



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
EDAFOLOGÍA Y NUTRICIÓN VEGETAL



**Fósforo disponible y actividad fosfatasa en suelos forestales
bajo bosques templados en un gradiente altitudinal del
Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
B I Ó L O G A
P R E S E N T A:**

ANALILIA ELIZABETH GARCÍA BARRERA

DIRECTOR DE TESIS: DR. GERARDO CRUZ FLORES

COMITÉ TUTORAL:

MTRA. EN DIIE. PÉREZ GONZÁLEZ DORA ALICIA

MTRO. RÍOS GÓMEZ RAMIRO

DRA. GARCÍA SÁNCHEZ ROSALVA

MTRO. VALDERRABANO GÓMEZ JUAN MANUEL

**PROYECTO FINANCIADO POR PAPIME PE-214419 Y
BECAS DE TITULACIÓN-EGRESADOS EXTEMPORÁNEOS 2022-2023**

Ciudad de México, septiembre de 2023



**FES
ZARAGOZA**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
CARRERA DE BIOLOGÍA
FORMATO F-5



OFICIO DE FECHA DE EXAMEN

QFB GRACIELA ROJAS VÁZQUEZ
JEFA DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente

Le comunico que al alumno: **GARCIA BARRERA ANALILIA ELIZABETH** con número de cuenta **314073237** de la carrera **BIOLOGÍA** se le ha fijado el día **26 de Septiembre de 2023** a las **13:00 hrs.**, para presentar la réplica oral de su examen profesional, que tendrá lugar en esta facultad, ante el siguiente jurado:

CARGO	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	MTRA. PEREZ GONZALEZ DORA ALICIA	
VOCAL	DR. CRUZ FLORES GERARDO	
SECRETARIO	MTRO. RIOS GOMEZ RAMIRO	
SUPLENTE	DRA. GARCIA SANCHEZ ROSALVA	
SUPLENTE	MTRO. VALDERRABANO GOMEZ JUAN MANUEL	

El título del trabajo escrito que se presenta es:

Fósforo disponible y actividad fosfatasa en suelos forestales bajo bosques templados del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl.

En la modalidad de: **TESIS**

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal de la Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza, en la Facultad de Estudios Superiores Zaragozas, UNAM.



Gracias al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (PAPIME), y al programa Becas de Titulación-Egresados Extemporáneos por el apoyo para la realización de esta investigación que aquí se presenta y poder seguir con mis estudios profesionales.



NO TE RINDAS – MARIO BENEDETTI

*No te rindas, aun estas a tiempo
de alcanzar y comenzar de nuevo,
aceptar tus sombras, enterrar tus miedos,
liberar el lastre, retomar el vuelo.*

*Porque existe el vino y el amor, es cierto,
porque no hay heridas que no cure el tiempo,
abrir las puertas quitar los cerrojos,
abandonar las murallas que te protegieron.*

*No te rindas que la vida es eso,
continuar el viaje,
perseguir tus sueños,
destrabar el tiempo,
correr los escombros y destapar el cielo.*

*Vivir la vida y aceptar el reto,
recuperar la risa, ensayar el canto,
bajar la guardia y extender las manos,
desplegar las alas e intentar de nuevo,
celebrar la vida y retomar los cielos,*

*No te rindas, por favor no cedas,
aunque el frio queme,
aunque el miedo muerda,
aunque el sol se esconda y se calle el viento,
aún hay fuego en tu alma,
aún hay vida en tus sueños,
porque la vida es tuya y tuyo también el
deseo,
porque lo has querido y porque te quiero.*

*No te rindas por favor no cedas,
aunque el frio queme,
aunque el miedo muerda,
aunque el sol se ponga y se calle el viento,
aún hay fuego en tu alma,
aún hay vida en tus sueños,
porque cada día es un comienzo,
porque esta es la hora y el mejor momento,
porque no estás sola,
porque yo te quiero.*

EN PERSEGUIRME MUNDO, ¿QUÉ INTERESAS?, SOR JUANA INÉS DE LA CRUZ

*En perseguirme, Mundo, ¿qué intereses?
¿En qué te ofendo, cuando sólo intento
poner bellezas en mi entendimiento
y no mi entendimiento en las bellezas?*

*Yo no estimo tesoros ni riquezas;
y así, siempre me causa más contento
poner riquezas en mi pensamiento*

que no mi pensamiento en las riquezas.

*Y no estimo hermosura que, vencida,
es despojo civil de las edades,
ni riqueza me agrada fementida,*

*teniendo por mejor, en mis verdades,
consumir vanidades de la vida
que consumir la vida en vanidades.*



*Hoy, Tonatzin brilla con esplendor,
los bosques de pino, son tesoro de amor.
Pues aquí renace la vida en cada rincón,
Danza el viento, siguiendo su canción.
Bajo su manto verde, la tierra florece,
los pinos se alzan y su alma los engrandece.
Con raíces profundas
protegen la tierra y esta enverdece.*

-Miguel Angel AP

Dedicatoria

Esto será largo, pero la vida es así, por lo cual principalmente dedico esto a la vida por ser a veces tan cruel y a veces tan buena.

Este esfuerzo y logro es gracias y dedicado principalmente a mis padres, mi padre **Daniel García Idefonso**, que a pesar de su mal humor y a pesar de no ser lo que él hubiera deseado, siempre me ha apoyado y ha estado conmigo, a mi madre **Andrea Barrera López** que a pesar de lo malo en la vida y sus regañones me ha apoyado, ha estado conmigo y motivado a su manera, gracias por ser unos buenos-excelentes malos padres, ya que gracias ello soy la mujer que forme hoy en día capaz y que no se rinde fácilmente.

Esta labor es dedicada a mi hermana **Daniela Saraí**, mi princesa y bebé, quien es la persona más valiente que he conocido, mi fortaleza para seguir adelante, también es dedicado mi esfuerzo a mi hermano **Andrés Agustín** mi razón y mi fortaleza, un niño increíble inteligente y nada temeroso, quien me ha apoyado y abrazado en mis momentos más bajos, me siento orgullosa en tenerte. Gracias a ustedes dos que son mi motor a seguir y ser mejor persona por mí y por ustedes.

Dedicado al amor de mi vida, mi pareja y compañero de tantos logros **Miguel Angel Aguilar Pérez**, agradezco al destino en cruzarnos ese día en aquel laboratorio, es por ti Angelito, a quien admiro, y estoy orgullosa de él, eres mi motor a resistir y seguir, gracias cariño por aguantarme todos estos años (mis regañones y dramas), por estar conmigo a pesar de mis fantasmas, por quedarte conmigo siempre, por solucionar las cosas juntos, por apoyarme de mil maneras, por las nuevas cosas vividas a tu lado, por construir un futuro juntos y por amarme tan profundo como lo has hecho. Siempre seremos el mejor equipo y espero compartir más vida a tu lado, Te Amo.

Dedicado a **Sara Bravo Moreno**⁺ aunque aún me duela en lo más profundo de mi alma tu partida mi gran amiga, hermana y cómplice, sé que estas orgullosa de esto donde quiera que estés, y te agradezco por todas las cosas por siempre ser quien me motivo, por cuidarme, por ser quien me daba mi zapes y me decía que creyera más en mí, por todo el amor, esta culminación es de ambas ya que sé que



estuviste conmigo logrando todo esto y mandándome lo mejor de la vida, ambas amando la biología, siempre te recordare mi Pandita Babo.

Este logro es gracias a la ayuda y cariño incondicional de mi tía **Ma. Del Carmen Barrera**, muchas gracias por ser una mujer valiente, admirable, en la quien me reflejo, estaré eternamente agradecida con usted, la admiro, quiero y respeto. De igual manera gracias a mi tío **Salvador García**, gracias por el apoyo en su momento a mí y a mi familia.

Dedico mi logro a mi abuelo **Dolores Trinidad García Méndez** por ser mi segundo padre a quien quiero infinitamente, gracias por esperarme, creer en mí y consentirme, ¡Gracias, papá grande! Gracias a mi abuela **Georgina Minor** igual por cuidarme como su nieta ¡Gracias, mamá grande!, de igual manera esto es por mi abuela **Carolina Enriquielma López Hernández** quien a pesar de todo nos ha apoyado, brindado casa y con amor me defendió, gracias a mi abuela **Albina⁺, Juanita⁺** (por recordarme hasta sus últimos días y tratar de mantener a la familia unida), y a mi abuelo **Roberto⁺** ya que por ellos yo estoy aquí.

Dedicado a Analilia Elizabeth por no rendirse jamás... ¡Lo lograste!

Agradecimientos.

Gracias a mi México querido por ser tan “megadiverso” por tanta riqueza que inspira con su belleza escénica, natural y cultural. Gracias por permitirme explorarte con ánimos y amor por medio de la biología, ecología y edafología.

Gracias a mi universidad, mi segunda casa, por acogerme en el inicio de mi adolescencia por generarme un pensamiento crítico, aportarme tanto en lo académico, como lo emocional, con personas capacitadas, gracias por conocer a tantas personas de calidad y otras no tan agradables, gracias por dejarnos desarrollar en múltiples facetas, gracias por lo bueno, lo malo y lo peor de sí misma, durante estos años de estadía. Gracias ENP 4, gracias FES Zaragoza, gracias UNAM.

Gracias a la Carrera de Biología y al destino por permitirme estar aquí, por saber, sentir que no me equivoque, por mi formación académica, mi desarrollo multidisciplinario en muchos aspectos (ya que la biología es todo y está en todo), gracias a la carrera por permitirme transmitir mis vivencias e ímpetu al resto de generaciones que me descendieron y dejar una huella, aunque mínima (no lo sé) en ellos.

Gracias al Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal (L8 de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria -UMIEZ-) por abrirme las puertas desde el semestre uno, para probar nuevas cosas, volver a este lugar, enamorarme de la edafología y saber que este era mi lugar. Así como un estrecho agradecimiento a la RED de Investigadores del Izta- Popo, por brindarme la oportunidad de desarrollarme y difundir la ciencia del suelo.

Gracias a la Unidad de Impacto Ambiental de la Alcaldía Iztapalapa por ser parte fundamental en mi formación en el campo laboral, bajo un ámbito multidisciplinario, durante mi Servicio Social.

Agradezco a la unidad de Orientación Educativa ENP 4 y el módulo de Autocuidado FES Zaragoza, por estirarme y tomarme de la mano en momentos difíciles durante mis últimos años de preparatoria y el tiempo del Diplomado de Promoción de la Salud.



Finalmente, gracias a la vida misma por permitirme seguir adelante, por darme las herramientas, virtud y la fortaleza para seguir en pie, para cumplir mis metas y propósitos, sabiendo que esto no es el fin.

Agradecimientos Académicos.

Mi más profundo agradecimiento y admiración a mi director de tesis, asesor, padrino y amigo **Gerardo Cruz Flores**, gracias por ser parte vital de mi formación académica como bióloga, por brindarme el apoyo, tiempo, paciencia, conocimiento y confianza incondicional. Gracias, por despertar en mí el ímpetu, amor e interés por los suelos, la química y la naturaleza, por adoptarme como su alumna desde mis escasos 18 años, gracias por verme potencial, gracias por ser una persona generosa, le agradezco tanto y tenga por hecho que dejo una huella en mí.

Gracias a mi comité por toda la paciencia, sus observaciones y enseñanzas:

- Gracias a la maestra **Dorita Pérez González**, que, aunque la convivencia fue espontánea y corta fue amena, bastante agradable, fue igual un placer conocer a una mujer tan admirable, gracias por las pláticas sobre la ciencia y los asares de la vida.
- Gracias al maestro **Ramiro Ríos Gómez** por sus profundas enseñanzas, conocimientos, asesoría, y solución de dudas, además de motivar el gusto por salvaguardar la vida.
- Gracias a la Doctora **Rosalva Sánchez García** por su confianza, por todo el apoyo, por la ayuda durante el programa PAPIME y por ver una luz en mí.
- Gracias al Maestro **Juan M. Valderrábano Gómez** por toda la paciencia, enseñanza, conocimiento, el amor por los suelos (suelovers) y las largas charlas, por los consejos, por las vivencias, por recordarme el motivo para seguir adelante, por llegar a mi corazón y lágrimas con sus palabras de aliento, por ser parte fundamental en esta etapa final de mi formación, le agradezco tanto.

Mi más grande agradecimiento a aquellos profesores que fueron parte fundamental en mi formación: Gracias a la Dra. María del Carmen, Dra. Lucila Álvarez, Maestra Martita Olvera, Maestra Selene Ortiz Burgos, Dra. María Elena Ayala, Dra. Ana María Soriano, Maestro Eloy+ Maestra Ana Laura Tena+, Dr. Antonio Valdivia, Maestra Elizabeth Vieyra, Dr. Yolanda Córdova, Dra. Hortensia Rosas, Maestra Balbina, Maestro Ulises, Maestro Marco Muñoz, Dr. Hugo Muñoz, Maestra Alma Bella, Maestro Alejandro Santana, Dr. Isaías, Dra. Maricela Arteaga, Maestro Ehnis Duhne, Maestra Yolanda Altamirano (por su sonrisa y confianza), Maestra Nichte (por creer en nosotros) gracias a todos y todas por sus enseñanzas y paciencia.

Agradecimiento especial a aquellos profesores quienes me tendieron la mano, motivaron y a quienes admiro: al profesor **Rigoberto Becerra** (mi primer maestro y amigo en la carrera) quien fomento el amor por las Ciencias de la Tierra quien me apoyo, gracias por la risa y la motivación a creer que podía hacer las cosas mejor que muchos. Gracias al maestro **Gabriel Santana** por despertar el interés a la química, por creer en un grupo de recursadores y mantenernos unidos como grupo, gracias al maestro **Alan Jesús Palacios** por ser un gran amigo, por fomentar el amor a la sistemática, acercarme a la biometría, amor a las aves, las charlas, el apoyo, por sus buenos consejos en pensar en grande y motivarme a salir de la FES para experimentar el mundo laboral. Gracias a la maestra **Elvia** por



aventurarme a la Edafología, sus enseñanzas, por aceptarme como alumna, por el apoyo y las historias de sus éxitos académicos, gracias por ser una mujer admirable

Gracias infinitas al maestro **Armando Cervantes Sandoval** por ser tan entregado a su trabajo, por los consejos académicos y personales, porque a pesar de que fui y soy una persona que trabajo de una forma rara, me ayudo y creyó en mí. Gracias infinitas a la **Dra. Paty Rivera** que ha sido una mujer admirable y un ejemplo a seguir, gracias por todos sus consejos para mí y mi pareja, además de todo el cariño. Gracias a mi maestra y amiga **Beatriz Martínez Rosales** por todo el cariño incondicional, sabiduría, por ser una persona de admirar, apoyarme en los momentos más difíciles, por estar conmigo en una de mis más grandes pérdidas y no dejarme caer, de igual manera gracias al **Dr. Alberto Méndez Méndez** por apoyarme en esa pérdida que ambos vivimos a la par y por tenderme la mano.

Gracias a mi maestra **Leticia López Vicente**⁺ quien, aunque su partida fue muy temprana, siempre me motivo a ser la mejor y quien me apoyo en muchos aspectos, usted siempre estará en mi corazón. Gracias a la maestra **Judith Villavicencio** por motivar a una alumna de segundo, tan novata, que ingreso a una materia de octavo, gracias por las pláticas, los consejos y por ser una gran persona que se cruzó en mi vida. Gracias al maestro **Alejandro Perales** por la ayuda en la materia que más se me dificultaba, por el respeto y los consejos.

Agradezco a varios profesores que estuvieron conmigo en mis diferentes etapas y no me dejaron caer y rendirme: A la orientadora **Arteaga** por fungir como “psicóloga” durante mis últimos años de prepa, un enorme agradecimiento hasta el cielo a la maestra **M. Bárbara Reséndis Caraza**⁺ por el cariño ser tan noble persona y motivarme cuando menos creía en mi en la preparatoria, por acercarme a la filosofía y cuidarme De igual manera gracias a los biólogos **Elizabeth Cruz Felipe y Eduardo Adolfo Delgadillo Cárdenas** por motivarme a estudiar tan admirable y bella carrera, por su compromiso hacia mí y el cariño.

Gracias a la **Dra. Azucena Ojeda** (Dra. Azu) a quien admiro y me inspira a ser una mujer capaz, gracias infinitas por todo el apoyo, por escucharme, quererme y creer en mí. Gracias a profesores y personas del módulo de autocuidado por su gran apoyo a las Doctoras Mecalco, al Maestro **Nahum**, a la maestra **Caridad Rangel Yopez, a Daniel y a al Doctor Noe Rojas**, por su apoyo durante pandemia.

Agradecimientos Personales.

A todos mis amigos más sinceros y cercanos durante esta etapa de mi vida: **Damián Cortez Navarrete**, con el que pase mi vida de universitaria y mi amigo de risas, te quiero Dami. A **Aurora Raquel Vargas** gracias por tu amistad incondicional, por las risas, tu cariño y ser parte de tu pequeña familia con Rex (te quiero mujer). Un profundo agradecimiento a Eduardo Chavez López (Lalito), por todo que me brindaste, por las pláticas, risas y lágrimas, gracias por apoyarme en mis prácticas de campo cuando tenía mis rachas malas, si no fuera por ti no lo hubiera logrado, gracias a uno de mis mejores amigos Lalito, siempre te llevare en mi corazón.

A mi Amix **Aldahir Bertrand Hernández** por el apoyo incondicional en los últimos años (sabes que te deseo lo mejor y no es un adiós), a **Carlitos Miranda** por aguantarme y seguir con la amistad, agradezco a **Nozomi** (Lourdes Noemi) por las asesorías y el gran apoyo, gracias a los empresarios



por estar en una etapa de mi vida y por haber tenido un proyecto, aunque fallido. Gracias a compañeros y amigos de aula Alfred, Tania (aunque no estuviste mucho tiempo en la carrera eres muy importante para mí), Eli Hernández, Ramón Moreno, Laura, Miguel (compita de Ciencias), Yair, Rebequita y Brayán (quien los recordare mucho a ambos por ser tan buenas personas).

Agradezco a **Nayelli Cecilia Moreno**, que, aunque nos conocimos después de un mal momento, te convertiste en una persona a la que quiero, gracias por tu apoyo, por ser tan buena amiga, por quererme, cuidarme, por abrirme las puertas de tu casa y el apoyo que me brinda toda tu familia (tu mamá **Leticia**, a **Arely** y a tu papá). Gracias por la compañía a Mario Jonathan León Piedra por las horas de estudio (espero haber dejado una huella en tí y hecha le ganas), **Airy Rincón** mi negrito y hermano, gracias por cuidarme siempre, a **Candy Morales** una mujer fuerte y excelente amiga, a Yumara⁺, quien fue una de las mejores personas en la vida que aguanto tanto, gracias por tu compañía y bondad), a **Jesús de la Rosa** (por las felicitaciones y no olvidar a Sarita), Diana Salvador, Lupita Pérez (tan buenas compañeras, de las mejores), **Nancy Landa** por el cariño que te tengo y sé que vas a triunfar en la vida ya que eres una gran mujer, **Briones** y **Trejo**, por las pláticas, compañías y aventuras trepando cerros.

Agradezco a los chicos y chicas del Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal por todo el cariño y ser buenos compañeros: Ara Hernández, Selene, Mallinli, Perla, Alejandra Velazco, Marian (y su hermana), Quetza, Mar, Lalo, Adolfo, Jael, Inyasid y Yasmin (por el apoyo en los últimos meses y el vínculo de la amistades) gracias a todos por el apoyo, ánimos, felicitaciones y buena convivencia por el amor a los suelos y el Izta-Popo.

Gracias a las chicas de Beige por ser mis amigas y quererme: a **Mónica Patricia** (mi gran amiga, la salsa de mi taco jaja) por apoyarme y quererme a pesar de la distancia, a **Bell, Fany, Piña, Maribel y Celic**, por las felicitaciones siempre y porque sé que cuento con ustedes. Gracias a **Abigail Isai Montiel Chávez** por su apoyo en una etapa de mi vida escolar y por limpiar mis lágrimas siempre.

Gracias a mis padrinos **Maru, Ramón** y su hija **Rubí** por el apoyo incondicional y las porras al realizar este escrito.

A los padres de mi mejor amiga Sarita, por todas las palabras, buenos deseos, cariño y por no rendirse nunca, así como a **Moisés Bravo** un gran y pequeño guerrero (que sabes que cuentas conmigo) y a Abigail Méndez Bravo gracias por siempre estar a su lado.

Dejo tantos años, tantas historias, mi cariño y dedicación ¡Gracias a todos los que me quieren y han creído en mí!



**FÓSFORO DISPONIBLE Y ACTIVIDAD
FOSFATASA EN SUELOS FORESTALES
BAJO BOSQUES TEMPLADOS EN UN
GRADIENTE ALTITUDINAL DEL
PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL
POPOCATÉPETL**



RESUMEN

El soporte y suministro a las plantas son funciones que el suelo brinda a estas, además de que en este se lleva a cabo parte del ciclo biogeoquímico del Fósforo (P) y otros elementos.

En el Eje Neovolcánico Transmexicano, *Andosols* tienen una elevada retención de P, un pH ácido y baja saturación de bases, lo que sugiere la presencia de minerales ricos en aluminio.

El P es un elemento esencial para la vida, fundamental en el metabolismo de los organismos y componente en moléculas importantes como DNA, RNA y ATP. Las plantas y los microorganismos obtienen este elemento de la solución del suelo, en formas inorgánicas pero debido a su alta reactividad química y su alta demanda, su disponibilidad se reduce rápidamente.

Respecto a las fosfatasas, estas juegan un papel crucial ya que transforman el P-orgánico a P-inorgánico. Dicho lo anterior, el objetivo de esta investigación se centraría en determinar el Fósforo disponible o extractable (P- disponible o P- extractable) y la actividad fosfatasa ácida y alcalina del suelo, en distintas toposecuencias de bosque templado, donde predomina *Pinus sp.* y *Abies religiosa*.

El estudio se realizó en seis localidades del Área Natural Protegida (ANP): Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl (PN-IP) y su zona de influencia, dentro de un gradiente altitudinal entre 2700 a 3900 m s.n.m, donde predominaban las especies arbóreas mencionadas anteriormente. El estudio fue llevado a cabo por medio de la consulta bibliográfica, el análisis de información y la recopilación de una base de datos, compendiada del 2004 hasta el 2012, con propiedades de suelos ligadas a la disponibilidad de fósforo, seleccionando seis sitios de estudio y 11 unidades ambientales homogéneas en composición.

