durante periodos determinados (Schulte, 2000). Esta perspectiva histórica es básica para entender y evaluar la dinámica de los sistemas fluviales y la relevancia de estos estudios para un público más amplio radica en la obtención de información sobre las crecidas e inundaciones para responder a preguntas como: ¿Qué magnitud y que frecuencia han tenido las avenidas torrenciales del pasado? ¿Qué áreas en los fondos de valle fueron afectadas? ¿Coinciden con asentamientos humanos y construcciones? ¿Qué importancia tiene el impacto humano y el uso del suelo sobre la dinámica del río?

Como reservorio de carbono: El suelo es el principal reservorio de C en los ecosistemas terrestres y los suelos volcánicos tienen un gran potencial de almacenamiento de carbono orgánico, lo cual se explica por la estabilización de la materia orgánica con minerales de bajo orden estructural y por la formación de complejos órgano-metálicos estables con la materia orgánica lo que la hace altamente resistente a la descomposición (Wagai, *et al.*, 2015; Karlen y Andrews, 2000 en Galicia *et al.*, 2015). En los sistemas ribereños estudiados el COS varía de 30.3 hasta 135 t ha⁻¹ lo que da un promedio aproximado de 120 t ha⁻¹ dentro de los primeros 20 centímetros de suelo, encontrándose las cantidades más altas en suelos forestales en comparación con los suelos de uso agrícola, pecuario y urbano, además superan a los suelos no ribereños de sitios adyacentes a ellos hasta en más del 20 % en sus contenidos de CO (Sandoval *et al.*, 2016) lo que les confiere un gran potencial para la adaptación y mitigación del cambio climático.

Como zonas de amortiguamiento y conservación de recursos naturales: Como se ha mencionado anteriormente, las zonas ribereñas son zonas altamente dinámicas que brindan diversos servicios ambientales. Según Cooper *et al.* (1995) la gestión adecuada de las áreas

ribereñas ofrece una estrategia para amortiguar las corrientes de una gran variedad de impactos derivados del uso del suelo, y permite un uso más amplio de las tierras adyacentes.

Diversos estudios han demostrado que la sustitución de la vegetación nativa por la agricultura, pastizales inducidos para ganadería y la urbanización ocurren usualmente sin considerar la protección de la zona ribereña, lo que generalmente conlleva a la contaminación de las corrientes superficiales, erosión del suelo, pérdida de la biodiversidad y aumento en el peligro de inundaciones (Cooper *et al.*, 1995; Moller, 2011; Meier *et al.*, 2013). Es por esto que diversos países han centrado sus esfuerzos en la rehabilitación y separación de las áreas ribereñas de las áreas de uso agrícola y ganadero, esta estrategia de retirada de tierras ribereñas ha sido usualmente beneficiosa para las corrientes agrícolas de agua (Williams *et al.*, 2003; Rijdsijk *et al.*, 2006)). Es por ello que la conservación de los sistemas ribereños de las zonas altas y la recuperación y restauración de las franjas de vegetación ribereñas de las zonas bajas son una tarea prioritaria, ya que el manejo adecuado de estas zonas es esencial para el mantenimiento de la calidad del agua y la conservación de la biodiversidad. Lo que puede lograrse mediante el establecimiento de lo que Gayoso y Gayoso (2003) y Williams *et al.* (2003) denominan zonas de manejo del cauce (ZMC). Cuyo aspecto central consiste en la protección de una franja de vegetación a lo largo de los márgenes de las corrientes en las que se restringen actividades que producen suelo desnudo (caminos, terrazas, senderos, preparación mecánica del sitio, etc.).

Pero el establecimiento de ZMC se deben hacer basado en las condiciones específicas de cada sitio (pendiente, edad y condición de la vegetación, geomorfología del sitio, especies de animales y plantas presentes, etc.) (Gayoso y Gayoso, 2003), pero sobre todo hay que tener en cuenta las consideraciones económicas y sociales que esto conlleva. Es muy claro que estas franjas ofrecen múltiples beneficios a la sociedad, por lo tanto tienen un valor económico, y ya que estos beneficios son generalmente difíciles de cuantificar, puede que la sociedad no esté dispuesta a dar una compensación por el servicio ambiental que recibe.