Para los análisis químicos, físicos y bioquímicos del suelo se tomaron muestras que fueron procesadas de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 a profundidades de 0 a 5 cm. y de 5 a 10 cm., obteniendo 48 muestras para análisis de propiedades físicas y químicas, y 36 muestras para análisis de propiedades bioquímicas que se analizaron con base a la misma Norma Oficial Mexicana.



Por el origen geológico del suelo se determinó que la actividad de la fosfatasa ácida es mayor que la alcalina en el PN-IP, esto debido al material de origen volcánico. Asimismo, se puntualiza que la disponibilidad de P-extractable por la solución Olsen tiene una correlación significativa con más propiedades como ácidos húmicos, Delta pH, pH potencial, MOS, carbono orgánico del suelo (COS), carbono total (COT), sulfatos, actividad fosfatasa ácida, actividad fosfatasa alcalina, actividad arilsulfatasa, carbono microbiano y CO₂ en suelos fumigados, en comparación de los resultados obtenidos con la solución Bray I, la cual a su vez tiene relación con otros factores bioquímicos; por lo que ambos métodos son herramientas útiles para indicar la calidad de suelos forestales.

Para el análisis de P-extractable se utilizaron los métodos Olsen y Bray-Kurtz para los suelos de la zona de estudio; encontrando así diferencias significativas. En la bibliografía se menciona que el método Bray-Kurtz extrae más cantidades de P-extractable que el método Olsen (en suelos de pH ácido), pero los resultados de esta investigación mencionan que el método Olsen se correlaciona significativamente con un mayor número de variables del suelo.

Debido a la estrecha correlación de P- disponible con variantes de interés en los suelos se proponen tres factores (FDP I, FDP II y FDP III), como alternativa en el análisis para la disponibilidad de fósforo.

Palabras clave: P-extractable, Suelos forestales, Fosfatasas, Servicios Ecosistemicos, *Pinus*, Δ pH.



ABSTRACT

Support and supply to plants are functions that soil provides to them, in addition to the fact that part of Phosphorus (P) biogeochemical cycle and other elements is carried out.

In Trans-Mexican Neovolcanic Axis, Andosols have high P retention, an acidic pH and low base saturation, suggesting presence of aluminum-rich minerals.

P is an essential element for life, fundamental in metabolism of organisms and component in important molecules such as DNA, RNA and ATP. Plants and microorganisms obtain this element from soil solution, in inorganic forms, but due to its high chemical reactivity and high demand, its availability is rapidly reduced.

Regarding phosphatases, they play a crucial role since they transform organic P into inorganic P. Having said above, objective of this research would focus on determining available or extractable Phosphorus (P- available or P- extractable) and soil acid and alkaline phosphatase activity, in different temperate forest toposequences, where *Pinus* sp predominates and *Abies religiosa*.

This study was carried out in six locations of Protected Natural Area (ANP): Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park (PN-IP) and its influence area, within an altitudinal gradient between 2700 to 3900 m a.s.l., where the tree species mentioned above predominated. The study was carried out through bibliographic consultation, information analysis and compilation of a database, compiled from 2004 to 2012, with soil properties linked to phosphorus availability, selecting six study sites and 11 environmental units homogeneous in composition.

For chemical, physical and biochemical soil analyzes, samples were taken and processed according to NOM-021-SEMARNAT-2000 at depths of 0 to 5 cm and from 5 to 10 cm, obtaining 48 samples for analysis of physical and chemical properties and 36 samples for analysis of biochemical properties that were analyzed based on same Official Mexican Standard.

Due to geological origin of soil in the PN-IP, it was found that the acid phosphatase activity is greater than alkaline activity, due to material of volcanic origin. Likewise, it is pointed out that availability of P-extractable by Olsen solution has a significant correlation with more



properties such as humic acids, Delta pH, potential pH, MOS, soil organic carbon (COS), total carbon (COT), sulfates, acid phosphatase activity, alkaline phosphatase activity, arylsulfatase activity, microbial carbon and CO₂ in fumigated soils, compared to the results obtained with the Bray I solution, which in turn is related to other biochemical factors; Therefore, both methods are useful tools to indicate forest soils quality.

It was found that the acid phosphatase activity is greater than alkaline activity, due to material of volcanic origin. Likewise, it is pointed out that availability of P-extractable by Olsen solution has a significant correlation with more properties such as humic acids, Delta pH, potential pH, SOM, soil organic carbon (SOC), total carbon (TOC), sulfates, acid phosphatase activity, alkaline phosphatase activity, arylsulfatase activity, microbial carbon and CO₂ in fumigated soils, compared to the results obtained with Bray I solution, which in turn is related to other biochemical factors; Therefore, both methods are useful tools to indicate forest soils quality.

Keywords: Extractable-P, Soil Forest, Phosphatases, Ecosystem Services, *Pinus*, ΔpH.



ÍNDICE

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. HIPÓTESIS	18
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	18
4. OBJETIVOS.....	19
4.1. OBJETIVO GENERAL	19
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
5. MARCO TEORÍCO	21
5.1. CONCEPTO DE SUELO	21
5.2. SUELO FORESTAL.....	28
5.3. GÉNESIS DEL SUELO.....	35
5.4. MATERIAL PARENTAL.....	41
5.5. CLIMA.....	42
5.6. ORGANISMOS	44
5.7. TOPOGRAFÍA.....	45
5.8. TIEMPO.....	46
5.9. CALIDAD DEL SUELO	47
5.10. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	48
5.11. DENSIDAD APARENTE Y REAL	49
5.12. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO.....	52
5.13. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE).....	52
5.14. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)	54
5.15. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (MOS).....	56
5.16. ELEMENTOS ESENCIALES	57
5.17. ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DEL SUELO.....	59
5.18. LA IMPORTANCIA DEL FÓSFORO EN EL SUELO	61
5.19. LA IMPORTANCIA DEL FÓSFORO EN EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS	62
5.20. EL FÓSFORO EN SUELOS FORESTALES.....	63
5.21. ACTIVIDAD DE LAS ENZIMAS FOSFATASAS	63
6. ANTECEDENTES	67



- 7. MATERIALES Y METODO 70
 - 7.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIOS..... 70
 - 7.2. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 72
 - 7.3. TOMA DE MUESTRA 74
 - 7.3.1. TOMA DE MUESTRA PARA ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DEL SUELO..... 74
 - 7.3.2. PRETRATAMIENTO DE MUESTRAS..... 75
 - 7.4. DETERMINACIÓN EN LABORATORIO 75
 - 7.4.1. ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO 75
 - 7.5. ANÁLISIS BIOLÓGICO Y BIOQUÍMICO DEL SUELO..... 76
 - 7.5.1. CURVA DE CALIBRACIÓN 78
 - 7.6. TRABAJO ESTADÍSTICO 79
 - 7.6.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO..... 79
- 8. RESULTADOS y DISCUSIÓN..... 81
 - 8.1. DESCRIPCIÓN FISIOGRAFICA DE LOS SITIOS DE ESTUDIO 82
 - 8.2. RECOPIACIÓN DE DATOS..... 84
 - 8.3. INDICADORES FÍSICOS DE LA CALIDAD DEL SUELO..... 85
 - 8.4. INDICADORES QUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL SUELO 91
 - 8.5. CORRELACIONES DE PEARSON DE LOS FDPI, FDP II Y FDP III CON PÁRAMETROS DE SUELO: 98
 - 8.4.1. FACTOR DE FÓSFORO DISPONIBLE I (FPD I) 99
 - 8.4.2. FACTOR DE FÓSFORO DISPONIBLE II (FPD II) 102
 - 8.4.3. FACTOR DE FÓSFORO DISPONIBLE III (FPD III) 107
- 9. CONCLUSIONES 108
- 10. BIBLIOGRAFÍA CITADA 109
- 11. ANEXOS 119



1. INTRODUCCIÓN

El uso de los Recursos Naturales (RN) como el suelo y el agua han evolucionado a la par del surgimiento de las civilizaciones y el ser humano mismo. No es de admirar que el esplendor cultural, social y económico de civilizaciones madre como la mesopotámica, la egipcia y china, fue debido a los RN ya que sus regiones geográficas se irrigaban y fertilizaban naturalmente por material dendrítico transportado y que se deposita por la acción de agua que corría en el río Éufrates y Tigris, el río Nilo y los ríos Hoang-Ho, Yang-Tsé y Si-Kiang, respectivamente que formaron suelos fértiles aluviales (Cruz-Flores, 2006 a).

Al suelo lo podemos considerar como el “gran proveedor” de la vida (Teuscher *et al.*, 1987), ya que es uno de los principales almacenes de la naturaleza, porque es capaz de proporcionar el sustento necesario para los seres vivos y el ecosistema. A través del paso de los periodos geológicos el suelo ha desempeñado esta función, incluso antes del surgimiento del ser humano, por ello podemos imaginar que existen suelos más antiguos que el inicio de las civilizaciones humanas, que la escritura y la agricultura e incluso podemos imaginar que tal vez existan suelos mayores o igual a la edad de 3900 millones de años; durante la aparición de LUCA (Last Universal Common Ancestor).

Debido a lo anterior podemos decir los suelos son cuerpos que se forman, a una tasa de 1 cm por cada 100 a 400 años, a partir de material mineral y orgánico sometido a diferentes condiciones y factores de formación que tienen una intensificación diferencial, teniendo como resultado la formación de varios tipos de suelo a partir de un mismo material parental con el mismo origen geológico y que por consecuencia tienen diversos tipos de vegetación, microorganismos y retención de micronutrientes asociados (Doran y Parkin, 1994; Cruz-Flores, 2006 a).

Así bien el suelo es inmensamente intrincado, siendo de las sustancias más complejas que existen en el planeta, uno de los conceptos más acertados es el considerar al suelo como un sistema natural trifásico desarrollado (que lo componen factores sólidos, líquidos y gaseosos) sumamente complejo formado a partir de partículas orgánicas e inorgánicas; bajo la influencia de factores de formación que interaccionan entre sí, por ejemplo: el aire y el agua intemperizan las partículas sólidas, y los microorganismos se encargan de catalizar muchas



reacciones que se generan en él, ya que se goza de una gran integración, debido a la enorme cantidad de reacciones químicas que se sufren en el suelo.

Siendo tan diverso y complejo, este cuerpo natural funge como medio para que se generen los ciclos biogeoquímicos de diversos elementos esenciales para la vida, necesarios para la reincorporación de los compuestos orgánicos. Así uno de los ciclos que se llevan a cabo en él es el del P; elemento esencial ya que es parte de moléculas indispensables para procesos metabólicos en los seres vivos y por lo tanto para el crecimiento de plantas, además de ser un factor limitante en los ecosistemas forestales (Críquet *et al.*, 2004; Astudillo-Bravo, 2006).

De igual manera el P se asocia con algunas de las funciones importantes que las plantas llevan a cabo, por ejemplo, está presente en el que tal vez, es el mecanismo vital más importante de las plantas, la fotosíntesis. Viéndolo desde este punto de vista, una deficiencia de este nutrimento puede ocasionar amarillamiento (por clorosis) y color púrpura en las hojas y modificaciones en el desarrollo de la planta. También es partícipe en otras funciones vitales como la utilización de azúcares, almidones y división celular, por mencionar algunas.

La disponibilidad de P en el suelo ocurre de manera natural encontrándolo en numerosas formas químicas que pueden ser clasificadas como fracciones disueltas y particuladas (Zavala-Munguía, 1993). A pesar de ello este elemento no se encuentra en forma libre y al alcance de todos los organismos, ya que tiene una facilidad de oxidación con el medio natural.

Pero lo podemos encontrar en medios minerales como apatitas y fosforitas y en suelos forestales es proporcionado principalmente por la materia orgánica del suelo (MOS), que es la fuente principal de P para los árboles. Existen algunos fosfatos orgánicos solubles (como los contenidos en ácidos nucleicos) que pueden ser absorbidos por las plantas (Astudillo-Bravo, 2006; Gisbert, 2017).

Dentro del ciclo del P se lleva a cabo un proceso importante, el de la actividad de las fosfatasas del suelo por medio de sustancias radicales y microorganismos asociados como las micorrizas vesículo-arbusculares, quienes juegan un papel determinante para la adquisición de este nutrimento esencial. Las enzimas fosfatasas tienen la particularidad de catalizar la hidrólisis de los ésteres y anhídridos contenidos en la MOS (Tabatabai, 1994). Este proceso es de importancia, ya que si se considera que entre 80 y 90% del P del suelo



está atrapado en forma orgánica y no puede ser absorbido por las plantas, por la cual la hidrólisis de compuestos de P-orgánico a fosfatos inorgánicos primarios ($\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$) y secundarios (HPO_4^{2-}) es llevado a cabo por las fosfatasas que ayudan a la absorción del elemento.

Los Bosques Templados de Montaña (BTM) en México se distribuyen en cadenas montañosas principalmente de climas templados-fríos (12 y 23 °C), son ecosistemas de subhúmedos a templado húmedos, con una precipitación anual entre 600 y 1,000 mm. Podemos definir a los bosques templados como comunidades dominadas por árboles mayormente pinos y encinos acompañados por otras varias especies, teniendo 50% de especies de pino y cerca de 33% de encinos; existiendo otras variantes donde dominan algunas otras coníferas, como los bosques de oyamel, los de ayarín o pinabete y otros, con estimaciones de cerca 7,000 especies de plantas en bosques templados (CONABIO, 2021).

Los BTM tienen una distribución potencial alrededor de 22.28 % de la superficie del país, pero debido a la sobreexplotación, contaminación y uso no sustentable, ocupan actualmente 16 % del territorio mexicano, es decir 32,330,000 ha, destacando que, ya desde el 2001 el 5.23 % estaba bajo protección. Cabe destacar que estos ecosistemas son de importancia ambiental, social y económica, cumpliendo con los servicios ecosistémicos, conservación de especies y representando un papel importante en los ciclos biogeoquímicos de diversos elementos (CONABIO, 2021).

Los BTM se distribuyen en mayor grado en Baja California, a lo largo de las Sierras Madre Occidental y Oriental, en el Eje Neovolcánico, la Sierra Norte de Oaxaca y al sur de Chiapas entre 2,000 y 3,400 m. Respecto a la Edafología los BTM se han encontrado en 23 tipos de suelo, destacando los *Leptosols*, *Luvisols*, *Regosols*, *Phaeozems*, *Cambisos*, *Umbrisols*, y *Andosols*, estos últimos derivados de materiales volcánicos, su degradación y erosión por cambios de uso suelo, disminuyen sus contenidos de nutrientes y alteran sus propiedades (CONABIO, 2021).

La calidad del suelo puede ser definida como su condición o “salud” vinculada a las necesidades humanas (agrícola, forestal, de conservación y manejo ambiental) (Pieri *e al.*, 1995). Al contrario del agua o del aire que cuentan con indicadores para evaluar su calidad,



en los suelos en general, y particularmente en los de BTM se necesitan indicadores sensibles que permitan evaluarla.

Entre los indicadores sensibles para evaluar la calidad del suelo se tiene a la actividad de las fosfatasas ya que es un proceso que ocurre en el ecosistema y responde a variaciones en las interacciones químicas, físicas y biológicas (Cruz-Flores, 2006 b).

Debido a lo anterior, el monitoreo de la estequiometría del P y su interrelación con otros elementos e indicadores edáficos, propiedades físicas, químicas y bioquímicas del suelo, permitirán la comprensión de procesos y factores que son clave en la calidad del ambiente de los BTM, además de proponer indicadores propios para este ambiente que serán útiles para investigaciones posteriores y estrategias de conservación principalmente en el ANP “PN-IP” y su zona de influencia.

Ilustración de: Andrés Agustín García B.



**PLANTEAMIENTO,
JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y
OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**



2. HIPÓTESIS

Los suelos con mayor cantidad de P-extractable, presentan menor actividad de fosfatasa ácidas y alcalinas, y con el aumento de la altitud ($< T$ °C), disminuye la concentración de P-disponible e incrementa la actividad de las fosfatasa.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Una de las funciones importantes del suelo forestal en los BTM, es la aportación de nutrientes tomados de la MOS para el crecimiento de la vegetación. Y así mismo la concentración de elementos esenciales en el ecosistema es un factor de gran importancia para conocer la calidad del suelo.

La mayoría de los Parques Nacionales (PN) y ANP son BTM, y su importancia radica en el suelo, ya que aquí se realizan funciones vitales desde la aportación de nutrientes, la recarga de mantos freáticos, intercambio de gases, entre otras, los cuales son factores de interés para conocer tanto la calidad del suelo y del ambiente.

Algunos otros beneficios que se obtienen de estas Reservas Naturales son:

- Conservar la biodiversidad y los ecosistemas,
- Resguardar el hábitat de especies en peligro,
- Preservar prístinos los grandes escenarios naturales,
- Garantizar la diversidad cultural,
- Promover la educación y la recreación,
- Impulsar la investigación,
- Proteger los yacimientos paleontológicos



El presente trabajo fue desarrollado en once zonas de estudio encontradas dentro de una vertiente específica en su geomorfología, el Eje Neovolcánico Transmexicano, en donde se sitúa el PN-IP y su zona de influencia; donde se presenta un origen geológico de origen ígneo extrusivo, que presenta una variedad en tipos de suelo, a diferentes altitudes y grado de conservación, por tal motivo presentaron diferencias en la disponibilidad de P y la actividad de las fosfatasas.

La disponibilidad del P es fundamental para el crecimiento de las especies forestales; este elemento es liberado en forma orgánica (P_2O_5), en la solución del suelo para las plantas por acción microbiana o por hidrólisis enzimática, por tal motivo dar a conocer la actividad enzimática de las fosfatasas es de vital importancia para la conservación y aprovechamiento sustentable para los bosques forestales

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar los contenidos de P-extractable con los métodos Olsen y Bray I, la actividad de las enzimas fosfatasas y sus relaciones con las propiedades de suelos forestales en un gradiente altitudinal del PN-IP y su zona de influencia con fines de proponer factores para evaluar la disponibilidad de P extractable.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la disponibilidad del P-extractable con dos métodos y comparar sus interacciones con la actividad fosfatasa y su contribución a la disponibilidad de P
- Proponer un nuevo factor para el mejor rendimiento del P-extractable con relación a las propiedades del suelo de la zona de estudio



MARCO TEÓRICO

Ilustración de: Andrés Agustín García B.

5. MARCO TEORÍCO

5.1. CONCEPTO DE SUELO

El suelo es uno de los recursos naturales más importante de la nación (SEMARNAT, 2000), se puede asimilar que una de las grandes virtudes del planeta tierra es el suelo; una capa delgada entre la atmósfera y la corteza terrestre, que sostiene la vida en los ecosistemas terrestres, y que ha tenido una gran importancia para la vida humana.

La definición del suelo mismo ha tenido diversos matices, según el autor, la época en la que aterriza, según su ámbito científico y su uso. Anteriormente el suelo era tratado como el sitio para ubicar sus semillas y producir sus cosechas (agricultura), el recubrimiento terroso que hay sobre un cuerpo rocoso, el sitio sobre el cual colocará sus estructuras o el sustrato que le suministrará algunos de los materiales que requiere para hacerlas (geología y construcción), o uno de los componentes del ecosistema que estudia donde se producen reacciones entre las fases sólida, líquida y gaseosa (ecología y química).

Pero no fue hasta principios del siglo XIX cuando se le dio un significado natural, científico y se empezó a ver como un cuerpo natural (Jaramillo- Jaramillo D., 2002)

Según la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo (SECS) se establecen tres definiciones para llegar a distintos tipos de usuarios, las cuales son mencionadas a continuación:

1. *“Cuerpo Natural que se ha formado en la superficie terrestre, tiene por componentes materiales minerales (menores o igual a 2 mm) materiales orgánicos y biota. En su espacio poroso puede contener líquidos, gases y organismos vivos. Tiene aptitud para: i) sustentar los ecosistemas terrestres al permitir el crecimiento de plantas y otros organismos, a lo que suministra nutrientes, oxígeno, agua y anclaje y, en su caso, hábitat”* (Porta., 2019).
2. *“Sistema natural vivo, dinámico, organizado y complejo, que es: i) el resultado de procesos formadores físicos y fisicoquímicos, químicos y biológicos que tienen lugar tras instalarse microorganismos y plantas en un material originario natural más o menos meteorizado o en un material de origen antrópico; ii) el resultado de*

intercambios de masa y de energía con su entorno; iii) el resultado de una organización de los materiales, lo que conduce a la diferencia de distintas capas y horizontes, que están relacionados genéticamente entre ellos debido a los procesos formadores (ganancia, pérdida, transferencia, transformación, edafoturbación), que han actuado bajo el control de un conjunto de factores formadores (roca madre, clima, topografía, organismos vivos y tiempo). Esta definición incluye los sedimentos de los suelos de zonas demasiadas frías para permitir el desarrollo de plantas superiores” (Porta, 2019).

- 3. En un enfoque más especializado se puede definir como una interfaz entre: la i) biósfera; ii) litósfera (con la que coincide en su límite inferior con una roca o material originario, con una transición generalmente indefinida y gradual); iii) la atmósfera y iv) la hidrósfera. El suelo forma un continuun de espesor variable que construye la cubierta edáfica de cuya historia, dinámica y propiedades actuales es el resultado y cuya diversidad define la edafodiversidad de un edafopaisaje (Porta, 2019).*

En el 2017 se aprueba la siguiente definición, del concepto de suelo por la junta del Soil Science Society of America Journal:

“Capa o capas de material mineral, orgánico o ambas cosas, generalmente suelto, que está afectado por procesos físicos, químicos y/o biológicos en o cerca de la superficie planetaria y que generalmente contiene líquidos, sólidos, gases y biota... Así el suelo es el conjunto de materia orgánica (MO) o mineral no consolidada en la superficie de la tierra que ha estado sujeta y muestra los efectos de factores genéticos y ambientales de: clima (incluyendo agua y efectos de la temperatura), y macro y microorganismos, condicionados por el relieve, que actúan sobre los materiales durante un período de tiempo (Soil Science Society of América, 2017)”.

Según la FAO (2023) el suelo se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas, siendo un cuerpo natural que consta de capas (horizontes) compuestas de materiales minerales meteorizados, MO, aire y agua. Además, es el producto final de la influencia del tiempo combinado con el clima, topografía, organismos, de material parental y como



resultado se difiere en distintos tipos por su material parental, su textura, estructura, consistencia, color, propiedades físicas, químicas y bioquímicas (Hernández- Salgado, 2020)

La definición de suelo depende del área de interés que se involucra con él. Desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y que es explotada por las raíces de las plantas y a partir de la cual obtienen sostén, nutrimentos y agua; y existen varias definiciones que incorporan su papel fundamental en los procesos ecosistémicos, debido a las funciones y servicios que realiza tales como la regulación y la distribución del flujo de agua o como amortiguador de los efectos de diversos contaminantes. (SEMARNAT, 2012).

Desde un punto ecológico el suelo es un subsistema de los ecosistemas terrestres, formado por material no consolidado, mineral u orgánico sobre la superficie de la tierra que se ha sometido durante años a factores tanto genéticos como ambientales (Astudillo- Bravo, 2006), dando este sentido ecológico en el suelo se realiza el proceso de descomposición, proceso importante para la re-obtención y recirculación de nutrientes, además de ser un filtro natural, reteniendo agua por capilaridad el paso de esta misma, haciendo posible que existan y vivan microorganismos acuáticos (formando microhábitat).

Como es de imaginar el concepto de suelo es importante para los seres vivos entre ellos el ser humano, por ello Etchevers e investigadores (2000) consideran a este recurso como un sistema vivo y dinámico, cuyas funciones primordiales son mantener la productividad de especies vegetales que se establecen en el suelo, la biodiversidad, calidad del aire y agua, así como la salud del ser humano y su hábitat.

Para fines de esta investigación como ya se había mencionado el suelo es esa interfaz entre la biósfera, litósfera (donde choca el límite inferior con la roca o material parental y su transición), la atmósfera y la hidrósfera, que forma un continuum espesor la cual forma una cubierta edafológica con historia, dinámica e interacción que lo constituyen, por lo cual podemos considerar al suelo como un sistema vivo, dinámico y vital para los ecosistemas terrestres, que se van formando alrededor de una tasa de un centímetro por cada 100 a 400 años (Doran y Parkin, 1994 citado por Granados-Damián, 2003) y debido a lo anterior, éste se convierte en un recurso no renovable, respecto a la escala humana de tiempo.

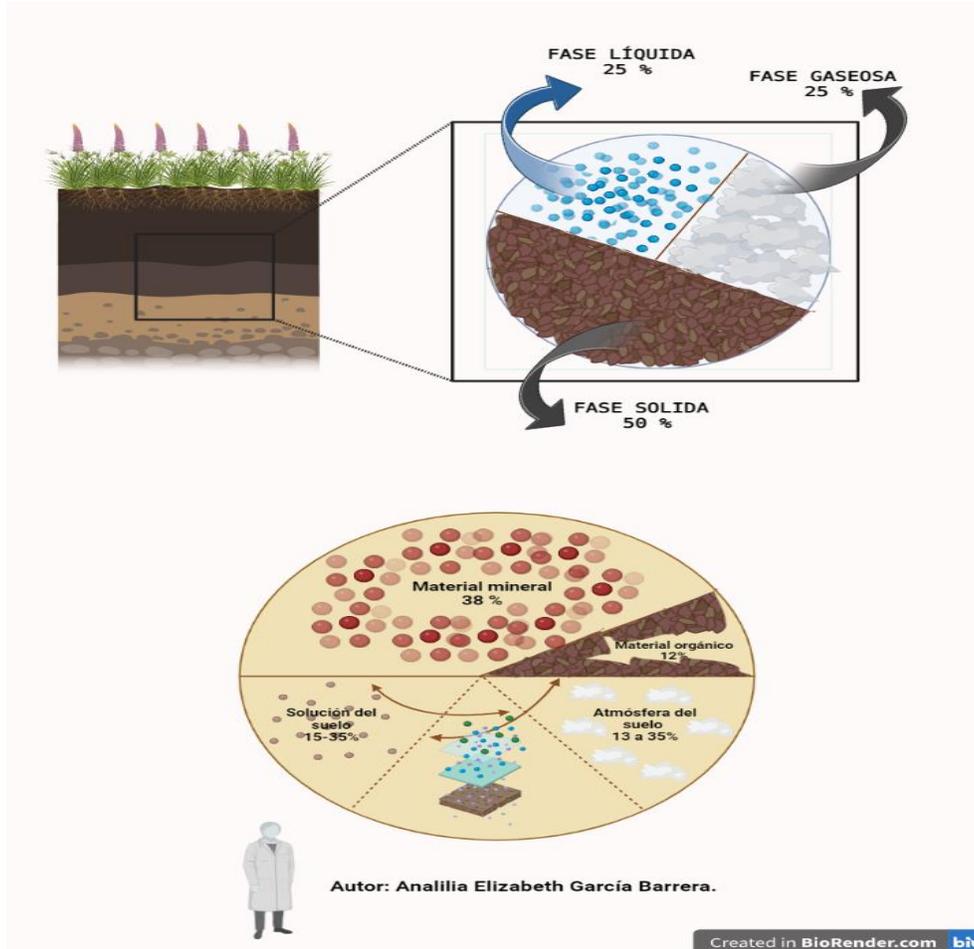


Figura 1. Proporción aproximada de cada fase del suelo y variación proporcional entre las proporciones de las fases líquida y gaseosa con base en la entrada o pérdida de agua en del suelo (Modificado de: Cruz – Flores, 2006 Creado con BioRender.com)

El suelo presenta así mismo tres fases de estado (figura 1): líquida (25% de agua), sólida (50% - 38% de partículas minerales: limo, arena y arcilla, y 5% de MO) y gaseosa (25%) organizado en capas o horizontes (Doran y Parkin, 1994; Sumner, 2000) por lo cual posee funciones importantes, de las más conocidas es la de soporte y suministro de nutrientes a las plantas, por ello el desarrollo de las plantas depende de condiciones (figura 2) desde climáticas (temperatura, humedad, precipitación, etc.), fisiológicas (respiración, fotosíntesis), biológicas (procesos de microorganismos, interacción entre organismos, entre otras) hasta edáficas (textura, MOS, pH, disponibilidad de nutrimentos, salinidad, etc.) que

determinan la adquisición, utilización o asimilación de elementos esenciales para su crecimiento y desarrollo, brindándonos servicios ecosistémicos y alimento (Doran y Parkin, 1994; Cruz-Flores 2006).

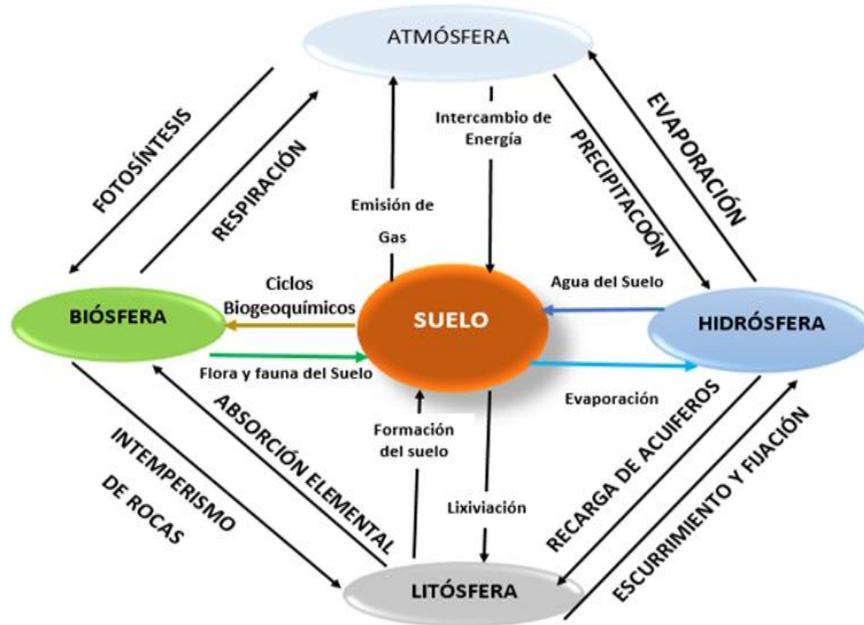


Figura 2. Interacción entre factores físicos y procesos biológicos en y sobre el suelo. Tomado de Cruz-Flores, 2006.

El suelo al considerarse un sistema natural vivo y dinámico, que genera diversos servicios ecosistémicos y desempeña múltiples funciones entre las cuales son:

- la productividad de las especies vegetales que en él se establecen
- la producción de biomasa (forraje, alimento, fibra, biocombustible, masa forestal, productividad biológica sustentable)
- la biodiversidad en general
- mantener y mejorar calidad del aire y del agua (control del filtrado, intercambios iónicos, almacenamiento y filtro ambiental).
- regulación del ciclo hidrológico: al controlar la entrada de agua en el suelo (infiltración), el almacenamiento y transferencia de agua.
- atenuación de contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental)
- la salud humana y el hábitat

- H. transformación de sustancias que recibe el suelo (biorreactor): evolución de la MO.
- I. fijar gases de efecto invernadero: secuestro de carbono, retención de MOS durante un tiempo prolongado.
- J. regulación de microclima: al intervenir en la evaporación y la radiación solar.
- K. reserva genética y conservación del hábitat
- L. fuente de materia prima
- M. protección de restos arqueológicos, historia geológica y geomorfológica

(Seybold *et al.*, 1998; Etchevers *et al.*, 2000; Porta *et al.*, 2019;).

Las propiedades y funciones de cualquier suelo son dependientes del tipo de constituyentes (minerales y orgánicos) y sus proporciones, de sus flujos y fluctuaciones, tanto en el espacio como en el tiempo y procesos que se desarrollan en él, lo cual puede inferir en la salud del bosque, al depender de estas integraciones y de los nutrimentos tomados del suelo; entonces la calidad de este se puede medir mediante el estado nutricional (figura 3) de especies vegetales (Narváez, 2001; Velásquez *et al.*, 2007; Valderrábano-Gómez, 2013)

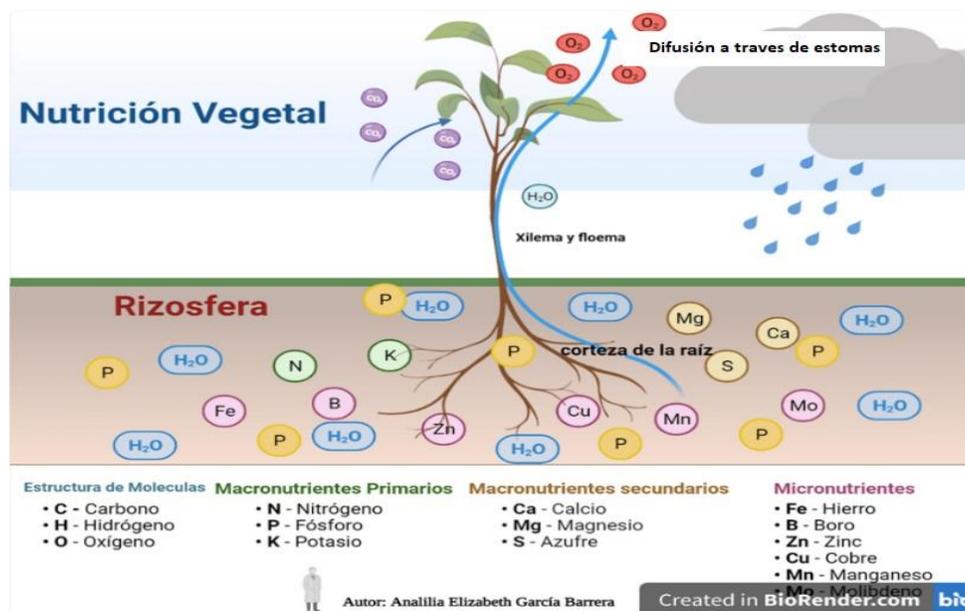


Figura 3. Nutrición Vegetal Creado con BioRender.com

El suelo superficial modificado bioquímicamente se puede distinguir del material subyacente por:

- Contenido relativamente alto de MOS (2-5%)



- Abundancia de raíces de plantas superiores y microorganismos del suelo
- Meteorización más intensa
- Presencia de horizontes características producto de dendritas orgánicas en diferentes estados de composición

(Valderrábano-Gómez, 2013)

Dentro de materia jurídica el suelo no se define de una manera clara, ya que ninguna ley lo regula, en totalidad, no existe una ley de suelos en la República Mexicana o internacionalmente (Barrientos – Reyna, 2015). A pesar de esto existen tres Normas Oficiales Mexicanas que expresan una definición de este recurso natural:

1. Norma Oficial Mexicana NOM-138- SEMARNAT/SS-2003, que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en el suelo y las especificaciones para su caracterización y remediación; donde define ***“El suelo es: Un material no consolidado, compuesto por partículas inorgánicas, MOS, agua, aire y organismos que comprenden desde las capas superiores de la superficie terrestre, hasta diferentes niveles de profundidad”***.
2. Norma Oficial Mexicana NOM-001- ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes naciones; donde se define al suelo como: ***“Cuerpo receptor de descargas de aguas residuales que se utiliza para actividades agrícolas”***.
3. Norma Oficial Mexicana NOM-001- SEMARNAT-2004: donde define al suelo como: ***Material no consolidado de origen natural, compuesto por partículas inorgánicas, MOS, agua, aire y organismos que incluyen aquel alterado por actividades antropogénicas”***.



5.2. SUELO FORESTAL

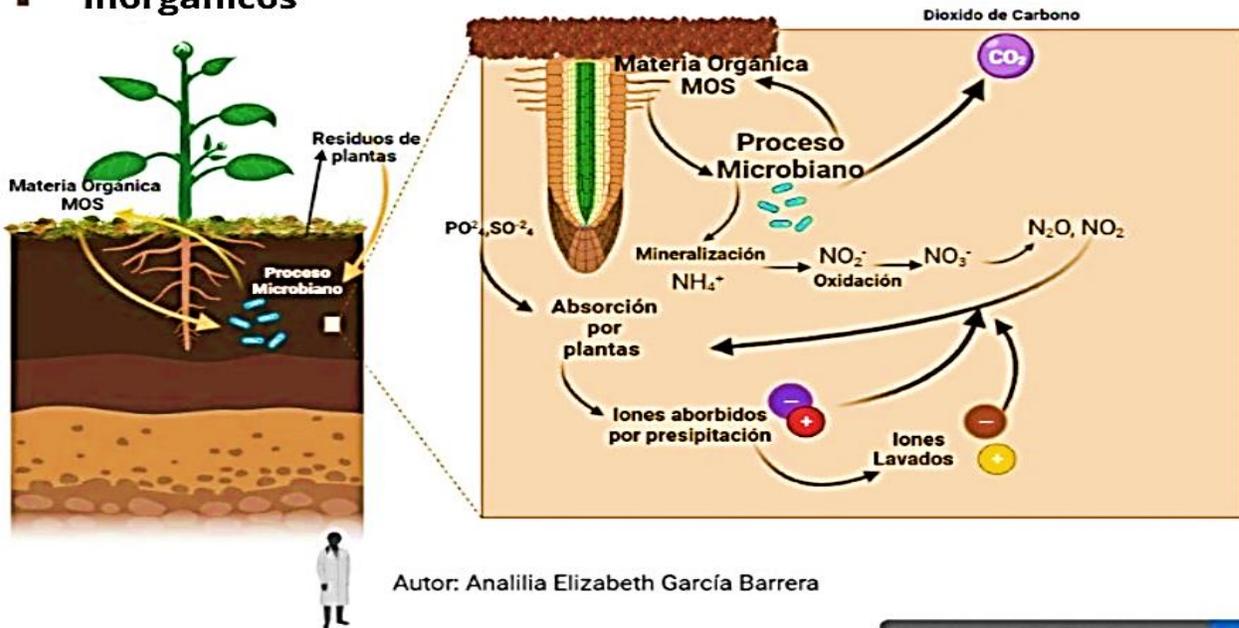
Como se ha determinado, el suelo es producto de interacciones de procesos pedogenéticos, intemperización, neoformación de minerales, descomposición y humificación de MO, la formación de estructuras, translocación de materia además de uso y manejo del hombre (Rodríguez- Juárez, 2018). En los suelos forestales se lleva una parte importante de los ciclos biogeoquímicos, para el reciclamiento de los nutrientes que están presentes en este tipo de suelos. Así, el suelo forestal se define también como una parte de la superficie terrestre, un material mineral y orgánico no consolidado ni perturbado que sirve como medio para el sostenimiento y desarrollo de la vegetación forestal (COLPOS, 2001).

Se caracteriza por la cubierta forestal y su capa superficial resultado de las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo suelo, las cuales son distintas de otros suelos, este tipo de suelos tiene propiedades que se asocian a un microclima, al reciclaje de elementos, a una población microbiana específica y a la formación de ácidos orgánicos que se generan por la descomposición de MOS. Además, podemos decir que estos suelos son de importancia ya que en ellos se llevan a cabo procesos dinámicos como los ciclos de nutrimentos (figura 4) (Honorato, 2000; García-Hernández, 2004).

Manifiesta características particulares adquiridas bajo la influencia de tres factores que son poco comunes en otros suelos, como: Hojarasca, humus forestal, raíces de árboles y organismos específicos, cuya existencia depende de la presencia de vegetación forestal (Pritchett, 1991; Bockheim, 1991; Martínez-Cohetero, 2009)

El suelo forestal es donde la morfología y dinámica del perfil de suelo mantienen características originales o cercanas a ellas; consta de materia mineral y orgánica impregnada de diversas cantidades de agua y aire, además de estar habitado por microorganismos y macroorganismos. Estas características peculiares que son adquiridas bajo la influencia de tres factores principales (poco comunes en otros tipos de suelos), la hojarasca o humus forestal, raíces de árboles y organismos específicos, cuya existencia depende de la vegetación forestal, además la presencia de un mantillo -horizonte orgánico - sobre el suelo mineral (Bockheim, 1991)

Nutrientes Inorgánicos



Created in BioRender.com

Figura 4. Mineralización y destino de nutrientes inorgánicos. Creado con BioRender.com

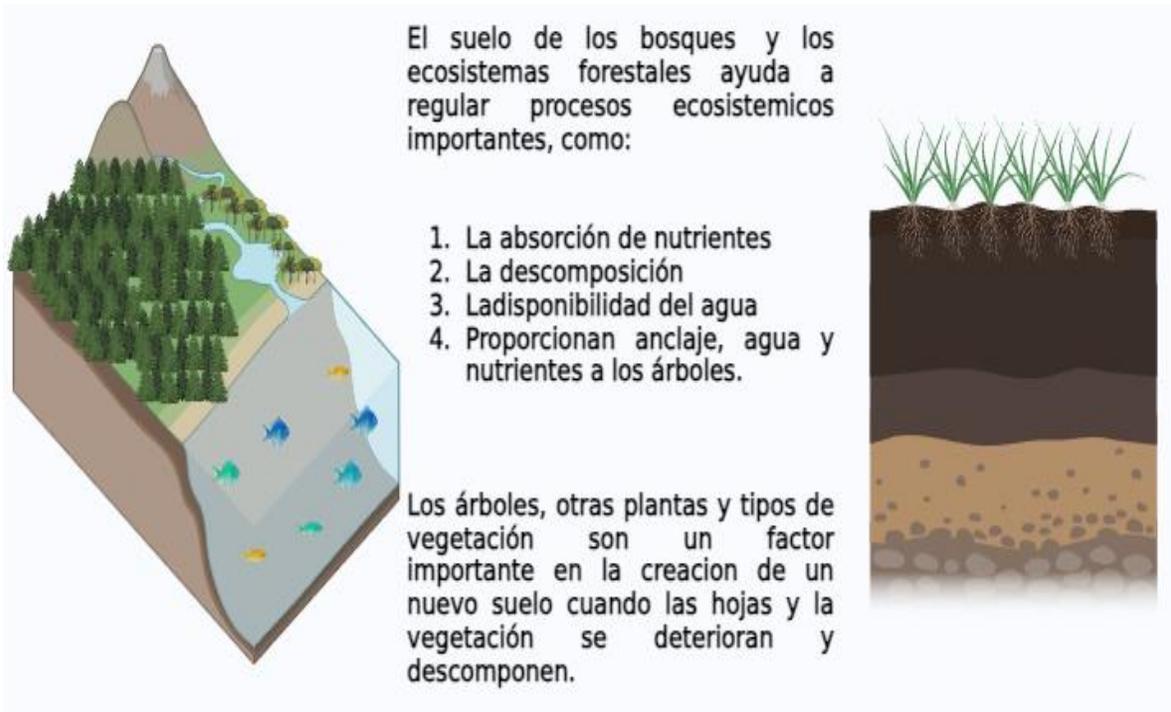


Figura 5. El suelo de los bosques y ecosistemas forestales ayuda a regular procesos ecosistémicos importantes. Creado con BioRender.com

Los suelos forestales son importantes ya que ayudan a regular procesos ecosistémicos (figura 5):

- Ofrecen soporte mecánico
- Retienen y transmiten agua y gases
- Son hábitats de macro y microorganismos
- Retienen, intercambian y fijan sustancias nutritivas
- Adsorción de nutrientes
- Descomposición

Desde una vista amplia se puede decir que el suelo forestal es aquel suelo que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal (Führer, 2000) con un proceso complejo de formación.

De acuerdo al segundo párrafo del artículo 53 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, el suelo forestal: *“Se considera dentro de esta categoría las reservas y zonas forestales, la zona de protección de ríos, lagos, lagunas, manantiales y demás cuerpos considerados aguas nacionales, particularmente cuando estos se destinen al abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones”*.

Por otra parte, el suelo forestal comprende los terrenos forestales y terrenos de aptitud preferentemente forestal, que se define en la Ley Federal de 1997, en el artículo 3 y 3 BIS:

Artículo 3° Fracción XVII: Terrenos Forestales: Son aquellos que están cubiertos de vegetación forestal, excluyendo aquellos situados en zonas urbanas.

Artículo 3° BIS Fracción XIV: Terrenos de aptitud preferente forestal: Son aquellos que no están cubiertos por vegetación, por sus condiciones de clima, suelo y topografía, podría incorporarse al uso forestal, excluyendo los situados en áreas urbanas y los que sin sufrir degradación permanentemente, pueden ser utilizados en agricultura y ganadería.

En la actualidad estos conceptos se retoman en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable en el artículo 7, Fracciones XL y XLI respectivamente, mientras que en la Fracción XLII indica que es un terreno temporalmente forestal, indicando lo siguiente:

- Fracción XL: “Terreno Forestal: El que está cubierto por vegetación forestal”.