Pero está demostrado que la conservación de estas zonas ecológicas conlleva muchos beneficios y en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia, la conservación y restauración de las franjas de vegetación ribereña, acompañado de acciones que promuevan el uso adecuado de los recursos naturales, conllevaría la creación de corredores biológicos que impidan

la fragmentación del hábitat, y más importante, la zona ripiara podría cumplir con la función de amortiguador de contaminantes y sedimentos provenientes de las actividades agrícolas y las zonas urbanas para contribuir a mantener la cantidad y calidad del agua, un recurso escaso y valioso para las comunidades cercanas quienes hacen uso de ella para diferentes actividades económicas y de la vida diaria.

11 CONCLUSIONES

Los suelos ribereños de un sistema fluvial permanente en el Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia se han formado de materiales piroclásticos recientes, materiales aluviales y coluviales de origen volcánicos, que difieren en su composición química y grado de intemperismo, sobre todo en su contenido de minerales de bajo orden estructural.

Con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo WRB, se identificaron andosoles vítricos a mayor altitud en La Joyita “La Ranita” y Buenavista, estos suelos son suelos jóvenes y se han desarrollado a partir de depósitos de pómez similares (depósitos de 5000 años). En los sistemas ribereños de las zonas bajas, Xalitzintla y San Nicolás dominan los fluvisoles formados a partir de depósitos aluviales y coluviales recientes.

Los suelos ribereños estudiados difieren en sus características morfológicas, físicas y químicas por la influencia del régimen de humedad del suelo, la precipitación, la temperatura, el tipo de vegetación, la topografía local y el uso de suelo.

Los procesos pedogenéticos más importantes que se presentan en los suelos ribereños a lo largo de la asociación de suelos, son la acumulación de materia orgánica, la formación de estructura granular, formación de minerales de bajo orden estructural, formación y lixiviación de bases intercambiables.

La formación del suelo en las zonas de inundación es muy dinámica y se ve favorecida por la presencia de vegetación, principalmente plantas herbáceas que estabilizan los sedimentos.

Los suelos ribereños son delgados y su profundidad de desarrollo se incrementa con la distancia del río.

Los suelos ribereños de sistemas degradados tienen un menor contenido de carbono y materia orgánica que los sistemas conservados. Los contenidos de carbono más grandes, en los sistemas ribereños inmersos en núcleos urbanos y agrícolas, se encuentran a un metro del río, zona que conserva relictos de vegetación ribereña, mientras que a tres y cinco metros el valor de este parámetro decrece a consecuencia de la eliminación de la vegetación ribereña.

En los sistemas ribereños de Xalitzintla y San Nicolás las diversas actividades antrópicas provocan la compactación de los horizontes superficiales, degradación de la estructura y erosión del horizonte Ah, alto contenido de fósforo y la pérdida de carbono orgánico.

En sitios poco alterados como La joyita “la Ranita” y Buenavista, las principales amenazas de los sistemas ribereños son el turismo descontrolado, la apertura de senderos y caminos y la extensión de la frontera agrícola y urbana.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, A., y Ferrera C, R. 2001. La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia Ergo Sum*, 8 (2): 175-183.
- Alcalá, M., Ortiz S, C., y Gutiérrez C, Ma del C. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra* vol. 19 (3): 227-239.
- Allan, J. 2004. Landscapes and Riverscapes: The influence of Land use on Stream Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35:257-284.
- Alvarado, A., y Buol, S. 1985. Field estimation of phosphate retention by Andepts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:911-937.
- Alves, M.E., y Lavorenti, A. 2004. Remaining phosphorus and sodium fluoride pH in soils with different clay contents and clay mineralogies. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39: 241-246
- Arana, A., Siebe, C., y Macias, J. 2010. Dynamics of the ca. 4965 yr 14C BP “Ochre pumice” Plinian eruption of Popocatepetl volcano. Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 192: 212-231.
- Arias J, A.C. 2001. Suelos tropicales. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 188 p.
- Barois, I., Dubroeuq, D., Rojas, P., y Lavelle, P. 1998. Andosol-forming process linked with soil fauna under the perennial grass *Mulhembergia macroura*. *Geoderma*, 86(3-4): 241-260.
- Bautista, G., Maldonado, D., y Zinck, A. 2012. La clasificación Maya de suelos. Ciencia y desarrollo, CONACYT. Julio-Agosto. En <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/260/articulos/clasificacion-maya-suelos.html>
- Blanco S, R., y Senciales G, J.M. 2001. La influencia de los factores formadores en las variaciones de las características y propiedades de los suelos de los montes de Málaga. *Universidad de Málaga, Bioética, estudios de arte, geografía e historia*, 23: 9-24.
- Bockheim, J.G., y Gennadiyev, A.N. 2000. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma* (95): 53.72.
- Broquen, P., Lobartini, J.C., Candan, F., y Falbo, G. 2004. Allophane, aluminum, and organic matter accumulation across a bioclimatic sequence of volcanic ash soils of Argentina. *Geoderma* 129: 167-177.
- Buol, S.W.; Hole, F.D., y Mc Cracken, R.J. 1990. Génesis y clasificación de suelos. Trillas.
- Campos C, A., Oleschko, K., Cruz H, L., Etchevers B, J.D., Hidalgo M., C. 2001. Estimación de alofano y su relación con otros parámetros químicos en andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *Terra* 19: 105-116.
- Ceccon E. 2003. Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. *Ciencias* 72, octubre-diciembre, 46-53
- Colli C., P.M., 2015. Actividades arilsulfatasa y ureasa en la fertilidad de suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM. México.
- CONANP. 2015. <http://iztapopo.conanp.gob.mx/>. Consultado el 27 de agosto de 2015.

- Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., y Quiñones, L. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, abril-junio, 5-71
- Cruz F, G. 2006. *Ecología del suelo: un enfoque hacia la nutrición mineral de las plantas superiores*. UNAM, México. 105 pp.
- Cruz F., G., Guerra H, E.A., y Ángeles C., E.R. 2009. Descripción de las propiedades físicas y químicas de agua y suelo en ambientes riparios en la exposición occidental del PN Izta-Popo. CAMAFU
- Cruz-Flores G., y Guerra-Hernández, E.A.. 2014. Guía práctica para la descripción ecológica de los ambientes ribereños. Material didáctico. Línea de investigación. Carrera de Biología. FES Zaragoza, UNAM.
- Cruz H, L., y Geissert K, D. 2000. Carga eléctrica de los andosoles del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Terra*, 18 (2): 115-124.
- Cuanalo de la C., H. 1981. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 2ª Ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 40 p.
- Delmelle, P., Opfergelt, S., y Cornelis, J. 2015. Volcanic Soils. En: H. Sigurdsson, ed., *The Encyclopedia of Volcanoes* (p.1253-1264), 2nd ed . New York: Academic Press.
- Duch Gary, J. 2004. La nomenclatura maya de los suelos: una aproximación a su diversidad y significado en el sur del estado de Yucatán. *Revista de Geografía Agrícola* núm. 34, pp. 55-74
- Duchaufour, P. 1994. *Edafología*. Masson, s.a. Barcelona. 493 pp.
- Duque Z, J.R., Arbelàes M, S.P., Jaramillo, D.F., y León P, J.D. 2004. Hidrofobicidad en andosoles bajo roble (Quercus humboldtii) y plantaciones forestales (Pinus patula y Cupressus lusitanica) en la cuenca de la quebrada cantos blancas (Medellín, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 57(2).
- Espinosa S., J.A., y Rubiano S., Y. 2015. Procesos específicos de formación en andosoles, alfisoles y ultisoles en Colombia. *Revista EIA*, Junio-Sin mes, 85-97.
- FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos. Roma. 98 pp.
- FAOa. 2015. Clasificación de suelos. En: <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/clasificacion-de-suelos/es/>. Consultado el 27 de agosto de 2015.
- FAOb. 2015. Planificación y realización de un levantamiento de suelos. Consultado en: ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s02.htm
- FAOc. 2015. Colección de Infografías de la FAO. En: <http://www.fao.org/resources/infographics/es/>
- Ferro V., M.C. 2011. Modificación de las propiedades ándicas en dos suelos desarrollados sobre anfibolitas. Trabajo de investigación tutelado doctoral. Facultad de Biología de la Universidad de Santiago de Compostela
- Flores P., S. 1977. Caracterización y clasificación de algunos suelos del bosque amazónico peruano, Iquitos. Tesis de maestría. Universidad de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica.
- Gaitán, Juan José, & López, Carlos Rodolfo. (2007). Análisis del gradiente edáfico en la región Andinopatagónica. *Ciencia del suelo*, 25(1), 53-63.