- Fracción XLI: “Terreno preferentemente forestal: Aquel que habiendo estado, en la actualidad no se encuentra cubierto por vegetación forestal, pero por sus condiciones de clima, suelo y topografía resulte más apto para el uso forestal que para otros usos alternativos, excluyendo aquellos ya urbanizados”.
- Fracción XLII: “Terreno temporalmente forestal: las superficies agropecuarias que se dediquen temporalmente al cultivo forestal mediante plantaciones forestales comerciales. Las consideraciones de terreno forestal temporal se mantendrán durante un periodo de tiempo no inferior al turno de la planeación”.

(Barrientos – Reyna, 2015)

En este tipo de suelos se presentan cuatro tipos de horizontes típicos, bien drenadas en regiones templadas (figura 6) (Spurr, 1982; Pritchett, 1992; Colli- Cortés, 2015)

- **HORIZONTE O (Capa orgánica):** contiene tres capas que son el mantillo que este compuesto por restos orgánicos no alterados de plantas y animales, capa de fermentación de MOS descompuesta donde aún se puede conocer su fuente y humificación de MOS descompuesta y amorfa.
- **HORIZONTE A (Zona de elevación):** capa superficial del suelo mineral que es lavado por el movimiento descendiente del agua y de los ácidos orgánicos e inorgánicos.
- **HORIZONTE B (Zona de acumulación):** está caracteriza por la deposición de óxidos de hierro y aluminio, partículas de arcilla y partículas orgánicas.
- **HORIZONTE C:** Material parental no intemperizado.

Debido a lo anterior podemos decir que el insumo más importante de los suelos forestales es la MOS, así la hojarasca de los arboles contribuye a la acumulación de esta materia en el suelo e influye considerablemente en la capa mineral subyacente, así como para las poblaciones asociadas de microorganismos y macroorganismos presentes en el suelo.

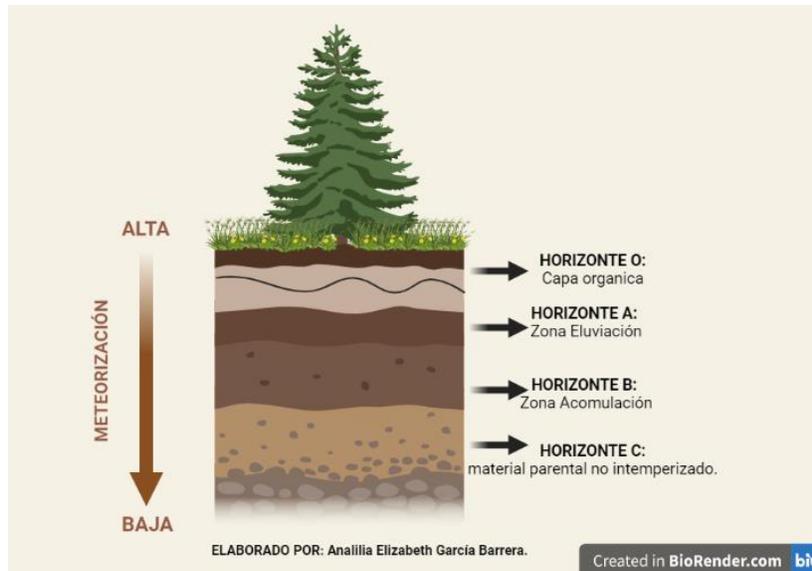


Figura 6. Horizontes en un suelo forestal. Creado con BioRender.com

La figura 7 muestra los perfiles de un *Andosols* y un *Cambisols* (suelos forestales), presentes en el eje neovolcánico en el centro de México, formados a partir de vidrio volcánico y material piroclástico (andesita y riolita) cuyas diferencias, en la morfología de su perfil, es consecuencia tanto de mayor tiempo de desarrollo (en *cambisols*) y de la topografía principalmente, dado que el tipo de vegetación que soportan ambos suelos es similar (bosques de *Pinus sp* y *Abies religiosa*).

El espesor y contenido de MOS que se aprecia por un color más oscuro en el horizonte superior (A) es menor en el *Andosols*, el cual además no ha desarrollado un horizonte de transición entre este último y el horizonte que incluye al material parental (C), mientras que el *cambisols* muestra una acumulación de arcilla y materia orgánica coloidal en un horizonte (B) intermedio entre el superficial (A) y el correspondiente al material parental (C).

Los organismos vivos son de importancia para ecosistemas forestales en la ecología de los suelos, ya que cumplen funciones complejas para la formación de los suelos, eliminación de hojarasca disponibilidad y reciclaje de nutrientes, así como metabolismo y crecimiento de árboles. La actividad de estos organismos se determina y se relacionan por factores del suelo como la humedad, temperatura, ventilación, acidez, así como la disponibilidad de nutrientes y energía.

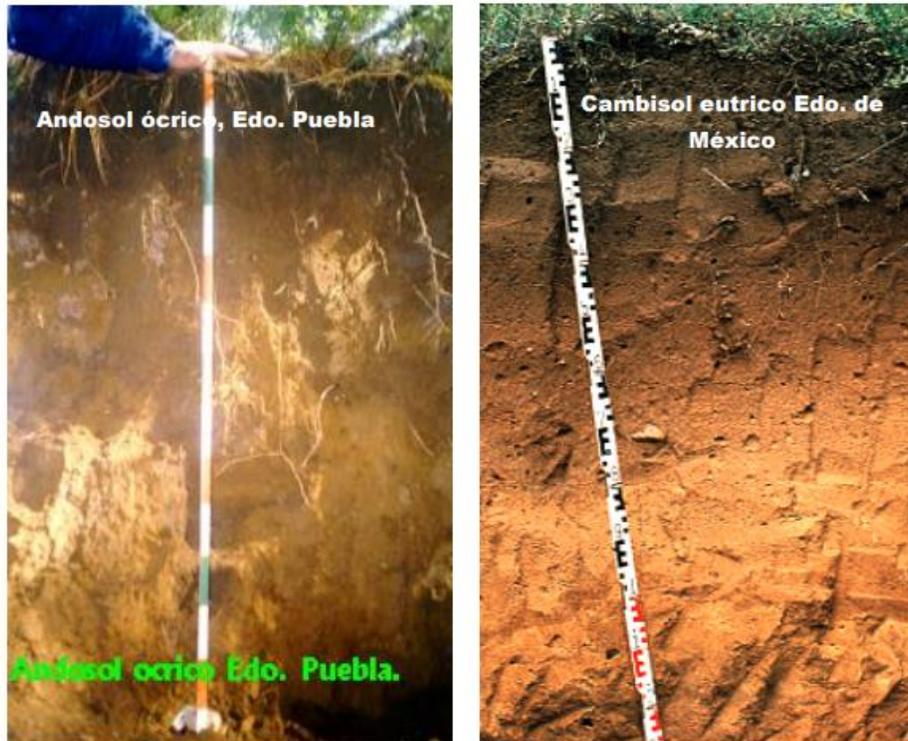


Figura 7. Andosol y Cambisol de la zona del PN-IP.

Según Pritchett (1992) a lo largo de todo el perfil de suelo forestal se haya la microflora como bacterias autótrofas, hongos, organismos heterótrofos, actinomicetos, algas, artrópodos, arácnidos, diferentes tipos de vertebrados; ocupando un lugar determinado, afectando la distribución, números y actividad de estos organismos. Por lo cual podemos decir que, la máxima concentración de microorganismos se encuentra a pocos centímetros superficiales de los suelos forestales con una rápida disminución de la mayor parte de organismos a medida que aumente la profundidad del suelo, debido a la disminución de MOS y oxígeno.

Los suelos forestales tienen una escala de pH de 3.5 a 6.5 aproximadamente, a pesar de ello los suelos donde están presentes bosques de coníferas suelen tener pH más ácidos que los bosques con maderas duras como el nogal, esto se puede deber a que las hojas de coníferas tienen menor sustancias básicas. La densidad aparente de estos sitios varía en capas orgánicas de 0.2 hasta casi 1.9 g cm⁻³ en arenas gruesas, y la textura varía entre materiales arcillosos

compuesto de moléculas de aluminio, silicio y oxígeno presentes en suelos de este tipo y de ambientes templados (Brady, 1974; Colli-Cortés, 2015).

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable en México define como “vegetación forestal” al “conjunto de plantas y hongos que se desarrollan en forma natural, formando diversos ecosistemas, dando lugar a la convivencia equilibrada de otros recursos y procesos naturales”. Según esta definición, el bosque es definido como todo “suelo forestal”, declarando su gobernación sobre todo tipo de ecosistemas ya sea para aprovechar sus recursos o preservarlos (figura 8).

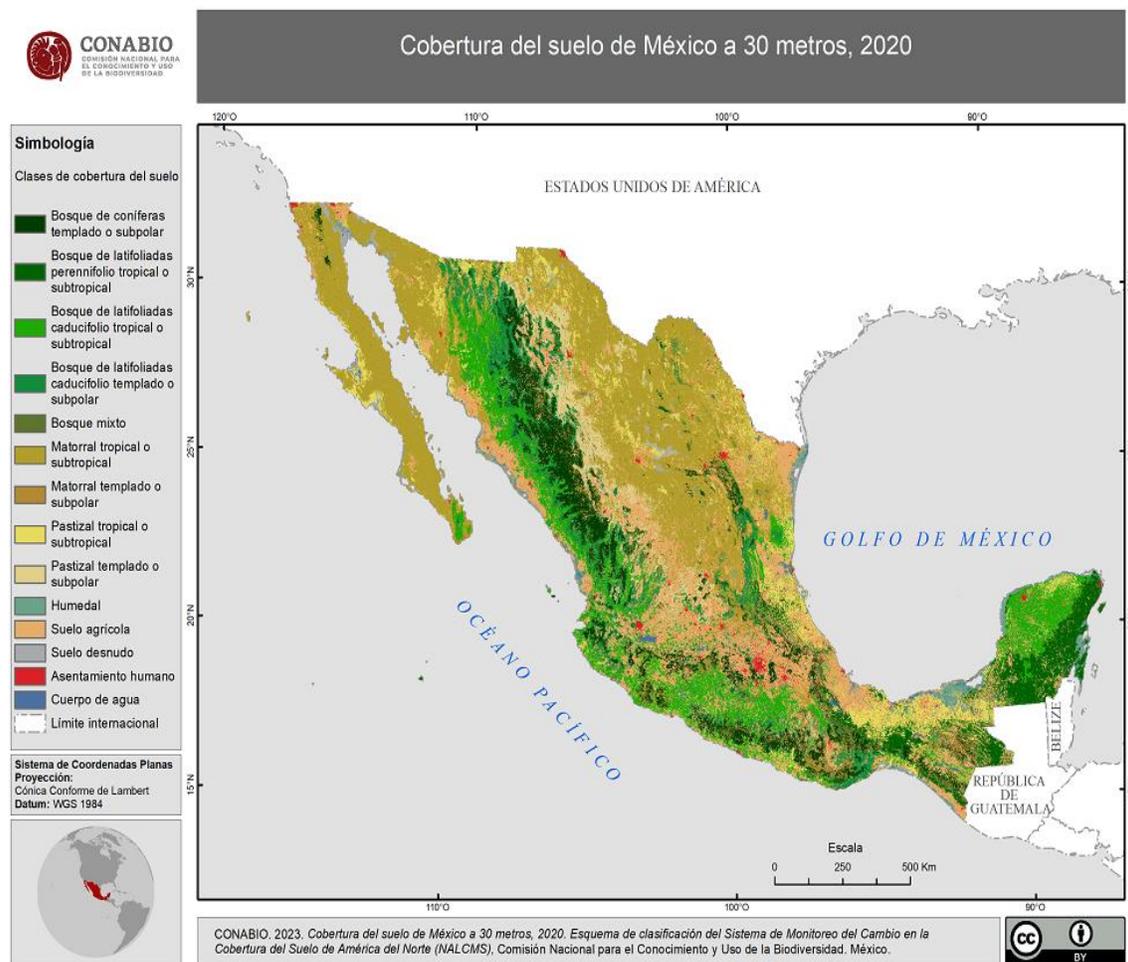


Figura 8. Clasificación del sistema de monitoreo del Cambio en la cobertura del suelo 30 metros, en México, 2020, Recuperado de GEOPORTAL CONABIO:

http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250ks3gw

5.3. GÉNESIS DEL SUELO

Para que un suelo se forme requiere de un tiempo muy prolongado, y que la intervención de todos los factores que participan en su formación se da en términos del tiempo geológico, de manera que se ha estimado que la formación de 1 cm de suelo puede requerir de hasta 10,000 años o más. No obstante, su pérdida por mal manejo puede ser de muchos centímetros durante el periodo de vida de un hombre (Cruz-Flores, 2006).

La génesis o pedogénesis es el conjunto de cambios en las propiedades del suelo, procesos orgánicos e inorgánicos que alteran los materiales parentales del suelo durante un lapso de tiempo (figura 9) (Targulian y Krasilnikov, 2007; Dixon, 2013; Vargas-Rodríguez, 2021).

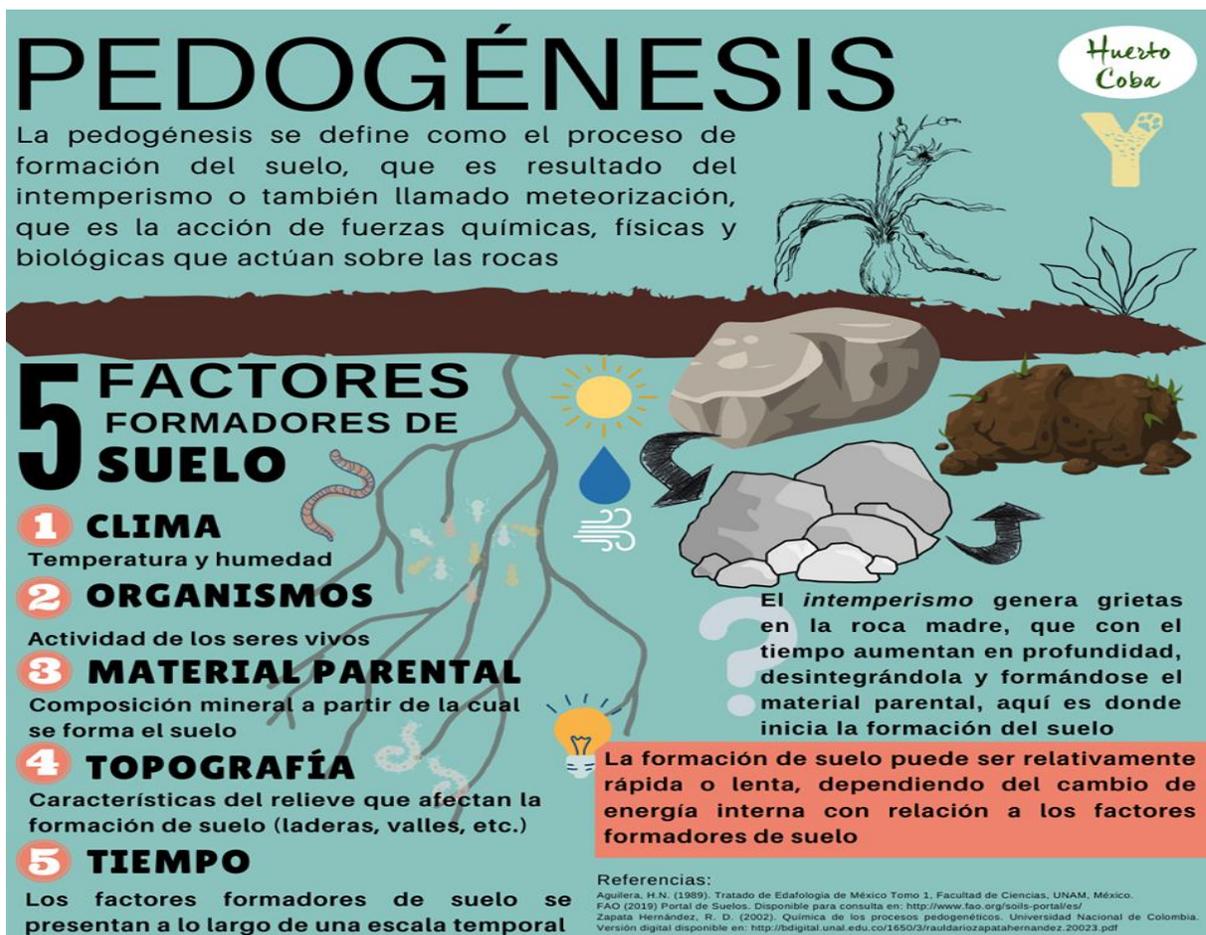


Figura 9. ¿Qué es la Pedogénesis? Tomado de Huerto COBA FB (2020) - Referencias: Aguilera 1989; Zapata – Hernández (2002); FAO 2019.

El desequilibrio existente en un medio natural, entre condiciones como: temperatura, humedad y presión, en el espacio atmósfera y litósfera ha provocado, sobre las rocas y los minerales que ellas poseen, una descomposición y desintegración física y química en un proceso denominado intemperismo. La intemperización de rocas muy duras precede al proceso de formación de suelos y en rocas blandas, el fenómeno de intemperismo, lo acompaña (Cruz-Flores, 2006).

Así procesos como este (intemperismo), la transformación de MOS, traslocación, lixiviación y la pedoturbación, etc., dirigen el desarrollo de propiedades pedogenéticas, necesarias para la formación y evaluación del suelo (Targulian y Krasilnikov, 2007).

El intemperismo ocurre tanto en el suelo (intemperización edafoquímica) como por debajo de él (intemperización geoquímica). En el intemperismo geoquímico se presenta la oxidación, reducción, la hidratación, disolución e hidrólisis de los minerales presentes en las rocas. Por otro lado, en el intemperismo edafoquímico se presenta también todos los factores anteriores como la oxido-reducción y además pérdida de potasio en las micas, el paso alternativo del aluminio de las estructuras arcillosas a óxidos hidratados, formación de arcillas “integrados” por depositación de “islas” de hidroxialuminio.



Figura 10 a. (Izquierda) Suelo originado a partir de la descomposición de rocas ígneas extrusivas, en un ambiente con vegetación de bosque de encino, con un RH ustico y un RT méxico, (Laboratorio de Génesis Edáfica COLPOS, 2020). (Derecha) Fotografía de Cambisol en el PN-IP (Granados, 2003).

Los efectos combinados en la formación del suelo, sobre el material parental y las rocas, son generados por la hidrólisis, hidratación, disolución, oxidación y reducción de tipo químico, con los procesos de humificación y transformaciones microbianas del nitrógeno y de los demás nutrimentos y, aunados a los procesos anteriores, la acción mecánica de las raíces de plantas superiores y fauna del suelo, generan productos de diferentes características en resistencia, solubilidad y composición como minerales resistentes no del todo intemperizados (Cuarzo, Zircon, etc.), óxidos hidratados, arcillas, aniones y cationes solubles y coloides orgánicos y organominerales (Cruz-Flores, 2006).

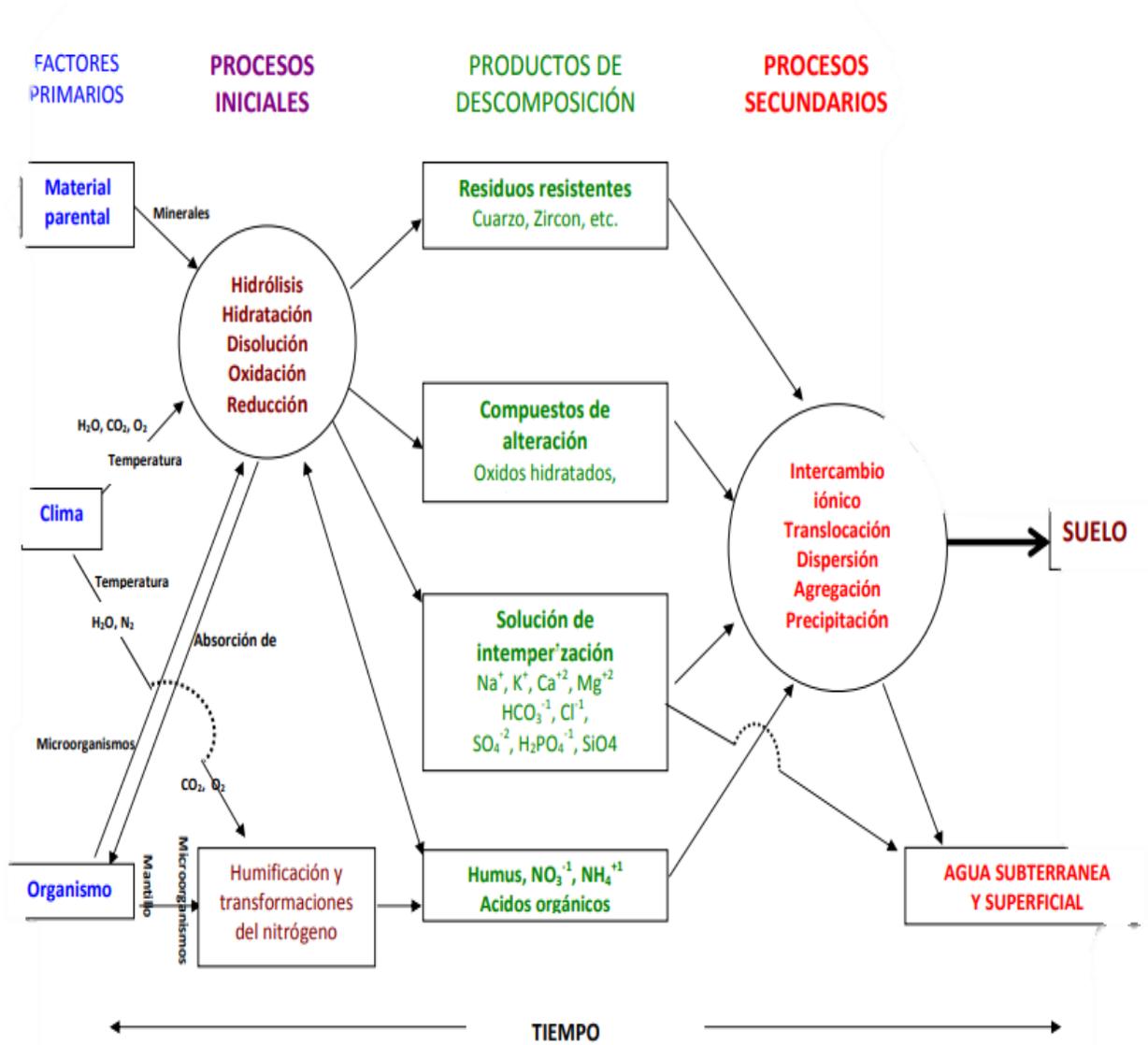


Figura 10 b. Formación del suelo. Tomado de Fitz Patrick, 1985. (pag. 108); Cruz-Flores, 2006 (pag. 10)



Con esta materia generada, se empieza a conformar el suelo gracias a otros procesos edafogénicos de tipo secundario como el intercambio iónico (intercambio catiónico e intercambio aniónico) que ocurre tanto en coloides inorgánicos como orgánicos, la translocación de coloides (eluviación en horizonte A e iluviación en horizonte B), la dispersión, la agregación y la precipitación de minerales para dar cuerpo y características especiales al suelo (figura 10 a, 10b)

Una vez que los procesos iniciales (hidrólisis, hidratación, disolución, oxidación y reducción humificación y transformaciones de nutrimentos) y procesos secundarios (intercambio iónico, translocación, dispersión, agregación y precipitación), actúan sobre los factores formadores de suelo, a lo largo del tiempo geológico, se desarrolla gradualmente el perfil, cuyos horizontes representan el grado de madurez que ha alcanzado (cuadro 1). Los horizontes del suelo son consecuencia de los procesos de formación del suelo. Son capas aproximadamente paralelas a la superficie cuyas características han sido impartidas por los procesos edafogénicos. Los principales horizontes y sus características se enlistan a continuación:

Cuadro 1. Características de cada horizonte y subhorizonte

HORIZONTE	SUBHORIZONTE	CARACTERISTICAS
O	O1	Horizonte orgánico (>20 a 30% de MOS) generalmente el material orgánico puede ser identificado con facilidad
	O2	Los restos orgánicos están suficientemente descompuestos (no se identifica su procedencia)
A	A1	Horizonte mineral superior (en suelos cultivados) es de color oscuro más fuerte que los horizontes subyacentes, por su alto contenido de MOS, pero el porcentaje de MOS debe de ser < a 20
	A2	Horizonte mineral de color más claro que A1(solo se presenta en regiones de alta precipitación)
	A3	Horizonte de transición más parecido a B2 que a A1 o A2
B	B1	Horizonte de transición parecido a A que a B2
	B2	Horizonte mineral más profundo debajo de A1 o A2 (tiene acumulación de pequeñas partículas) 15 a 46 cm de profundidad
	B3	Horizonte de transición C o R
C	C	Horizonte de material mineral suelto (parental)
R	R	Roca subterránea consolidada

Las características del suelo están determinadas por la interacción de los cinco factores principales de su formación: Material parental, clima, organismos topografía y el tiempo (figura 11); en los cuales suceden procesos que son constructivos y dan como resultado una configuración del suelo desarrollada a partir del material original (Cepeda-Dovala, 1991) como lo muestra la siguiente ecuación factorial:

$$s = f(Cl, b, r, p, t)$$

Dónde:

S = Suelo, **f** = función dependiente, **Cl** = Clima, **r** = relieve (Topografía), **b** = Biósfera (vegetación, organismos, hombre), **p** = material parental o roca madre y **t** = Tiempo.