- Galicia L., A. Gamboa, S. Cram, B. Chávez, V. Peña, V. Saynes, C. Siebe. 2015. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29.
- Gama C., J.E., Carreón F., D., Palacios M., S., y Solleiro R., E. 1999. Génesis, identificación y uso de los suelos de México: Distribución, propiedades, clasificación y manejo de suelos residuales y transportados con aplicaciones a la Ingeniería Civil. Instituto Mexicano del Transporte e Instituto de Geología. UNAM. México.
- Gavande S.A. 1979. Física de suelos, principios y aplicaciones. Ed. Limusa. México.
- Gayoso J., y Alarcón, D. 1999. Guía de conservación de suelos forestales. Proyecto de certificación del manejo forestal en las Regiones Octava, Décima y Duodécima. Valdivia, Chile. 96 p.
- Gayoso J., y S. Gayoso. 2003. Diseño de zonas ribereñas: requerimiento de un ancho mínimo. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 12 p.
- Granados-Sánchez, D.; Hernández-García, M. A.; López-Ríos, G. F. 2006. Ecología de las Zonas Ribereñas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 55-69.
- Grunwald, S. 2015. Soils. Soil and water science department, University of Florida. En: <https://soils.ifas.ufl.edu/faculty/grunwald/teaching/eSoilScience/introduction.shtml>
- Guevara, G., Reinoso, G., García, J.E., Franco, L., García, L.J., Yara, D.C., Briñez, N., Ocampo, M., Quintana, M.I., Pava, D.Y., Flórez, N.Y., Ávila, M.F., Hernández, E.E., Lozano, L.A., Guapucal, M., Borrero, D.A., y Olaya, E.J. 2008. Aportes para el análisis de ecosistemas fluviales: una visión desde ambientes ribereños. *Revista Tumbaga* 3: 109-127.
- Hasinur-Rahman, M., Okubo, A., Sugiyama, S., y Mayland, H.F. 2008. Physical, chemical and microbiological properties of an Andisol as related to land use and tillage practice. *Soil & Tillage Research* 101: 10–19
- Hernández, A., Ascanio, M.O., Morales, M., Bojórquez. J.I., Garcia, N.E., y García, J.D. 2006. El suelo: fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. Universidad Autónoma de Nayarit.
- Hernández-García, M. A.; Granados-Sánchez, D. 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, julio-diciembre, 101-109.
- IEC. 2016. Información de suelos, para qué? Instituto de Estudios Catalanes. Barcelona, España. En <http://www.iec.cat/mapasols/Cas/Informacio.asp?Grup=B&Opcio=6>
- ISRIC, 2016. World Reference Base for Soil Resources (WRB). World Soil Information. En: <http://www.isric.org/projects/world-reference-base-soil-resources-wrb>.
- IUSS Grupo de trabajo WRB. 2015. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jackson M.L. 1982. Análisis químico se suelos. Ed. Omega. Barcelona, España.
- Jackson, R.T. 1976. Análisis químico de suelos, 3rd edn. Edición omega, Barcelona, España.
- Jaramillo J.,F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Medellín.

- Jaramillo, D.F. 2003. Efecto de dos temperaturas de secado del suelo sobre la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. Informe de Investigación. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Geociencias.
- Jaramillo, D.F., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., y Hendrickx, J.M. 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology*, 231-232: 105-111.
- Jasso C, C. Sedov, S. Solleiro, E., y Gama, J.E. 2006. Paleosuelos: índices del paleoambiente y de la estabilidad del paisaje del Nevado de Toluca. *Terra Latinoamericana*, 24: 151-161.
- Jiménez, R. 2013. Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados.
- Kang, B.T., y Tripathi, B. 2015. Technical paper1: Soil classification and characterization. En <http://www.fao.org/wairdocs/ilri/x5546e/x5546e04.htm>
- Klapproth, J., y Johnson, J. 2009. Understanding the Science Behind Riparian Forest Buffers: Effects on Plant and Animal Communities. Blacksburg. Virginia Polytechnic Institute and State University. Publication 420-152.
- Kovalchik, B.L., y Clausnitzer, R.R. 2001. Classification and Management of Aquatic, Riparian and Wetland Sites on the National Forests of Eastern Washington (Part 1: The Series Descriptions). Final Draft. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Region. 537 pp.
- Lewis, L., Clark, L., Krapf, R., Manning, M., Staats, J., Subirge, T., Townsend, L., y Ypsilantis, B. 2003. Riparian area management: Riparian wetland soils. Technical Reference 1737-19. Bureau of Land Management, Denver, CO.
- Llona, M., Araya, J., y Vera, W. 2007. Relación entre morfogénesis y pedogénesis en la cuenca del río Clarillo, Región Metropolitana de Santiago, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (37), 47-61
- Lyons, J.B., Gorres, J.H., y Amador, J.A. 1998. Spatial and temporal variability of phosphorus retention in a riparian forest soil. *J. Environ. Qual.*, 27: 895-903.
- Macías, J.L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los volcanes activos de México. *Boletín de la sociedad geológica Mexicana*. LVII (3): 379-424.
- Manci, K.M. 1989. Riparian ecosystem creation and restoration: a literature summary. U.S. Fish and Wildlife Service Biological Report 89(20), 59 p.
- Mazzarino, M.J., Kass, D., y Jiménez, M. 1985. Utilidad de distintas formas de evaluación de las isotermas de sorción de fósforo y factores ligados a la retención del mismo en algunos suelos tropicales. *Ciencia del suelo*, Vol. 3, N° 1-2: 43-52.
- Meier, C., Reid, B.L., y Sandoval, O. 2013. Effects of the invasive plant *Lupinus polyphyllus* on vertical accretion of fine sediment and nutrient availability in bars of the gravel-bed Paloma river. *Limnologia*, 43: 381-387.
- Miehlich, G. 1980. Los suelos de la Sierra Nevada. Suplemento comunicaciones. Fundación alemana para la investigación científica. México. 211 pp.
- Mikkelsen, K., y Vesho, I. 2000. Riparian soil: A literature review. Center for streamside studies, Universidad de Washington. En:

<https://digital.lib.washington.edu/researchworks/bitstream/handle/1773/17038/Riparian%20Soils%20Literature%20Review.pdf?sequence=1>

- Mizota, C., y Reeuwijk V., L.P. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soil formed in volcanic material in diverse climatic región. International soil reference and information centre. Soil Monograph 2.
- Möller P. 2011. Las franjas de vegetación ribereña y su función de amortiguamiento, una consideración importante para la conservación de humedales. Valdivia, Chile. *Gestión Ambiental* 21: 96-106.
- MUNSELL. 1990. Soil Color Charts. Munsell Color. Macbeth División of Kollmorgen insttuments Corporation. Baltimore, Maryland.
- Muñoz, J. D. J. 1999. Estudio cartográfico y morfológico de los suelos de la porción sur del Valle del Mezquital. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias UNAM.
- Naiman R., Décamps, H., y Pollock, M. 1993. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. *Ecological Applications* 3(2): 209-212
- Naiman R., y Décamps, H. 1997. The ecology of interfaces: Riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28(1): 621-658.
- Naiman, R.J., Decamps, H., Pastor J. y Johnston, C.A., 1988. The potential importance of boundaries to fluvial ecosystems. *J. N. Am. Benthological Soc.*, 7:289-306.
- Nezeyimana, E. 1997. A toposequence of soils derived from volcanic materials in Rwanda: Morphological, chemical and physical properties. *Soil Sci.* 162: 351-360.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis.
- Peña R., V.M. 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.
- Ping, C.L., S. Shoji, T. Ito, T. Takahashi y J.P. Moore. 1989. Characteristics and classification of volcanic-ash-derived soils in Alaska. *Soil Sci.* 148: 8-28.
- Pinochet T., D., Ramírez R., F., y Suárez F, D. 2005. Variación de la capacita tampón en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agricultura Técnica*, 65(1), 55-64.
- Porta, J., López-Acevedo, M., y Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente (3ª ed.). Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 960 p.
- Reeuwijk van, L.P. 2002. Precedures for Soil Analysis. 6ª Ed. ISRIC Technical Paper. ISRIC y FAO. Wageningen: International Soil Reference Center.
- Reyes Jaramillo, I. 2013. Una ojead a la clasificación de suelos. UAM Iztapalapa, *ContactoS* 91, 30-40.
- Reyes, F., Lillo, A., Ojeda, N., Reyes, M., y Alvear, M. 2011. Efecto de la exposición y la toposecuencia sobre actividades biológicas del suelo en bosque relicto del centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 32(3): 255-265.
- Rijsdijk, A., Bruijnzeel, L.A., y Prins, Th M. 2006. Sediment yield from gullies, riparian mass wasting and bank erosion in the Upper Konto catchment, East Java, Indonesia. *Geomorphology*, 87: 38-52.