Pensando en este enfoque factorial, es posible predecir el comportamiento de un suelo (o de alguna de sus propiedades) a partir del conocimiento de los factores que forman el suelo.



Figura 11. Factores formadores del Suelo. Creado con BioRender.com

En ambientes con diferentes tipos de vegetación, pueden desarrollarse grupos de suelo distintos como lo muestra la figura 12.



Figura 12. Efecto de la vegetación natural sobre la génesis del suelo (Modificado de Génesis - Los factores formadores del suelo Sanzano, 2019)

A continuación, se enuncian cada uno de los factores formadores del suelo:

5.4. MATERIAL PARENTAL

Singer y Muns (1999) definen al material parental como el estado del sistema suelo al tiempo cero de formación, a medida que transcurre el tiempo, siendo así, el factor más importante en la formación y distribución del suelo (Vargas- Rodríguez, 2021).

El material mineral también conocido material de origen, es heredado de la roca madre, este material es el principal ingrediente a partir del cual se forma la mayoría de los suelos. El material originario tiene una gran influencia en las propiedades de los suelos, tales como color, textura, estructura, mineralogía y pH.

Este material parental está formado preferentemente por materiales inorgánicos y/o materiales orgánicos, el material orgánico por lo general se compone por restos de plantas, no consolidados, en descomposición y el material inorgánico contiene un gran número de minerales formadores de rocas, que pueden estar consolidados e incluyen rocas como granito,

basalto y demás conglomerados, mientras que el material no consolidado comprende una amplia gama de depósitos superficiales.

Materiales arcillosos como esmectita ($\text{Na}_{0.33}\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), presente en suelos alcalinos, se forman a partir del intemperismo de rocas ricas en bases, siempre y cuando las condiciones de drenaje no permitan la lixiviación completamente de los elementos que la conforman (Krasilnikov *et al.*, 2013).

5.5. CLIMA

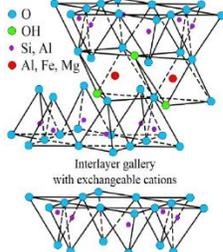
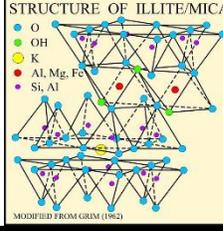
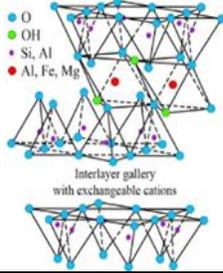
El clima es posiblemente el segundo factor que más influye sobre la formación del suelo, ya que este actúa sobre el material parental, determinando así la naturaleza e intensidad de la meteorización que ocurre en grandes áreas geográficas, también ejerce influencia sobre los organismos vivos y en alguna medida sobre los factores relieve y edad a través de su relación con los procesos erosivos y deposición de materiales de suelo (Sanzano, 2019; López-López, 2014) y determina la tasa y tipo de formación de suelos, así como la distribución de vegetación y el tipo de procesos geomorfológicos.

El clima del suelo tiene los mismos dos componentes principales que el clima atmosférico: temperatura y humedad; siendo estos los dos elementos climáticos más importantes que han sido correlacionados con las propiedades de los suelos, ya que ambas afectan la velocidad de los procesos físicos, químicos y biológicos.

A su vez la precipitación, evapotranspiración y las mencionadas en el párrafo anterior, son factores climáticos que además intervienen en la génesis y localización de los suelos (zonificación) y los contenidos de agua en la tasa de intemperismo del material parental, la erosión y salinización del suelo (Lal, 2015). La temperatura del mismo suelo juega un papel en la rapidez de fenómenos químicos de alteración de las rocas, minerales y los organismos, por lo cual la relación del clima con el suelo es estrecha.

El cuadro 2, muestra las relaciones clima-vegetación y evolución suelo, en condiciones con bajas temperaturas y alta precipitación, como las que prevalecen en el PN-IP con BTM, se forman suelos ácidos (*Andisoles*) con horizontes muy lavados y de colores oscuros, grisáceos a pardos, donde se pueden observar procesos de migración de sustancias

Cuadro 2. Relación clima- vegetación y evolución del suelo en condiciones de baja temperatura y alta precipitación

CLIMA	VEGETACIÓN	TIPO DE ALTERACIÓN	TIPO DE ARCILLA		SUELOS
Húmedo/frío	Resinosas ericáceas	y Alteración biológica (neoformación nula)	Montmorillonita	 	<i>Andisols</i>
Templado	Pradera Bosque frondoso	Alteración biológica Alteración climática (neoformación débil)	Ilita	 	<i>Molisol Afisols</i>
Continental Mediterráneo	Estepa Bosque seco	Alteración biológica (neoformación media) Bisialitización	Ilita + montmor Montmor + ilita	 	<i>Molisol Afisols Vertisols</i>
Tropical	Bosque tropical	Alteración biológica (neoformación fuerte) Monosialitización	Caolita +ilita		<i>Molisol Utisols</i>

				<p>STRUCTURE OF A KAOLINITE LAYER</p> <p>Legend: O (blue), OH (green), Al (red), Si (purple)</p> <p>Source: MODIFIED FROM CERAM (1982)</p>	
Ecuatorial húmedo	Bosque denso Umbrófilo	Alteración biológica (neoformación débil) Alitización	Gibbsita +caolita	<p>GRUPOS HIDROXILICO</p> <p>ESTRUCTURA DE LA GIBBSITA Al(OH)₃</p>	<i>Ustisols</i> <i>Oxisols</i>

5.6. ORGANISMOS

Los organismos que influyen en el desarrollo de los suelos abarcan desde bacterias microscópicas hasta mamíferos grandes, este factor actúa como una variable dependiente e independiente al mismo tiempo.

La acumulación de MOS, la descomposición biológica de la misma, el reciclaje de nutrientes y la estabilidad de la estructura son ejemplos de la actividad de los organismos presentes en el suelo, y por un lado la vegetación también actúa como un agente de protección del impacto de la gota de lluvia, reduce la velocidad de escurrimiento y la erosión, y hace más lenta la remoción de los minerales desde la superficie hacia las capas inferiores del subsuelo, y por otro lado los ácidos orgánicos producidos a partir de ciertos tipos de hojarasca de plantas contienen hierro y aluminio en solución que forman complejos que aceleran el movimiento descendente de estos metales y su acumulación en los suelos (Sanzano, 2019; Ramírez Arturo 2008)

En conclusión, podemos decir que cada organismo que vive sobre la superficie del suelo afecta el desarrollo del mismo en una u otra forma. Y la MO será distinta dependiendo el tipo de suelo (Sanzano, 2019); por ejemplo, en la figura 12 se observa el rol del tipo de vegetación

en la formación de dos suelos formados bajo pradera y bajo bosque en dos sitios cercanos entre sí, en el primer caso, la mayor parte de la MO adicionada proviene de un profundo sistema radicular de las gramíneas, por el contrario, en el bosque, la adición es superficial y consecuencia del aporte de la hojarasca. Otra diferencia es la gran cantidad de ácidos orgánicos generados por la vegetación de bosque que inhibe la acción de microorganismos responsable de la degradación de la MO.

5.7. TOPOGRAFÍA

La topografía es el aspecto de la superficie terrestre, también se conoce como relieve. Incluye cordilleras, planicies y posiciones en el paisaje de pequeñas áreas que pueden causar fuertes variaciones en los suelos que se encuentran dentro de la misma (Sanzano, 2019), las diferencias del nivel de terreno afectan la distribución, retención y drenaje del agua superficial y consecuentemente, regulan su acción en el intemperismo del suelo (Cepeda-Dovala, 1991). El relieve influye sobre el transporte por gravedad, y los relieves abruptos favorecen la erosión, originando suelos lépticos, poco profundos (figura 13). Además, también, condiciona aspectos como la insolación, el drenaje del suelo y determinados procesos geomorfológicos.

De acuerdo con la topografía de un terreno puede existir arrastre de partículas, las cuales se depositan en partes bajas e intervienen en la composición química del suelo originario (figura 13).



Figura 13. Zonación del desarrollo del suelo, según el relieve (Jordán-López, 2005)



5.8. TIEMPO

Se considera una variable independiente, ya que no está influenciado por ningún otro factor ambiental. Es difícil de evaluar con exactitud, aunque se ha intentado hacerlo; ya que el proceso de formación de un suelo es muy lento y requiere de miles hasta millones de años y resulta así, sumamente difícil hacer una categoría del tiempo que se requiere para cada etapa de desarrollo del suelo.

Si bien el tiempo no es influenciado por algún otro factor, pero algunos procesos que surgen tras este factor formador, tienen que ver con cambios periódicos de clima, la altitud y vegetación por mencionar algunos, los cuales inducen una complicación, que a menudo desvía rutas de la formación de suelos en una u otra dirección (figura 11). Las propiedades del suelo pueden variar en función del momento del día o el año, además de la existencia de cambios muy lentos que necesitan decenas o cientos de años para producirse.

La formación y la evolución del suelo bajo la influencia de los factores y procesos pedogenéticos conducen a la diferenciación de capas o estratos sucesivos de textura, de estructura, de color y de otras propiedades diferentes, llamadas horizontes (figura 14) estos horizontes se van relacionando genéticamente entre sí, y el conjunto de horizontes constituye lo que se llama el perfil del suelo (Fadda, 2017), cada una de las características de los horizontes se enlistan en el cuadro 1. Entonces podemos decir que el perfil es la exposición vertical de una porción superficial de la corteza terrestre que incluye todas las capas (horizontes) que han sido alteradas edáficamente durante el periodo de formación del suelo y también las capas más profundas que influyeron en la génesis (Buol *et al.*, 1991; FAO, 1998).

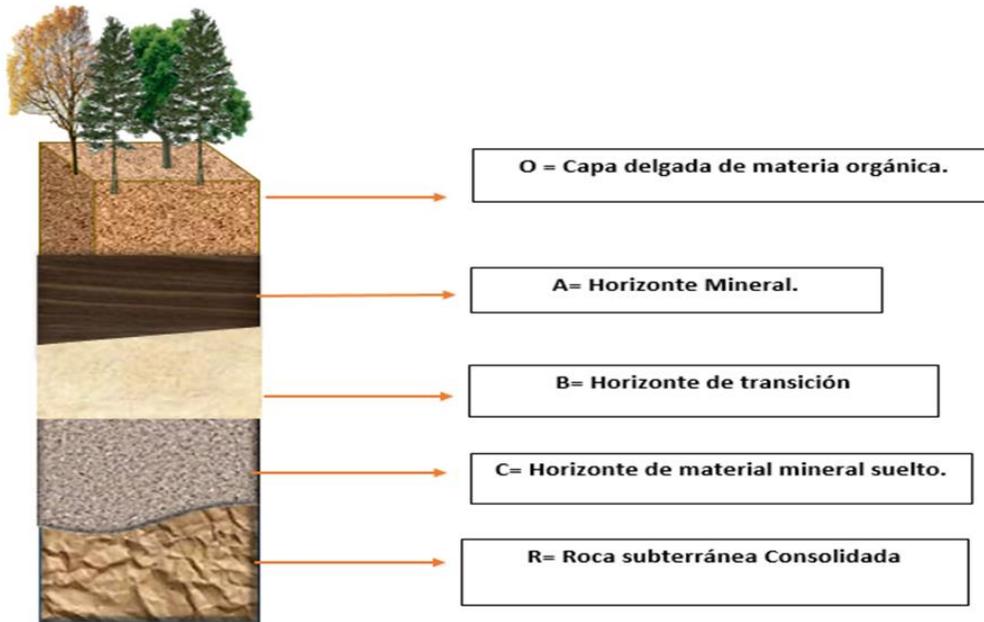


Figura 14. Perfil de suelo y sus Horizontes. Elaboración propia

5.9. CALIDAD DEL SUELO

Según Doran y Parkin (1994) la calidad del suelo es la capacidad para funcionar dentro de un ecosistema determinado para sostener la productividad biológica, mantener la calidad del ambiente, la vegetación y la fauna, Carter y otros autores (1997) determinan a la calidad del suelo como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo. El estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de MO, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular constituye la calidad del suelo (Romig *et al.*, 1995). Guerra-Hernández (2020) encontró para suelos ribereños de la región de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl que los indicadores edáficos de calidad fueron pH, CE, porcentaje de porosidad, MOS, N-total y P-Disponible.

El término calidad del suelo se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo entre las que se mencionan las siguientes: (1) promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); (2) atenuar contaminantes ambientales y efectos de patógenos (calidad ambiental); y (3) favorecer la salud de plantas, animales y humanos (Doran y Parkin, 1994; Seybold *et al.*, 1997). Al

desarrollar este concepto, también se ha considerado que el suelo es el substrato básico para las plantas; capta, retiene y emite agua; y es un filtro ambiental efectivo (Larson y Pierce, 1991; Buol, 1995). Siebe y Cram (2015). Mencionan que la salud del suelo es la base de un sistema alimenticio adecuado, porque en aquél se producen cultivos sanos que a su vez alimentan a la gente.

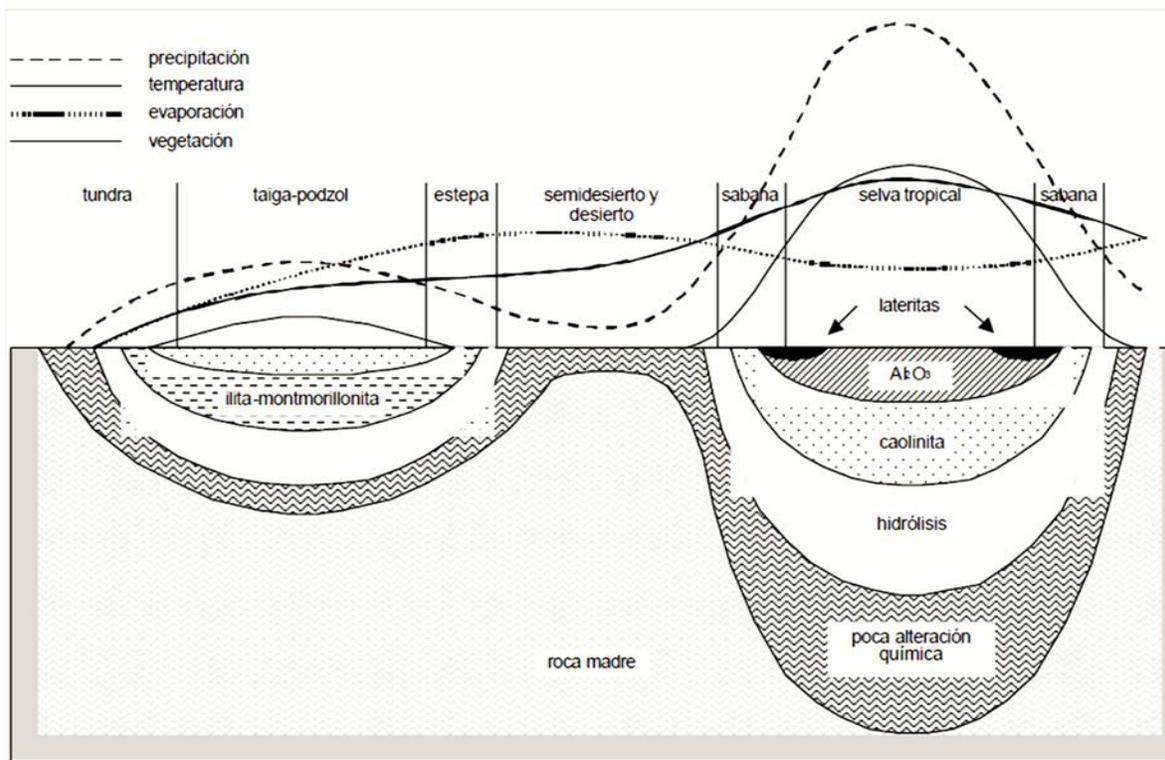


Figura 15. Relación entre el clima y los suelos a lo largo de un gradiente latitudinal (Tomado de Strakhov, 1968).

5.10. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Las propiedades físicas del suelo están relacionadas con la capacidad que tiene éste para ofrecer diferentes usos que sean de provecho para el ser humano. Para el buen uso, conservación, manejo y recuperación del recurso suelo, se requiere de conocer los fundamentos primordiales de las características físicas del suelo (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010). Las propiedades físicas se alteran con menor facilidad en relación a las



químicas, en cuanto al manejo forestal, pero se debe de considerar que estas nos van proporcionando información especial, y temporal con gran importancia para la evaluación de la calidad del suelo. Entre estas propiedades están la textura, densidad aparente y real, espacio poroso y color. A continuación, se describirá una de vital importancia en este estudio

5.11. DENSIDAD APARENTE Y REAL

Las partículas de un suelo varían en su composición y en su densidad, la densidad de la fase sólida del suelo está definida como la masa total de los sólidos dividida por el volumen total de ellos.

La densidad aparente, es el volumen del suelo tal como está incluyendo espacios de aire y materiales orgánicos en el volumen. Con esta propiedad se puede calcular la capacidad de almacenamiento de agua por volumen de suelo y conocer si las capas de suelo están muy compactadas a fin de permitir la penetración de la raíz o los problemas de aireación.

Este parámetro varía de acuerdo al estado de agregación, al contenido de agua y proporción de volumen ocupado por los espacios intersticiales. También indica el grado de deterioro del suelo pues su valor aumenta conforme existe una degradación de la estructura y una pérdida de MOS al existir compactación (Jaramillo, 2002).

Cuando las especies vegetales mueren masivamente los espacios que ocupan las raíces se liberan para que el agua circule y los ocupe, provocando que esta densidad cambie.

La densidad aparente para un bosque forestal va desde 0.2 g cm^{-3} en algunas capas orgánicas hasta casi 1.9 g cm^{-3} en las arenas gruesas y en suelos agrícolas es de 1.1 a 1.4 g cm^{-3} y para un buen desarrollo de plantas debe ser menor a 1.4 g cm^{-3} en arcillas y para las arenas de 1.6 g cm^{-3} . Según lo reportado por Fitzpatrick (1978) en los suelos de origen volcánico la densidad aparente tiene valores entre 0.85 y 0.9 g cm^{-3} .

Reportes de Rodríguez- Juárez (2018) mencionan que la densidad aparente del suelo entre un periodo de 1993 al 2016 en el PN-IP, varían entre 0.85 y 1.36 g cm^{-3} , teniendo en cuenta que los suelos del parque son de origen volcánico (figura 16); mencionando que en el 2012 hubo una tendencia de aumento con respecto a la profundidad y en el 2016 disminuyó respecto al horizonte mineral.