- Rodríguez L. A., 2013. Transformación del paisaje en la zona centro de la región Izta-Popo (1980-2013). Tesis de licenciatura. Facultad de Economía de la Universidad Veracruzana.
- Rodríguez R, A., Arbelo, C., Guerra, J.A., y Mora, J.L. 2002. Erosión hídrica en andosoles de las Islas Canarias. *EDAFOLOGIA*, Vol. 9(1): 23-30.
- Romero Barrera, M.A. 2010. Levantamiento semidetallado de suelos de la comunidad de Ixtepec, Oaxaca. Tesis Ingeniería Forestal. Chapingo.
- Rosgen, D. L. 1994. A classification of natural rivers. *Catena* 22 169-199.
- Rossiter, D.G. 2000. Metodologías para el levantamiento del recurso suelo (Vargas, R., trad.). International Institute for Geo-information Science & Earth Observation. 145 p.
- S.A.M.L.A. 1996. Sistema de apoyo metodológico para laboratorio de análisis de suelos y aguas. Dirección de producción agrícola. SAGPyA.
- Sánchez E, J.A., y Rubiano S, Y. 2015. Procesos específicos de formación en Andisoles, Alfisoles y Ultisoles en Colombia. *Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia*, Vol 12 (Junio): 85-97.
- Sandoval-Aparicio, J.C., López-López, A.B., Cruz-Flores, G., y Guerra-Hernández, E.A. 2016. Contenidos de carbono en suelos ribereños en una asociación de perfiles tipo del declive oriental de la región de los volcanes Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono.
- Scarsbrook, M., Quinn, J., Halliday, J., y Morse, R. 2001. Factors controlling litter input dynamics in streams draining pasture, pine, and native forest catchments. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 35: 751-762
- Schindler, D.W. 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science* (Washington,DC) 195: 260-262.
- Schute, L. 2002. Evaluación cuaternaria de la depresión de Vera y de Sorbas oriental. SE-Península Ibérica: reconstrucción de las fluctuaciones paleoclimáticas a partir de estudios morfológicos y edafológicos. Publicacions de la Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- Shoji, S., Nanzyo, M., y Dahlgren, R. 1993. Volcanic ash soils: Génesis, properties and utilization. Elsevier, Amsterdam.
- Siebe, C., Jahn, R., y Stahr, K. 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos. 70 p.
- Sierra, R.O. 2010. Eutrofización de embalses: descripción, prevención y manejo (Tesis de ingeniería). Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química, Bucarama.
- Sirombra, M., y Mesa, L. 2010. Composición florística y distribución de los bosques ribereños subtropicales andinos del Río Lules, Tucumán, Argentina. *Revista de Biología Tropical* 58(1): 499-510.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Sustaita, F., Ordaz-Chaparro, V., Ortíz-Solorio, C., y de León-González, F. 1999. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debido al uso agrícola. *Agrociencia* 34:379-386.

- Sweeney, B., Bott, T., Jackson, J., Kaplan, L., Newbold, J., Standley, L., Hession, W., y Horwitz, R.. 2004. Riparian deforestation, stream narrowing and loss of stream ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101(39): 14132-14137.
- Sweeney, B.W., 1993. Effects of streamside vegetation on macroinvertebrate communities of White Clay Creek in eastern North America. *Proc. Acad. Nat. Sci. Philadelphia*, 144:291-340.
- Vázquez, J.G. García-Franco, G. Castillo, F. Escobar, A. Guillen, M.L. Martínez, K. Mehlreter, R. Novelo, E. Pineda, V. Sosa, C., Valdepino, A. Campos C., R. Landgrave, E. Montes de Oca, A. Ramírez, J. Galindo. 2015. Ecosistemas ribereños: un pasaje fragmentado. *CONABIO. Biodiversitas*, 119:7-11.
- Verde V., J.R. 2009. Influencia de los factores de formación y uso de suelo en las propiedades ándicas, formas y mecanismos de estabilización de carbono en suelos del noreste de la Península Ibérica. Universidad de Santiago de Compostela, Departamento de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Biología.
- Wagai R.; M. Kajiura, M. Asano, A.Hiradate. 2015. Nature of soil organo-mineral assemblage examined by sequential density fractionation with and without sonication: Is allophanic soil different? *Geoderma* 241-242(2015) 295-305.
- Weisberg P., Mortenson, S., y Dilts, T. 2013. Gallery Forest or Herbaceous Wetland? The need for multi-target perspective in riparian restoration planning. *Restoration Ecology* 21(1): 12-16
- Williams, T.M., Lipscomb, D.J., English, W.R., y Nickels, C. 2003. Mapping variable-width streamside management zones for water quality protection. *Biomass and Bioenergy* 24: 329-336.
- Zinck, A. 2005. Suelos, información y sociedad. Instituto Nacional de Ecología, *Gaceta ecológica* 76:7-22.
- Zinck, J.A. 2012. Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands.

13. ANEXOS

1. Valores de coeficientes de correlaciones de Pearson ($p \leq 0.05$) para las propiedades físicas y químicas más relevantes en la caracterización del suelo.

	Altitud	Perfil	% Arc	%HumS	D.A.	% Por	pH act	pH-NaF	N-T	MOS	COS	R-C/N	CIC	RF	P ₂ O ₅
Altitud	1														
	0.98554														
Perfil	<.0001	1													
	39														
	0.47537	0.46701													
% Arc	0.0022	0.0027	1												
	39	39													
	0.51995	0.51995	0.24667												
%HumS	0.0007	0.0007	0.1301	1											
	39	39	39												
	-0.64846	-0.66717	0.17461	-0.21362											
D.A.	<.0001	<.0001	0.2877	0.1916	1										
	39	39	39	39											
	0.35543	0.36345	-0.22576	0.06808	-0.86753										
% Por	0.0264	0.0229	0.1670	0.6805	<.0001	1									
	39	39	39	39	39										
	-0.67841	-0.73940	-0.46105	-0.08488	0.46535	-0.21063									
pH act	<.0001	<.0001	0.0031	0.6074	0.0028	0.1981	1								
	39	39	39	39	39	39									
	0.85360	0.76104	0.49120	0.43822	-0.45340	0.29161	-0.36309								
pH-NaF	<.0001	<.0001	0.0015	0.0053	0.0037	0.0717	0.0231	1							
	39	39	39	39	39	39	39								
	-0.36906	0.52092	0.22000	0.93082	0.60350	-0.73886	0.80879	0.30360							
N-T	0.2378	0.0825	0.4921	<.0001	0.0377	0.0060	0.0014	0.3374	1						
	12	12	12	12	12	12	12	12							
	0.51005	0.56688	0.18390	0.12702	-0.29902	-0.00162	-0.59514	0.14605	-0.75366						
MOS	0.0009	0.0002	0.2624	0.4410	0.0644	0.9922	<.0001	0.3750	0.0046	1					
	39	39	39	39	39	39	39	39	12						
	0.51017	0.56705	0.18474	0.12648	-0.29885	-0.00170	-0.59555	0.14619	-0.75384	1.00000					
COS	0.0009	0.0002	0.2602	0.4429	0.0646	0.9918	<.0001	0.3745	0.0046	<.0001	1				
	39	39	39	39	39	39	39	39	12	39					
	0.75783	0.85733	0.15201	-0.94431	-0.88598	0.87010	-0.88663	0.15905	-0.87468	0.97340	0.97342				
R-C/N	0.0043	0.0004	0.6372	<.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.6215	0.0002	<.0001	<.0001	1			
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12				
	-0.01070	-0.02189	0.24393	0.04509	0.29251	-0.42039	-0.02037	-0.03231	0.96642	0.22122	0.22100	-0.73719			
CIC	0.9484	0.8948	0.1345	0.7852	0.0708	0.0077	0.9020	0.8452	<.0001	0.1759	0.1764	0.0062	1		
	39	39	39	39	39	39	39	39	12	39	39	12			
	0.96529	0.94057	0.62858	0.48367	-0.47586	0.20337	-0.63881	0.86203	-0.23987	0.53227	0.53251	0.66419	0.11119		
RF	<.0001	<.0001	<.0001	0.0018	0.0022	0.2143	<.0001	<.0001	0.4527	0.0005	0.0005	0.0185	0.5004	1	
	39	39	39	39	39	39	39	39	12	39	39	12	39		
	-0.91592	0.86920	-0.75854	-0.12222	0.66364	-0.30913	0.65189	-0.82036	0.49283	-0.61423	-0.61465	-0.83045	0.39775	-0.92977	
P₂O₅	<.0001	<.0001	<.0001	0.5977	0.0010	0.1727	0.0014	<.0001	0.1035	0.0031	0.0030	0.0008	0.0742	<.0001	1
	21	39	21	21	21	21	21	21	12	21	21	12	21	21	

Letras en **negrita** representan coeficientes de correlación significativos.