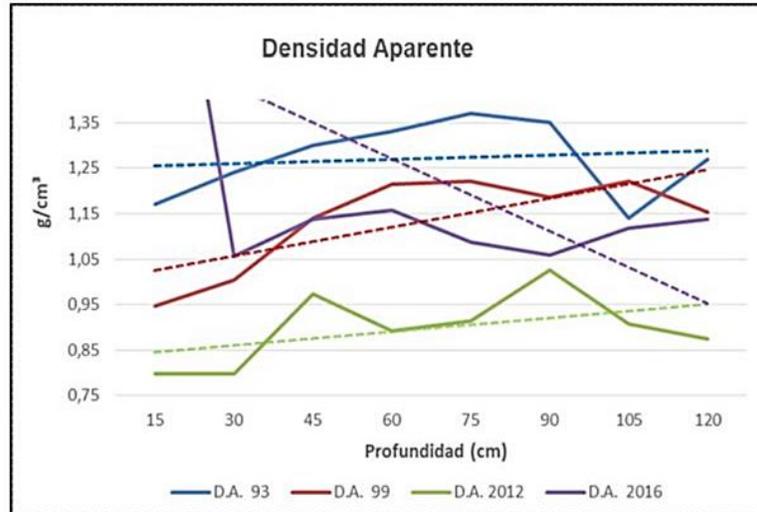


Figura 16. Densidad Aparente en el periodo de 1993-2016. La línea punteada muestra la tendencia de cada muestreo. Tomado de “Estudio comparativo de los índices de acidez en suelo forestal del PN-IP en el periodo de 1993-2016) por Rodríguez- Juárez, 2018

Lo anterior indica que uno de los efectos de la acidez en el suelo derivado de la meteorización de las partículas del suelo, principalmente en las arcillas es la liberación de espacios entre las diversas láminas que las constituyen, en las diferentes profundidades, provocando aumentos en el espacio poroso que disminuyen la densidad aparente (Chavarría, 2005).

La densidad real (DR) o de partículas es el peso de las partículas sólidas del suelo en relación con el volumen que ocupan, sin tener en cuenta la organización del suelo, el volumen del espacio ocupado y del contenido de algunos sólidos especiales en él, como la MOS y óxidos de hierro (Jaramillo 2002). El rango de esta densidad real varía entre 2.60 a 2.75 g cm⁻³ (Donahue *et al.*, 1981).

Respecto a estudios de Rodríguez- Juárez en el 2018, en el PN-IP, la densidad de partículas en el suelo original disminuyó de 2.7 a 1.5 g cm⁻³ a una profundidad de 75 cm respecto al año 1993, con una tendencia descendente respecto a la profundidad. Para el año 2012 al 2016 hubo un aumento en la tendencia, hacia los horizontes más profundos dando valores que oscilaban entre 2.5 a 2.7 g cm⁻³; el suceso anterior se da ya que al disminuir la MOS se dará este efecto, el porcentaje de espacio poroso, se ve influenciado con el decremento de la densidad de partículas porque esta propiedad está estrechamente relacionada con el drenaje, aireación, retención de humedad y la compactación del suelo; y al aumentar esta densidad se ve desfavorecido el desarrollo radicular vegetal (Acevedo *et al.*, 2010).

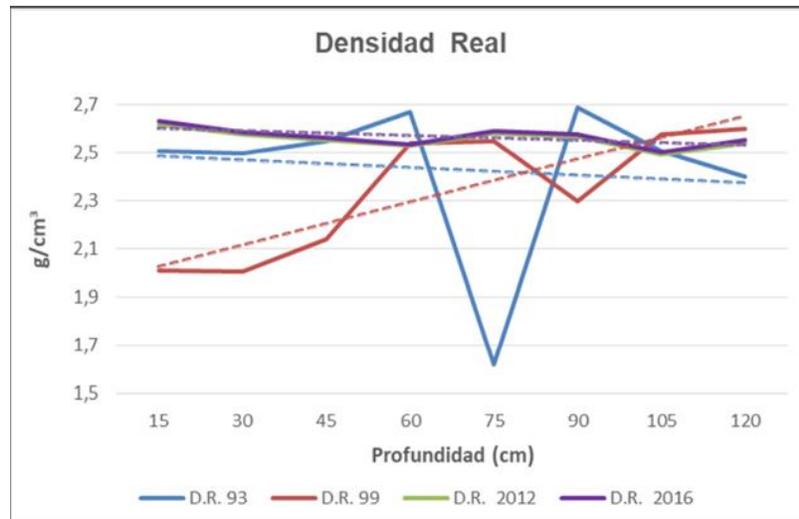


Figura 17. Densidad real o de partículas en el periodo de 1993-2016. La línea punteada muestra la tendencia de cada muestreo. Tomado de “Estudio comparativo de los índices de acidez en suelo forestal del PN- IP en el periodo de 1993-2016) por Rodríguez- Juárez (2018).

Cuadro 3. Relación de la densidad aparente del agua con la temperatura

Temperatura (°C)	Densidad del agua (g cm ³)
10	0.99970
12	0.99950
14	0.99924
16	0.99894
18	0.99860
20	0.99820
22	0.99770
24	0.99730
26	0.99678
28	0.99623
30	0.99565
32	0.99503
34	0.99437
36	0.99369

Cuadro 4. Interpretación de resultados de densidad aparente.

Tipos de suelos	g/cm ³
Orgánicos y volcánicos	Menor de 1.00
Minerales	
Arcillosos	1.0 1.19
Francosos	1.20 1.32
Arenosos	Mayor a 1.32

Cuadro 5. Relación de la densidad real del agua con la temperatura

Temperatura (°C)	Densidad del agua (g cm ³)
10	0.99970
12	0.99950
14	0.99924
16	0.99894
18	0.99860
20	0.99820
22	0.99770
24	0.99730
26	0.99678
28	0.99623
30	0.99565
32	0.99503
34	0.99437
36	0.99369

Cuadro 6. Interpretación de resultados de densidad real

Tipos de suelos	g/cm ³
Orgánicos y volcánicos	Menor de 1.00
Minerales	
Arcillosos	1.0 1.19
Francosos	1.20 1.32
Arenosos	Mayor a 1.32

5.12. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

Estas propiedades son importantes ya que sirven para mejorar la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, evitar toxicidad de elementos, utilizar la población y para mejorar la condición física del suelo. Estas pueden ser la Conductividad Eléctrica (CE), Potencial de hidrogeno (pH), MOS. A continuación, se describen algunas de estas propiedades de interés.

5.13. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

La conductividad es la concentración de sales solubles presentes en una solución de sustrato y esta concentración se mide mediante la conductividad que se presenta por lo tanto se define

a la CE como la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, el valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente a través del mismo. Esto significa que, a mayor CE, mayor es la concentración de sales.

Dentro de esta propiedad se pueden definir varios conceptos principales:

- Salinidad. Concentración de sales en el perfil del suelo que puede afectar el crecimiento y desarrollo de los cultivos.
- Suelo salino. Suelo que contiene suficientes sales solubles como para reducir el crecimiento de las plantas, con conductividad eléctrica (CE) en la pasta de saturación igual o mayor a 4 dS m^{-1} .
- Suelo salino sódico. Suelo que contiene suficiente sodio intercambiable para interferir con el crecimiento de la mayoría de los cultivos y que contiene cantidades apreciables de sales solubles. El porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 15, la conductividad del extracto de saturación mayor de 4 dS m^{-1} .
- Suelo sódico. Suelo en el cual el porcentaje de sodio intercambiable es de 15 o más, o el que contiene el sodio suficiente como para afectar adversamente las propiedades físicas y la permeabilidad.
- Porcentaje de saturación de bases. Proporción de la superficie absorbente de un suelo que es saturada con cationes intercambiables diferentes al hidrógeno y al aluminio. Se expresa como un porcentaje de la capacidad total de intercambio catiónico.
- Porcentaje de sodio intercambiable. Porcentaje de sodio absorbido sobre la superficie de las arcillas en proporción a la concentración de los cationes intercambiables.
-

Cuadro 7. Interpretación de conductividad eléctrica

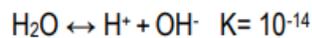
CE dS m^{-1} a 25°C	Efectos
< 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 - 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 - 4.0	Moderadamente salino
4.1 - 8.0	Suelo salino
8.1 - 16.0	Fuertemente salino
> 16.0	Muy fuertemente salino

5.14. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

El pH es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas. Por definición se considera que el pH es el logaritmo negativo de la actividad de los protones (H^+) en una solución acuosa.

$$pH = -\log(H^+)$$

En los suelos el pH es una propiedad química de mucha importancia porque indica que tan ácida o alcalina es la solución del suelo, que es de donde las raíces y los microorganismos del suelo toman sus nutrientes. El pH usa una escala de medición cuyo rango de fluctuación es de 0 a 14. Se basa en el principio de que la constante de equilibrio de la disociación del agua es 10^{-14} (Osorio, 2012)



$$K = 10^{-14} = (H^+) (OH^-) \div (H_2O)$$

El valor de pH del suelo proporciona información acerca de los efectos perjudiciales de la acidez, aunque no permite diagnosticar las causas. La superficie de los coloides del suelo puede estar cargada negativamente debido a los átomos de oxígeno y los grupos hidroxilos no compartidos, así como a las sustituciones isomórficas en los grupos tetraédricos u octaédricos de los cristales de arcilla (Jordán-López, 2006).

Se puede obtener el cálculo de la acidez potencial haciendo la medición de pH por medio de una solución salina en vez de agua; la lectura de pH que se genera es comúnmente menor cuando se hace en una solución acuosa que en una solución salina y disminuye a medida que la concentración de sal aumenta, debido al mayor desplazamiento de los iones de hidrógeno y de aluminio a partir del complejo del intercambio. La mayor parte de suelos forestales están en una escala de pH entre 3.5 a 6.5 aproximadamente (Astudillo- Bravo, 2006).

Dentro de esta propiedad se pueden definir varios conceptos principales:

- Acidez. Medida de la actividad de los iones hidrógeno y aluminio en un suelo húmedo, se expresa como valores reducidos de pH.

- Porcentaje de saturación de bases. Proporción de la superficie absorbente de un suelo que es saturada con cationes intercambiables diferentes al hidrógeno y al aluminio.
- Se expresa como un porcentaje de la capacidad total de intercambio catiónico.
- Porcentaje de sodio intercambiable. Porcentaje de sodio absorbido sobre la superficie de las arcillas en proporción a la concentración de los cationes intercambiables
- Suelo ácido. Específicamente un suelo con pH menor a 7.0 originado por la presencia de iones activos de hidrógeno y/o aluminio. El valor del pH disminuye a medida que aumenta la actividad de esos dos iones.
- Suelo calcáreo. Suelo que contiene suficiente carbonato de calcio como para que haga efervescencia cuando se trata con ácido clorhídrico al 10% o que contiene más de 2% de carbonato de calcio.

Cuadro 8. Categoría de pH en el suelo.

Clases	Intervalo	Clases	Intervalo
Extremadamente ácido	3.5 – 4.4		
Muy fuertemente ácido	4.5 – 5.0	Fuertemente ácido	<5.0
Fuertemente ácido	5.1 – 5.5		
Moderadamente ácido	5.6 – 6.0	Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Ligeramente ácido	6.1 – 6.5		
Neutro	6.6 – 7.3	Neutro	6.6 – 7.3
Ligueramente alcalino	7.4 – 7.8		
Moderadamente alcalino	7.9 – 8.4	Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	8.5 – 9.0	Fuertemente alcalino	>8.5

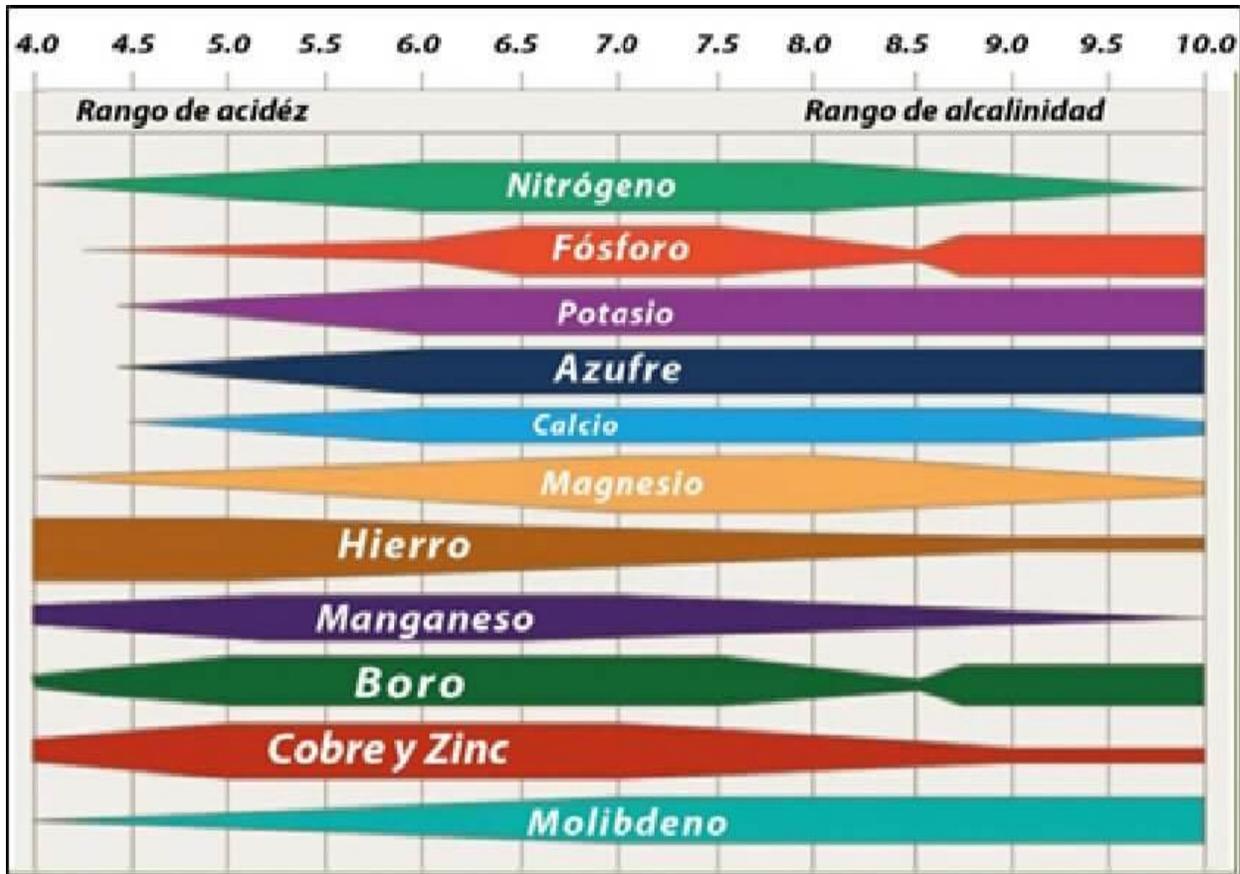


Figura 18. Disponibilidad de nutrientes respecto al pH del suelo. Extraído de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/manejo-y-correccion-de-acidez-de-suelo> - Esta información es propiedad intelectual de INTAGRI S.C., Intagri se reserva el derecho de su publicación y reproducción total o parcial.

5.15. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (MOS)

Se define como la acumulación de materia de plantas muertas, parcialmente descompuestas; además de residuos de animales, etc., resintetizados parcialmente. La hojarasca y las raíces secas se descomponen rápidamente y sus residuos forman parte del humus; algunas porciones permanecen en los suelos durante mucho tiempo. La MOS almacena varios elementos esenciales, estimula la estructura adecuada del suelo, es una fuente con capacidad de intercambio de cationes (CIC) y regula los cambios de pH, propicia también las reacciones convenientes entre el aire y el agua en los suelos y es un enorme depósito geoquímico de carbono (Bohn, 1991).

La MOS constituye un sistema complejo y heterogéneo, con una dinámica propia e integrada por diversos grupos de sustancias. Normalmente representa del 1 al 6 % en peso, aunque esta proporción puede ser muy variable dependiendo del momento del año, tanto en suelos agrícolas (por causa de la fenología del cultivo o la época de cosecha) como naturales (dependiendo en este caso de la presencia de especies caducifolias o perennes, por ejemplo) (Jordán-López, 2006).

Cuadro 9. Interpretación de Resultados de Materia Orgánica. Los valores de referencia para clasificar la concentración de la materia orgánica en los suelos minerales y volcánicos se presentan en el cuadro siguiente.

Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy Alto	> 16.1	> 6.0

5.16. ELEMENTOS ESENCIALES

Arnon y Stout (1939) acuñaron el término Elemento Mineral Esencial, ellos mencionan, que para que un elemento pueda ser considerado esencial es necesario que cumplan los siguientes criterios:

- Una planta será incapaz de completar su ciclo de vida en ausencia del elemento mineral,
- La función del elemento no debe ser remplazada por otro elemento mineral,
- El elemento debe de ser necesario en el metabolismo de la planta, por ejemplo, como componente de un constituyente esencial de la planta (enzima) o puede ser requerido para un proceso metabólico distinto (reacción enzimática).

Se sabe que hoy existen diecisiete elementos químicos que son esenciales para el desarrollo de las plantas. En el Cuadro 10 se indica estos diecisiete elementos dispuestos de modo que se conozca su origen y sus cantidades relativas utilizadas por las plantas.

Los elementos esenciales pueden ser clasificados en dos grandes grupos macronutrientes que son requeridos en cantidades relativamente grandes (N, P, K, Ca, Mg, y S) y micronutrientes los cuales son requeridos en pequeñas concentraciones (Fe, Mn, Cu, B, Zn, Mo, Cl), (Resh, 1992; Azcón-Bieto y Talon, 2013).

Clasificación de los Elementos Esenciales.

- Macronutrientes Primarios: N, P y S
- Macronutrientes Secundarios: K, Ca, y Mg
- Micronutrientes: Fe, Mn, Cu, Zn, Cl, B, Fe, Mn, Mo y Na

Cuadro 10. Elementos esenciales, símbolo, formas de absorción y composición aproximada en las plantas.

Elemento	SIM.	Forma de absorción	% En la planta
Carbono	<i>C</i>	CO ₂	40-50
Oxígeno	<i>O</i>	O ₂ y H ₂ O	42-44
Hidrogeno	<i>H</i>	H ₂ y H ₂ O	6-7
Nitrógeno	<i>N</i>	NO ₃ ⁻ y NH ₄ ⁺	1-3
Fósforo	<i>P</i>	H ₂ PO ₄ ⁻ y HPO ₄ ²⁻	0.05-1
Azufre	<i>S</i>	SO ₄ ²⁻	0.1-0.5
Potasio	<i>K</i>	K ⁺	0.3-3
Calcio	<i>Ca</i>	Ca ²⁺	0.5-3.5
Magnesio	<i>Mg</i>	Mg ²⁺	0.03-0.8
Hierro	<i>Fe</i>	Fe ²⁺	100-1000 ppm
Manganeso	<i>Mn</i>	Mn ²⁺	50-300 ppm
Cobre	<i>Cu</i>	Cu ²⁺	10-40 ppm
Zinc	<i>Zn</i>	Zn ²⁺	10-20 ppm
Boro	<i>B</i>	H ₂ BO ₃ ⁻	50-300 ppm
Molibdeno	<i>Mo</i>	MoO ₄ ²⁻	10-40 ppm
Cloro	<i>Cl</i>	Cl ⁻	
Sodio	<i>Na</i>	Na ⁺	

Estos son los elementos fundamentales para la fertilización. Se les da el nombre de elementos primarios.

De igual manera son elementos fundamentales para la fertilización, estos faltan algunas veces y se les da el nombre de elementos secundarios.

Son elementos menores o micronutrientes, solo se tienen en cuenta para determinadas cosechas y suelos



5.17. ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DEL SUELO

Las enzimas son un tipo especial de proteínas que se van combinando con un sustrato específico y actúan para catalizar reacciones bioquímicas, sin experimentar cambios en su estructura; son esenciales para la transformación de energía y el ciclaje de nutrientes (Henríquez *et al.*, 2014). Debido a su naturaleza proteica pueden ser afectadas por factores ambientales como son la temperatura, altitud, pH entre otras (Paul y Clark, 2007).

Las enzimas intervienen en la mayoría de los procesos que tienen lugar en el suelo y las funciones que realizan son de gran importancia, ya que podemos decir que son responsables de la formación de moléculas orgánicas y particularmente tienen una participación vital en el ciclo nitrógeno, fósforo y carbono.

Cumplen un papel vital en procesos tales como la mineralización, inmovilización de nutrientes y fijación biológica de nitrógeno, entre otros (Caldwell, 2005; Carpa, 2009).

Los microorganismos del suelo y la rizósfera liberan enzimas al suelo a través secreciones y lisis celular. Un bajo porcentaje de estas proteínas quedan inmovilizadas y estabilizadas con diferentes componentes en la fase sólida del suelo, como las arcillas moléculas orgánicas y complejos orgánicos (Noinville *et al.*, 2004).

La velocidad de reacción enzimática en los suelos, al igual que muchos sistemas vivos, depende de varias propiedades del suelo como pH, fuerza iónica, temperatura, presencia o ausencia de inhibidores (Burns, 1982).

Las enzimas se pueden clasificar en general como oxidoreductasas como por ejemplo la catalasa, glucosa oxidasa, deshidrogenasa y peroxidasa, las transferasas como la transaminasa y las hidrolasas como la celulasa, lipasa, β -glucosidasa, fosfatasa y ureasa (Paul y Clark, 2007). Entre estas las enzimas Deshidrogenasa, β -glucosidasa, fosfatasa y ureasa se han utilizado como indicadores para evaluar el efecto del manejo agronómico sobre características de calidad o estado de sanidad del suelo (Gajda y Mortyniuk, 2005; Baležtienė y Klimas, 2009); estas enzimas son responsables de la liberación de muchos elementos esenciales para las plantas, como C, N y P.

Dependiendo del material, la interacción se da por mecanismos que incluyen microencapsulación, enlaces transversales, adsorción, intercambio iónico, y enlaces covalentes (Dick y Tabatabai, 1992, Martínez-Mialma, 2012).

Debido a su relación con procesos de gran importancia en el suelo, la determinación de la actividad enzimática ha sido estudiada como un biomarcador, esto es un indicador de diferentes condiciones de calidad de suelo (Baležentienė, 2012; Ferreras *et al.*, 2009; Trasar *et al.*, 2003). Al respecto Hu *et al.*, (2006) señalan que la actividad enzimática puede responder a cambios en el manejo de un bosque más rápidamente que otras variables de suelo por lo que pueden ser útiles como indicadores tempranos de cambios biológicos.