2. EVALUACIÓN ECOLÓGICA DEL SITIO

Profundidad de desarrollo: Señala el espesor del suelo sobre el material parental no intemperizado, también llamado *solum*. Los horizontes A y B forman parte del *solum*, los horizontes Cw pueden formar parte del *solum* si las raíces pueden llegar a desarrollarse en ellos.

Profundidad fisiológica: Señala el espesor del suelo en el que pueden penetrar y desarrollarse potencialmente las raíces. Puede alcanzar como máximo la profundidad de desarrollo o puede estar restringida por características físicas y químicas del suelo.

Cuadro 2.1. Evaluación de la profundidad fisiológica

Profundidad (cm)	<15	30	70	>120	
Evaluación	Muy somero	Somero	Mediano	Profundo	Muy profundo

Porosidad y retención de agua: Los suelos, como también los sedimentos y la mayoría de las rocas, contienen diferente número de poros de diámetro variado, dependiendo de su textura, densidad aparente, estructura y contenido de materia orgánica

- **Evaluación del espacio poroso total (VTP):** La aptitud de un suelo de ser cultivado y labrado está relacionado directamente a su espacio poroso. La evaluación se realiza por horizonte según el siguiente cuadro.

Cuadro 2.2. Evaluación del espacio poroso total

VPT (Vol%)	<30	40	50	60>	
Evaluación	Muy bajo	Bajo	Mediano	Alto	Muy alto

- **Capacidad de aireación (CA):** Espacio relativo que ocupan los poros gruesos (más de 50 μm) que se drenan por gravedad en un tiempo muy breve.

Cuadro 2.3. Evaluación de la capacidad de aireación

CA (Vol%)	<3	7	12	18>	
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta

- **Capacidad de agua disponible (dCC):** Representa la cantidad de agua retenida que puede ser absorbida por las plantas, se determina en el espacio radicular efectivo.

Cuadro 2.4. Evaluación de la capacidad de agua disponible

dCC (L m ²)	<50	90	140	200<	
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta

- **Capacidad de campo (CC):** Representa la cantidad de agua que puede ser retenida en un suelo contra la fuerza de gravedad. En esta agua igualmente se pueden encontrar sustancia en solución que no pueden ser absorbidas por las partículas sólidas (como nitratos), por lo tanto también representa una medida de la capacidad de retención de estas sustancias evitando que sean lixiviadas al subsuelo.

Cuadro 2.5. Evaluación de la capacidad de campo

CC (L m ²)	<130		260	390	520<	
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta	

- Conductividad hidráulica bajo condiciones de saturación:** Es una propiedad física que lo capacita para transmitir agua o aire. Es un parámetro importante tanto para el uso agrícola, como para la evaluación ecológica del sitio. Puede estimarse bajo consideración de la textura y la densidad aparente, según el siguiente cuadro.

Cuadro 2.6. Evaluación de la conductividad hidráulica

Kf (cm día)	<1	10	40	100	300>
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta Extremadamente alta

Estimación de la erodabilidad: La erodabilidad del suelo, el riesgo de erosión hídrica o factor “K” en la “Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo, puede estimarse considerando la textura, el contenido de materia orgánica, la estabilidad de los agregados y la permeabilidad.

Cuadro 2.7. Evaluación de la capacidad de campo

Factor K	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Evaluación	Muy baja		Baja	Mediana			Alta	Muy alta	

Abastecimiento de nitrógeno y fósforo: Estos nutrientes pueden estimarse a partir del tipo de matillo, el contenido de materia orgánica, densidad aparente, el espesor del horizonte y el factor corrector de piedras.

Cuadro 2.8. Evaluación de la reserva (Nt) y la disponibilidad (Nd) de nitrógeno.

Nt (kg m ²)	0.1-0.2	0.2-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0	>2.0
Nd (g m ²)	0.1-2	2-4.5	4.5-12	12-80	>80
Evaluación	Baja	Media	Media alta	Alta	Muy alta

Cuadro 2.9. Evaluación de fósforo movilizable

Pmo (g m ²)	<10	60	120	180	240>
Evaluación	Muy baja	Baja	Media	Media-alta	Alta Muy alta