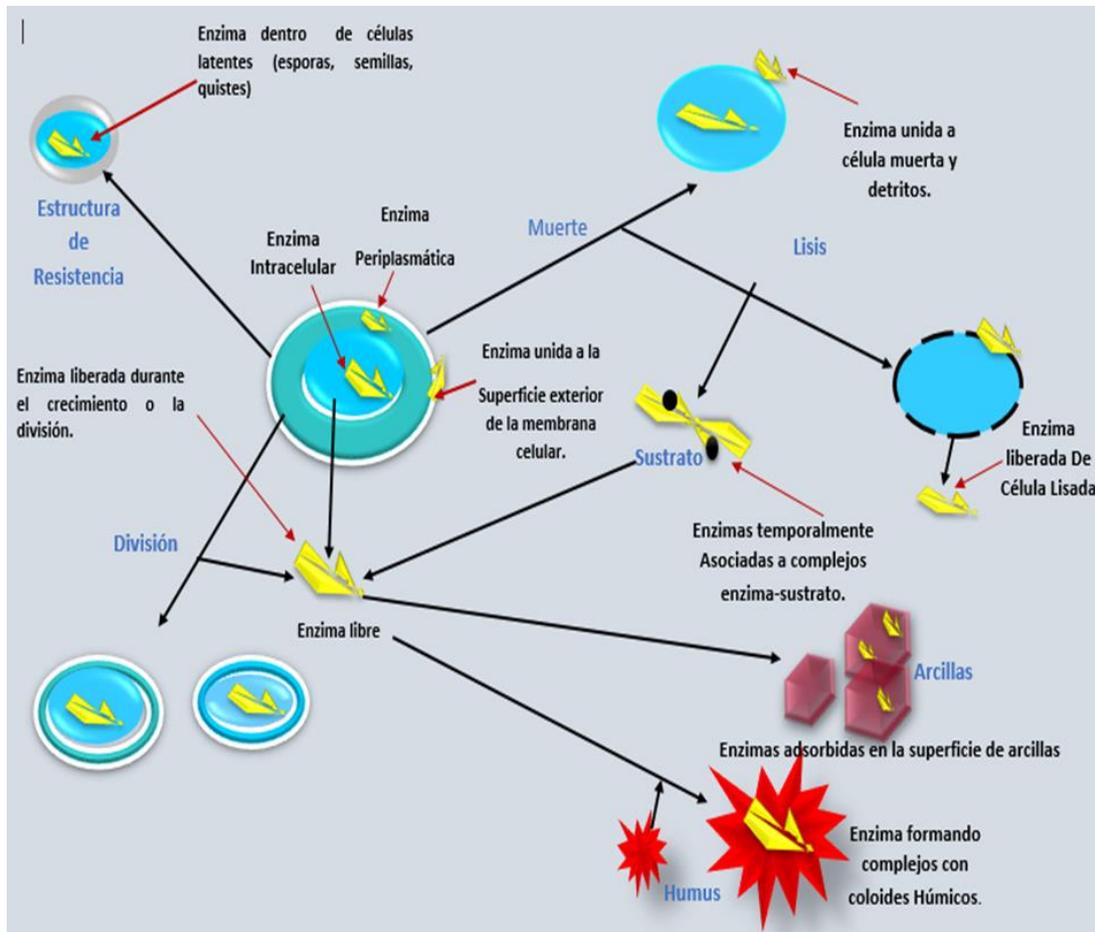


Figura 19. Fuentes y estado de las enzimas del suelo (basado en Ochoa *et al.*, 2007).



5.18. LA IMPORTANCIA DEL FÓSFORO EN EL SUELO

El Fósforo es uno de los elementos químicos esenciales para la vida; debido a esto su disponibilidad y su papel es de vital importancia para el crecimiento de plantas, además de ser un factor limitante en los ecosistemas forestales (Críquet *et al.*, 2004). El Fósforo es parte de moléculas de importancia como el Adenosín Difosfato (ADP) y Adenosín Trifosfato (ATP), compuestos que presentan energía para las plantas, igual es parte del ácido desoxirribonucleico (ADN) y el ácido ribonucleico (ARN), el primero para la herencia genética de las plantas y animales, y el segundo para la síntesis de proteínas; como es de imaginar el Fósforo es esencial para numerosos procesos metabólicos, como:

- La transferencia de energía; aquí los iones fosfóricos son capaces de recibir energía luminosa captada por la clorofila y transportarla a través de las plantas en ADP y ATP.
- Como factor de crecimiento; ya que influye fuertemente en el desarrollo de las raíces de las plantas.
- Como factor de precocidad; activa el desarrollo inicial y tiende a cortar el ciclo vegetativo, favoreciendo la maduración de los frutos, mejorando su calidad.
- Como factor de resistencia; este elemento aumenta la resistencia a las condiciones meteorológica adversas, en general a las enfermedades, función que comparte con la potasa.
- Como factor de nodulación; este se favorece por la actividad de las bacterias nitrificadoras, especialmente cuando no existe un exceso de calcio en el terreno (MIRAT, 2006).

En los suelos el fósforo se va originando a partir del intemperismo de minerales petrogénicos como las apatitas (figura 21); por otro lado, las lluvias, residuos de plantas, fertilizantes comerciales, abonos de origen animal, desechos industriales, domésticos y agrícolas son vías de introducción adicional de fósforo a los ecosistemas. En medida que el fósforo es solubilizado como consecuencia de los procesos de intemperismo químico y físico, se asimila por las plantas, animales y permanece en formas estables dentro de los ecosistemas (Páez *et al.*, 2007)



Este nutriente se encuentra en el suelo en una gran variedad de formas, tanto orgánicas como inorgánicas, pero existe una particularidad, mayormente se encuentra en formas insolubles o muy poco solubles (fósforo orgánico con un 80% en el suelo).

También podemos decir que su forma iónica en el suelo, está determinado por el pH de la solución en el cual el ion es encontrado; cuando el suelo tiene un pH neutro o ligeramente alcalino, el ion HPO_4^{2-} (fosfato monoácido) es la forma más común; y cuando el pH se encuentra ligeramente ácido, tanto el ion HPO_4^{2-} y el ion H_2PO_4^- (fosfato diácido), se encontrara en la solución del suelo; entonces a mayor acidez del suelo el ion H_2PO_4^- aumentara.

Las concentraciones fosfatos en la solución del suelo esta usualmente en el intervalo de 0.1 a $10 \mu\text{mol l}^{-1}$, aunque el P de suelo puede ser inmovilizado por absorción o llevar a formas poco solubles o también por precipitación química (Frossaard *et al.*, 2000). Tal inmovilización involucra la transformación de los fosfatos solubles a fosfatos de hierro, aluminio, calcio y magnesio ($\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$, $\text{Mg}_2(\text{HPO}_4)_3$, entre otros) que son poco solubles.

5.19. LA IMPORTANCIA DEL FÓSFORO EN EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS

Se puede encontrar el P en todos los tejidos de las plantas, en una proporción entre 0.5 a 1 % de la materia seca; este elemento participa ampliamente en la construcción de compuestos encargados del transporte y almacenamiento energía para la realización de varios procesos vitales para las plantas.

Las plantas absorben la mayor parte del P en fosfatos, a mayor cantidad en forma de H_2PO_4^- y en menor cantidad en forma de HPO_4^{2-} . Ya que el P se ve involucrado en los procesos de crecimiento y síntesis de los componentes de las plantas, su deficiencia ocasiona un desarrollo débil tanto del sistema radical como de la parte aérea; a consecuencia se puede notar que las hojas son de menor tamaño, a diferencia del estado normal, y con las nervaduras pronunciadas con coloración anormal; la madurez de los frutos se retrasa (Fuentes, 1999)



Si fuera poco en respuesta a deficiencia de fósforo, algunas plantas como los miembros de la Proteácea y algunas especies anuales como *Lupinus albus* forman sustancias proteínicas radicales, los cuales acidifican la rizósfera. Esta acidificación es producida por la excreción de ácido cítrico con la movilización de fosfato escasamente soluble por quelatación (Fe, Al) o formación de citratos de calcio poco solubles en la rizósfera (Cruz-Flores, 2006)

En muchas condiciones climáticas y edáficas el fósforo también puede ser limitante del crecimiento y desarrollo de las plantas. Bajo estas características las micorrizas vesículo-arbusculares, juegan papel determinante para la adquisición de este nutrimento esencial.

5.20. EL FÓSFORO EN SUELOS FORESTALES

En suelos forestales el fósforo es proporcionado principalmente por la MO del suelo, ya que la fuente principal del fósforo para los árboles, y algunos fosfatos orgánicos solubles (fosfatos de ácidos nucleicos y fitina) pueden ser absorbidos por plantas.

Por otro lado, podemos ver que las raíces de los árboles tienen micorrizas que aumentan la capacidad de los árboles para absorber las formas menos disponibles de fosfatos en el suelo. Se han encontrado registros de que existe menor cantidad de P en suelos donde habitan coníferas a diferencia de aquellos que sostienen árboles de maderas duras (cedros, robles y encinos), esto probablemente a la capacidad de las coníferas para sobrevivir y competir sobre suelos que contienen un nivel relativamente bajo de fósforo (Pritchett, 1991).

5.21. ACTIVIDAD DE LAS ENZIMAS FOSFATASAS

Las plantas que se desarrollan en suelos ácidos utilizan una gran variedad de mecanismos para contrarrestar los factores adversos que se pueden generar, dentro de estos mecanismos se encuentran la actividad fosfatásica, llevada a cabo por un grupo de enzimas hidrolasas llamadas fosfatasas.

Las fosfatasas juegan un papel crucial en el ciclo del P produciendo su mineralización de P orgánico (ésteres y anhídridos del ácido fosfórico) a P inorgánico (ion PO_4^{3-}) asimilable por las plantas. Las fosfatasas se clasificaron de acuerdo al pH óptimo para su actividad en fosfatasas ácidas y fosfatasas alcalinas. La presencia de un tipo de fosfatasa u otra está



determinada por el pH, de tal forma que las fosfatasa ácidas se encuentran principalmente en suelos ácidos, mientras que las alcalinas predominan en suelos con pH básico (Fernández *et al.*, 2008).

Su actividad se relaciona de forma inversa a la presencia de P libre y reacciona ante perturbaciones exógenas como la deficiencia de P en el suelo. Ante esa perturbación, las plantas y los microorganismos incrementan la secreción de fosfatasa para incrementar la movilidad del P transformándolo en el ion PO_4^{3-} asimilable (Alkorta *et al.*, 2003).

La mineralización del P orgánico en el suelo está mediada por las enzimas fosfatasa, aproximadamente el 90 % del P presente en el suelo se encuentra en forma orgánica, sin embargo, existen microorganismos capaces de transformarlo en P disponible para las plantas mediante la secreción de fosfatasa (Galvis *et al.*, 2007; Santruckova *et al.*, 2004).

Las fosfatasa del suelo, pueden originarse, como respuesta adaptativa al estrés por deficiencia de P, por raíces de plantas superiores, microorganismos del suelo de vida libre como *Aspergillus sp* y por bacterias como *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas sp* que se han reconocido por su efecto positivo por la producción de sustancias de crecimiento que estimulan el metabolismo de las plantas, que funcionan en forma antagónica ante organismos parásitos además de producir hormonas del tipo de las giberelinas (Pierre, 2004) y hongos ectomicorrízicos como *Pisolithus tinctorius* que contribuyen a la mineralización del P (Naseby *et al.*, 1998).

Las asociaciones de dos microorganismos resultan muy estimulantes para la absorción de P para las plantas. Su actividad es mayor sobre la superficie de la raíz que en el volumen del suelo, estas enzimas permanecen en el suelo ya sea asociadas con células no vivas o restos de estas, o bien, inmovilizadas en la matriz del suelo, conservando su capacidad hidrolítica. Las disponibilidades de P están asociadas a las actividades de las fosfatasa; estas rompen éster-fosfatos de compuestos orgánicos que permiten la formación de moléculas de carácter inorgánico asimilables por las plantas (Astudillo-Bravo, 2006).

La actividad de las fosfatasa se ha utilizado como índice de la disponibilidad de fósforo, y se ha correlacionado positivamente con los estados de óxido-reducción. La ecuación general de la reacción catalizada por las fosfatasa ácida y alcalina es:

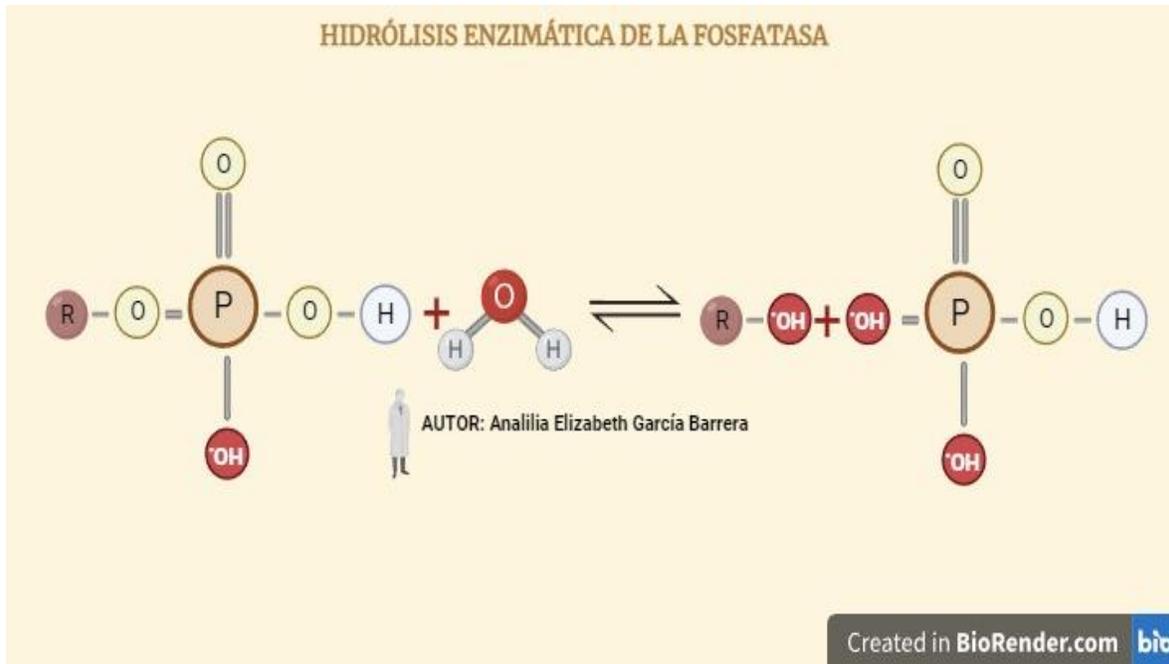


Figura 20. Reacción química de la hidrólisis enzimática de la Fosfatasa. Creado con BioRender.com

Respecto a la matriz del suelo, el nivel más alto de actividad de fosfatasas se encuentra en la rizósfera y en la proximidad del sistema suelo-planta, se distribuye y localiza en niveles altos en zonas cercanas a la raíz. También se acumula principalmente en la capa superior del suelo, ya que es la zona de máxima actividad biológica y química (Astudillo-Bravo, 2006).

La actividad enzimática es una importante propiedad bioquímica para la evaluación de la fertilidad del suelo ya que las enzimas del suelo participan en los ciclos biogeoquímicos y en la disponibilidad de nutrientes para las cosechas.

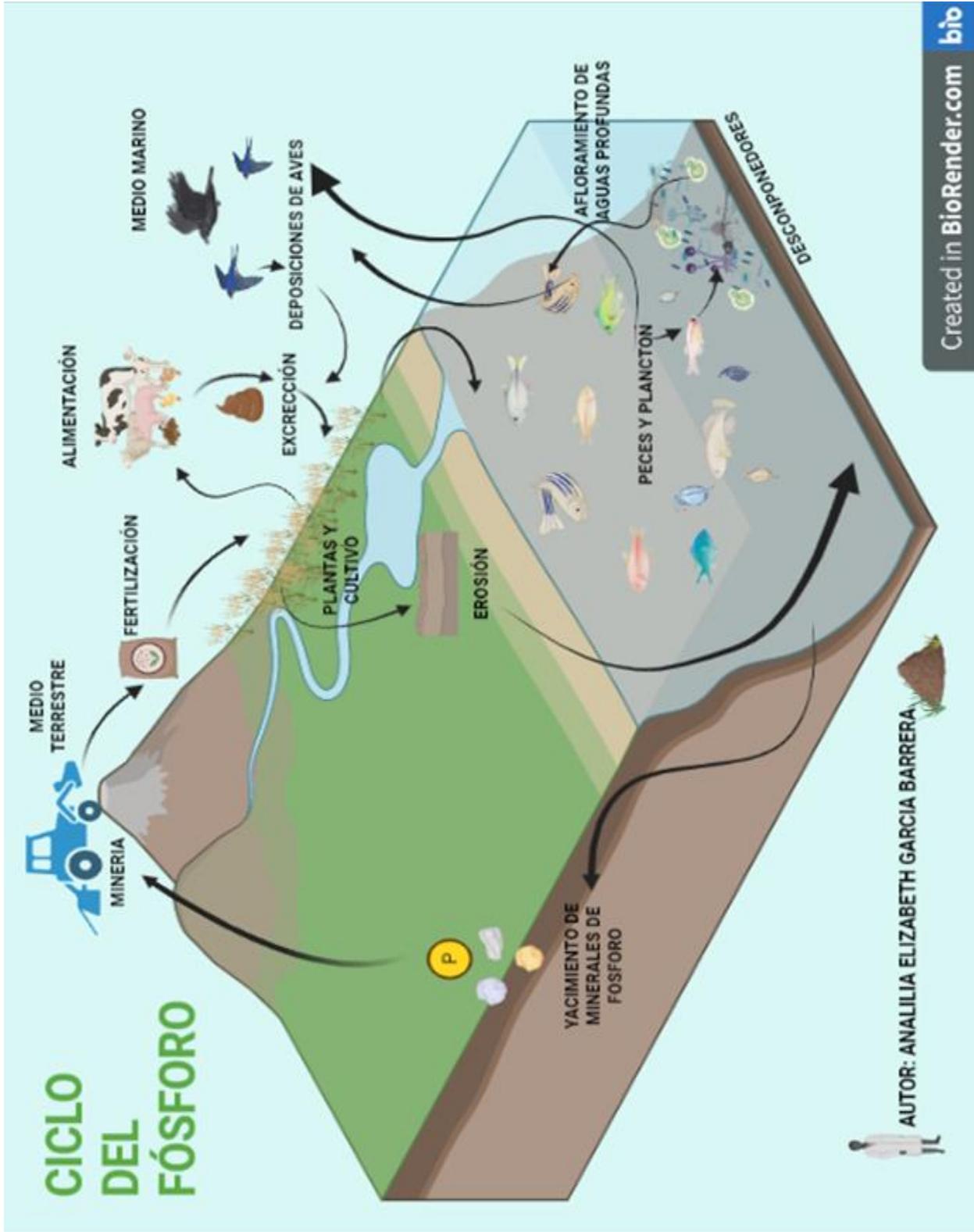


Figura 21. Ciclo del fósforo (Tomado de Harrison) Creado con BioRender.com



6. ANTECEDENTES

Los bosques templados son de gran importancia ya que cumplen funciones como recarga de mantos freáticos, intercambio de gases, etc. Además, los procesos de degradación de estos ambientes se han intensificado mundialmente en las últimas siete décadas como producto de nuestras actividades, y se debe de pensar en soluciones de protección y conocer a utilidad de estos medios naturales. Las causas de esta degradación son múltiples y se pueden dividirse en factores directos (deforestación, sobreexplotación de organismos, cambio climático, especies invasoras, contaminación, entre otros) e indirectos (demografía, patrones y niveles de consumo, gobernabilidad, tecnología).

Si hablamos del PN-IP el primer antecedente de protección ecológica para este se da en 1933 al declararse como zona protectora forestal a los terrenos situados en las vertientes y planicies que forman parte de la Gran Cuenca de México.

Con posterioridad, el 8 de noviembre de 1935 el presidente Lázaro Cárdenas declara como primer PN de su administración (tercero en el país), a la Iztaccíhuatl y al Popocatepetl, esto con la finalidad de proteger las cuencas hidrográficas altas de los valles de México, Puebla, Tlaxcala y Morelos además de promover la conservación de los suelos, vegetación forestal, flora y fauna. El decreto estableció como límite inferior del parque la curva de nivel de los 3,000 m s.n.m sin especificar superficie.

En el año 2001, Grupo Modelo, en forma conjunta con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Pronatura México, A. C., inició con el desarrollo del Programa "Restauración, protección y conservación de los Recursos Naturales del PN-IP", los primeros trabajos de restauración ecológica y educación ambiental en el PN-IP. Para tal fin, en ese año, las tres instituciones suscribieron un convenio de colaboración para la realización del programa.

Se han hecho pocos trabajos de investigación para México donde indiquen la calidad de suelo de los bosques, trabajos recientes sobre el tema y realizados en el PN-IP son los siguientes:



- Granados - Damián, Ma. Del R. (2003). “Calidad del Suelo y estado nutrimental del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl, Tesis de Licenciatura. UNAM.
- García. (2003). “Indicadores de calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schlt, et Cham, en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl.
- Valderrábano (2006). “Calidad del suelo y estado nutrimental de la vegetación forestal del Parque Nacional Zoquiapan”.
- Astudillo – Bravo (2006). “Fosfatasa ácida y alcalina del suelo y su efecto en la disponibilidad del P en suelos de bosques templados de México”. Tesis de licenciatura, UNAM.
- Cruz F. G., Guerra H. E. A. y Ángeles C. E. R (2009). “Descripción de propiedades físicas y químicas de agua y suelo en ambientes riparios en la exposición occidental del PN-IP. UMIEZ L-8. Boletín CAMAFU.
- Martínez-Mialma (2012). “Actividad Enzimática de Suelos Ribereños y su Fertilidad en Bosques del Parque Nacional Izta-Popo”. Tesis de Licenciatura. UNAM.

Algunos de estos trabajos mencionan que las partes más afectadas son las que se encuentran a menores altitudes, observaron que la mayor actividad enzimática (fosfatasa) fue debido a una baja concentración de nutrimentos, por lo cual las enzimas se encargan de equilibrar el ciclo de nutrimentos.



MATERIALES Y MÉTODO

Ilustración de Andrés Agustín García Barrera



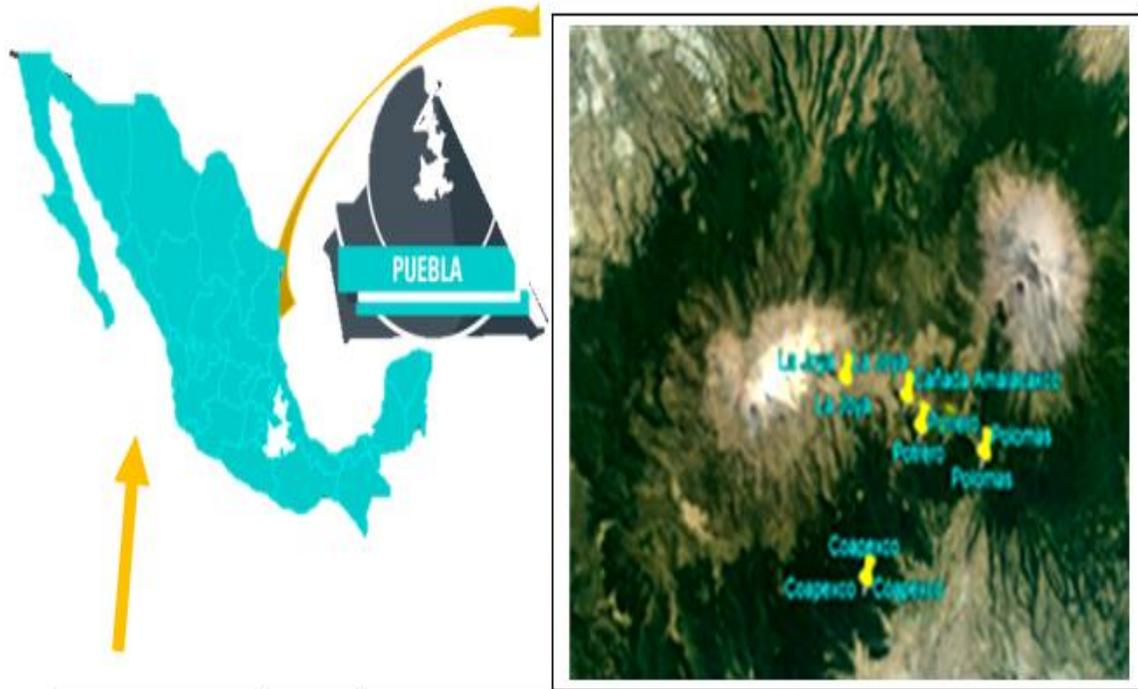
7. MATERIALES Y METODO

7.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIOS

La investigación se llevó a cabo en una zona de influencia del PN-IP. El parque cuenta con una superficie de 25 mil 679 hectáreas (Vargas, 1997); geográficamente se localiza entre las siguientes coordenadas extremas $98^{\circ} 34' 55.88''$ y $98^{\circ} 46' 40.95''$ de Longitud Oeste y $18^{\circ} 59' 00.43''$ y $19^{\circ} 28' 09.44''$ de Latitud Norte; y entre los límites de los estados, primero de Norte a Oeste, México (municipios de Texcoco, Ixtapaluca, Chalco, Tlamanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatingo), al Este con Puebla (municipios de Santa Rita Tlahuapan, Domingo Arenas, San Salvador el Verde, Huejotzingo, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco) y al Sur con Morelos (municipio de Tetela del Volcán).

Además forma parte en el centro-oriental, de la provincia fisiográfica conocida como Sistema o Eje Volcánico Transmexicano y una parte sustancial de la Sierra Nevada, originado durante el Terciario por actividad volcánica (figura 22), Entre sus elevaciones destacan los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, con alturas máximas de 5,280 y 5,482 m s.n.m. Debido a su gradiente altitudinal, la variedad de climas abarca desde clima templado húmedo hasta un clima frío a muy frío; y de acuerdo a su latitud, el parque se ubica en la región de vientos alisios en una zona donde predominan las circulaciones de tipo convectivo local, lo cual hace posible una gran estabilidad meteorológica durante la mayor parte del año.

Los suelos están compuestos por rocas ígneas extrusivas de pómez, por la acumulación de cenizas volcánicas de diferentes etapas de actividad volcánica y por sedimentos de origen volcánico a los cuales los factores clima y vegetación les han conferido una pobre evolución.; a consecuencia de la múltiple superposición de capas de tefras (pómez) y cenizas, además de los efectos del intemperismo hídrico y eólico y del clima, se ejercen efectos diferenciales sobre los procesos de formación de los suelos, teniendo como suelos característicos de esta región *andosols*, que por su composición y a la acción combinada de estos factores pueden ser vítricos, húmicos, mólicos y ócricos. Además, estos suelos son típicamente profundos, bien drenados pero húmedos todo el año y en muchos sitios se hallan limitados a cañadas o barrancas más o menos profundas que ofrecen un microclima especial.



Sitio	Altitud	Coordenadas UTM	
		X	_Y_
Coapexco	2679	528892	2116544
Palomas	2983	532338	2108091
O1/F5	3125	533634	2110361
Potrero	3399	533992	2111957
Cañada Amalacaxco	3659	535271	
La Joya	3858	536608	

Figura 22. Imagen Satelital del PN-IP y Sitio de Estudio

Al ser parte de una gran cadena montañosa (el Eje Volcánico Transversal) donde coinciden las regiones neártica y neotropical, se presenta un alto índice de endemismos (18 especies exclusivas de esta región). Y los principales tipos de vegetación que se encuentran son: Bosque de Pino, el cual presenta básicamente dos estratos, uno superior, arbóreo y otro inferior con pastos amacollados y escasos arbustos con hierbas. En general, entre los 2,500 a 4,000 m s.n.m. podemos encontrar bosques perennifolios de género *Pinus*, y en la franja más



alta predominan las especies *Pinus hartwegii*, seguido de *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus rudis*; acompañado de algunas veces por *Pinus leiophylla* y *Pinus teocote*. También, a veces se puede encontrar convivencia con *Quercus*, *Juníperos* o *Alnus*, en suelos *Andosol* o *Litosol* (Rzendowki, 1978).

Por otro lado, la flora fanerógama del parque es muy rica, en total se han detectado 914 especies lo que equivale al 5 % del total del país. En cuanto a su variedad faunística es bastante amplia y destacan varias especies endémicas (exclusivas de esta zona) como: la rana Leopardo de Moctezuma, el chipe Rojo, la culebra Parda Mexicana, el conejo de Los Volcanes, el mirlo Pinto, el murciélago Mula Mexicano, el saltaparedes y el vencejo Nuca Blanca, entre muchos otros; teniendo así un registro de un total de 16 familias, 37 géneros, y 52 especies de animales, lo que significa que el 30 % del total de mamíferos existentes en el país se encuentran en esta región, además por mencionar poco el parque cuenta con casi la mitad de las especies representadas en el Eje Neovolcánico Transversal (CONANP, 2019).

7.2. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La delimitación de las 6 zonas y 12 unidades ambientales homogéneas en composición, se hizo por medio de mapas topográficos y con base a reconocimiento en campo, tomando en cuenta las características de la zona como topografía, vegetación encontrada, y tipo de suelo en un gradiente altitudinal (2,679 – 3,858 m s.n.m) independientemente del grado de conservación. Para llevar a cabo esto se realizó una investigación cartográfica por medio de INEGI y Google Earth, para localizar seis sitios de muestreo cercanos al PN-IP, seleccionados en base a un gradiente altitudinal (figura 23).

DISTRIBUCION DE LAS ZONAS DE MUESTREO PARQUE NACIONAL IZTA-POPO Y ZONAS DE INFLUENCIA



Estaciones de Muestreo

SIMBOLOGÍA



Comunidades cercanas

Figura 23. Distribución de los diferentes Sitios de muestreo en un gradiente altitudinal de 2,679 a 3,858 m



En cada uno de los sitios se tomaron los siguientes datos de campo:

- Fecha de colecta
- Lugar de colecta
- Altitud
- Exposición
- Pendiente
- Vegetación

La altitud y coordenadas geográficas se determinaron con un GPS Gamín, la exposición y la pendiente se determinó con una brújula y clisímetro. El tipo de vegetación arbórea dominante y tipo de suelo, se determinó de acuerdo a mapas cartográficos y edafológicos de INEGI.

7.3. TOMA DE MUESTRA

Para los análisis químicos y físicos se colectaron, con una pala, cuatro submuestras de manera aleatoria (11 sitios), a una profundidad total de 0- 20 cm, (también 0-5 cm y 5-10 cm), de aproximadamente 1 kg de peso y que representaba la misma sección de perfil (mismo horizonte); las cuales después se homogenizaron para obtener una mezcla compuesta de 2 kg, se colocaron en bolsas de plástico etiquetadas con fecha, número de la muestra, lugar de colecta, coordenadas y sitio; obteniendo un total de 48 muestras, que fueron trasladadas al laboratorio para su análisis.

7.3.1. TOMA DE MUESTRA PARA ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DEL SUELO.

Para determinar la densidad aparente, la actividad microbiana, y actividad enzimática (fosfatasa ácida y alcalina) del suelo, las muestras fueron colectadas en tubos de acero de 10 cm de profundidad con 12 de diámetro, para obtener una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg; se tomaron a un lado de donde se recolectó la muestra de suelo para



propiedades físicas y químicas, se colocaron en bolsas herméticas para conservarlas y fueron etiquetadas para su transporte hasta su procesamiento.

En total se obtuvieron 36 muestras para densidad aparente, de las cuales se seleccionaron 30 para enzima fosfatasa y Carbono microbiano; las cuales se mantuvieron a 4 °C esto para disminuir su actividad biológica y pérdida de humedad hasta el momento de la evaluación de los ensayos de actividad enzimática y densidad aparente.

7.3.2. PRETRATAMIENTO DE MUESTRAS

Previo a los análisis químicos y físicos del suelo, las muestras se secaron al aire en un lugar libre de contaminantes y a temperatura ambiente, después se tamizaron con una malla de 20 mm para posteriormente ser envasadas en frascos de polietileno.

En el caso de los parámetros biológicos y bioquímicos las muestras se mantuvieron en refrigeración a una temperatura entre los 3-4 °C, con el fin de mantener condiciones óptimas para las enzimas, y reducir el metabolismo microbiano en la muestra.

Para la determinación de la actividad enzimática se procedió a secar a temperatura ambiente y tamizar las muestras de cada tubo de acero, con un tamiz de malla con una abertura de 40 mm, a fin de eliminar restos de raíces, MOS, fragmentos de minerales gruesos o alguna impureza que pueda alterar el resultado; se depositó en un vaso de precipitados el total de suelo obtenido, por muestra o tuvo, se procedió a moler lo obtenido para las pruebas de actividad enzimática.

7.4. DETERMINACIÓN EN LABORATORIO

7.4.1. ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO

La determinación de los parámetros del suelo se hizo de la siguiente manera:

7.4.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS

- Textura por el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1963, citado por Palmer y Truoch, 1989).

- Densidad real por la técnica del picnómetro y densidad aparente por la técnica del cilindro (Domínguez y Aguilera, 1987).

7.4.1.2. PROPIEDADES QUÍMICAS

- Conductividad de la solución del suelo relación 1:5, con un conductímetro (Richards, 1990).
- El N-Total del suelo con el método semimicro-kjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremner, 1965, Jackson, 1982).
- MOS por el Método de Walkley y Black (Walkley y Black, 1934, citados en Jackson, 1964)
- pH activo de suelo: 1:2 en agua desionizada por el método potenciométrico (Jackson, 1964).
- pH potencial en solución salina de KCl IN en relación 1:2 por el mismo método que el activo.
- Relaciones C: N, C: P, y N/P (Himes, 1998)
- Fósforo Extractable por el método de Bray y Kurtz modificado (Bray y Kurtz, 1945)
- Fósforo Extractable por el método de Olsen (Olsen y Dean, 1965)
- Fósforo Total (Digestión de HClO_4 y determinado en base al desarrollo del complejo vanadomolibdofosfórico) (Jackson, 1964).

Todos los análisis se determinaron con referencias en una curva de calibración.

7.5. ANÁLISIS BIOLÓGICO Y BIOQUÍMICO DEL SUELO

Para determinar la actividad de las enzimas fosfatasa ácida y alcalina se empleó el método de p-Nitrofenilfosfato (Tabatabai, 1994), el cual se describe a continuación:

A) Pesar un gramo de suelo y colocar en un mortero

B) Adicionar 0.3 mL de Tolueno

C) Adicionar 1 mL de MUB(Buffer Universal Modificado) pH 5, para la actividad fosfata ácida y 1 mL pH 11 para la fosfatasa alcalina

D) Agregar unos granos de arena de cuarzo y macerar hasta homogenizar

E) Tomar alícuota de 0.3 mL de homogenizado y colocarla en tubos para incubación

F) Adicionar 4 mL de MUB pH 5, para la actividad fosfata ácida y 4 mL pH 11 para la fosfatasa alcalina

G) Adicionar 4 mL de NaOH a 0.5 M. Agitar y filtrar la suspensión con papel Whatman No. 2

H) Leer a 400 nm y comparar la actividad enzimática con base en una curva de calibración que contenga 0, 10,20, 30, 40 y 50 mg de p-Nitrofenol

*El calculo se realiza con la referencia de una curva de calibración con estándares de p-Nitrofenol

Elaborado por:
Analilia Elizabeth García Barrera

Created in BioRender.com

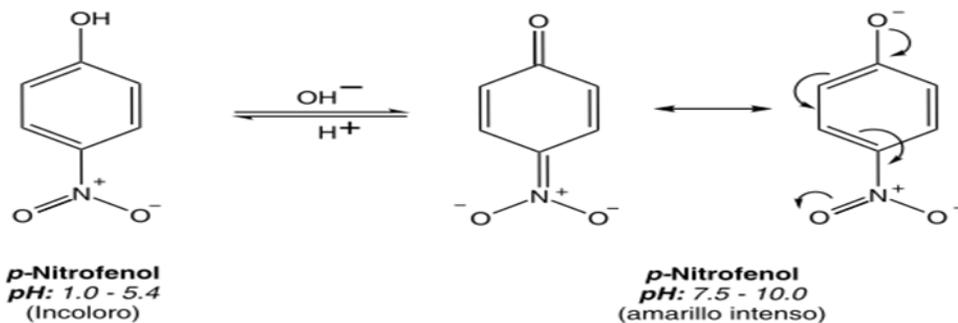


Figura 24. Proceso de p-Nitrofenol

7.5.1. CURVA DE CALIBRACIÓN

A) Se coloca 1 mL de solución estándar de p-Nitrofenol en matraz volumétrico de 100 mL y después de aforar con agua, mezcle fuertemente

B) De esta solución de p-Nitrofenol, pipetear alícuotas de 0, 1, 2, 3, 4, y 5 mL

C) Ajustar el volumen a 5 mL con adición de agua y proceder a incubar como cualquier otra mezcla.

D) Aforar a 50 mL, mezclar y filtrar la suspensión resultante

E) Si la intensidad del color del filtrado en las muestras excede la de los 50 mg de p-Nitrofenol, una alícuota del filtrado puede ser diluida en agua hasta que el colorímetro pueda leer dentro de los límites de la curva de calibración

Elaborado por:
Analilia Elizabeth García Barrera

***(Agregar 1 mL de $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 M y 4 mL de NaOH 0.5 M)**

Oc1ccc(cc1)[N+](=O)[O-]

p-Nitrofenol

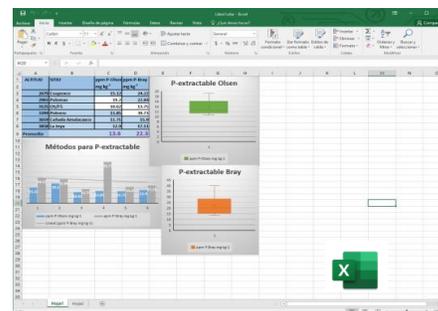
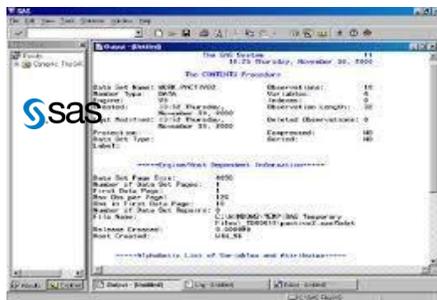
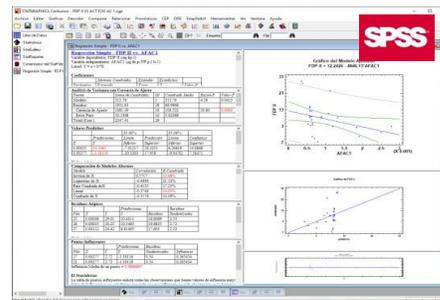
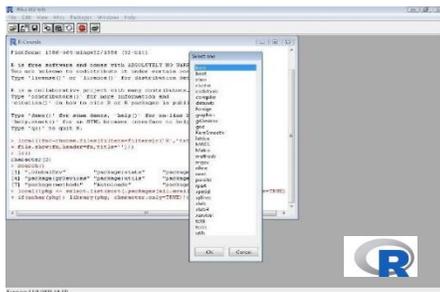
7.6. TRABAJO ESTADÍSTICO

7.6.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Para evaluar el efecto de la altitud en las propiedades edáficas, se realizaron análisis de Varianza (ANOVA) estandarizando los datos. Para todos los casos se realizó una prueba de comparación de medias mediante el criterio de diferencia mínima significativa como Tukey ($P = 0.05$)

Para conocer las relaciones de los valores de las propiedades químicas, físicas, biológicas y bioquímicas del suelo que fueron determinadas, respecto a la cantidad de P-extraíble, se realizaron análisis de correlación simple de Pearson, por medio de Excel, R Proje, Statgraphics y SAS.

De igual forma se realizó un análisis de varianza, diagramas de caja con bigote y Violín, para conocer la influencia del efecto altitudinal y el grado de conservación del sitio sobre la disponibilidad del P como indicadores de calidad del suelo, en los sitios. Por último, para conocer que variables tiene mayor influencia con el P- extractable y la actividad fosfatasa ácida y alcalina.





RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ilustración de Andrés Agustín García Barrera

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La superficie del país con origen geológico de diferentes eras (Precámbrica, Paleozoica, Mesozoica, Cenozoica), posee gran variedad de rocas que, por su génesis, incluye rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. El INEGI (2006) menciona seis unidades geológicas (roca metamórfica, roca sedimentaria, roca volcano- sedimentaria, roca ígnea extrusiva, roca ígnea intrusiva y suelo) comprendidas para la República Mexicana. El PN-IP posee principalmente roca ígnea extrusiva y en menor extensión rocas volcano-sedimentarias y un mosaico edáfico que da soporte a diferentes comunidades boscosas en los sitios estudiados distribuidos entre 2,679 y 3,858 m s.n.m.

La descripción de las fracciones separadas y textura del suelo en cada una de las comunidades forestales, entre otras propiedades edáficas fueron descritas con anterioridad en cada lugar del PN-IP (Cuadro 11).

Cuadro 11. Caracterización de las localidades de estudio e información de campo de los sitios de observación en el PN-IP, de acuerdo a su altitud; recopilada con anterioridad (2003-2017 aprox.) Profundidad de muestreo 0 a-20 cm

Localidad/ No. De sitio	Altitud	Longitud	Latitud	Temp	Arcilla	Limo	Arena	Clase Textural
	m			° C	%			
Coapexco/8	2679	528892	2116544	25.8	12.3	26	61.7	franco-arenoso
Coapexco/9	2679	528892	2116544	25.8	14.3	28	57.7	franco-arenoso
Palomas/10	2983	532338	2108091	25.9	8.3	24	67.7	franco-arenoso
Palomas/11	2983	532338	2108091	25.9	8.3	24	67.7	franco-arenoso
O1/F5/1	3125	533634	2110361	25.9	6.3	22	71.7	franco-arenoso
Potrero/2	3399	533992	2111957	25.9	6.3	26	67.7	franco-arenoso
Cañada Amalacaxco/5	3659	535271	2112631	25.9	10.3	22	67.7	franco-arenoso
Cañada Amalacaxco/6 (BAJO <i>Pino</i>)	3659	535271	2112631	25.9	8.3	22	69.7	franco-arenoso
Cañada Amalacaxco (bajo <i>Abies</i>)/7	3659	535271	2112631	25.9	6.3	26	67.7	franco-arenoso
La Joya/3	3858	536608	2116380	25.9	10.3	20	69.7	franco-arenoso
La Joya/4	3858	536608	2116380	25.9	6.3	26	67.7	franco-arenoso

Como lo muestra el cuadro 11, se encontró que en las zonas de estudio predomina en los suelos la textura de franco-arenoso en todas las zonas en los principales grupos de suelo que fueron los *Regosols* y *Andosols* principalmente en el 80 % de la superficie de sitios estudiados con otros suelos asociados como los *Fluvisols*, *Litosols* y *Cambisols*. La temperatura ambiental osciló ligeramente entre 25.8 °C a 25.9 °C.

8.1. DESCRIPCIÓN FISIOGRAFICA DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

En el ANP del PN-IP estudiada en el gradiente altitudinal de 2,650 a 3,828 m s.n.m. se encontraron terrenos, con suelos poco desarrollados entre los que se observaron *Andosoles*, *Regosoles*, *Leptosoles* y *Phaeozems* que dan soporte, entre la vegetación arbórea, al género *Pinus* con 6 especies: *P. hartwegii*, *P. teocote*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. patula* y *P. ayacahuite*; al género *Abies* con una especie

Cuadro 12. Tipo de vegetación y Suelos en la zona de estudio desde altitudes menores (Coapexco) a mayores (La Joya) en el gradiente altitudinal; donde Cpx = Coapexco, Pal = Palomas, Ptr = Potrero, Cañada = Cañada Amalacaxco; Vegetación-> P.ps = *Pinus pseudostrobus*, P. m o= *Pinus montezumae*, P. pat= *Pinus patula*, P.t= *Pinus teocote*, P.h.= *Pinus hartwegii*, A= *Abies religiosa*, C = *Cupresus sp.*

	<i>P.ps</i>	<i>P.mo</i>	<i>P.pat</i>	<i>P.a</i>	<i>P.t</i>	<i>P.h</i>	A	C	SUELO
Cpx 2679 m s.n.m.	✓								Andosol
Pal 2983 m s.n.m.		✓	✓						Litosol
O1/F5 3125 m s.n.m.	✓			✓					Phaeozem
Ptr 3399 m s.n.m.		✓		✓	✓	✓	✓	✓	Regosol
Cañada 3659 m s.n.m.					✓	✓	✓		Andosol
La Joya 3858 m s.n.m.						✓			Andosol

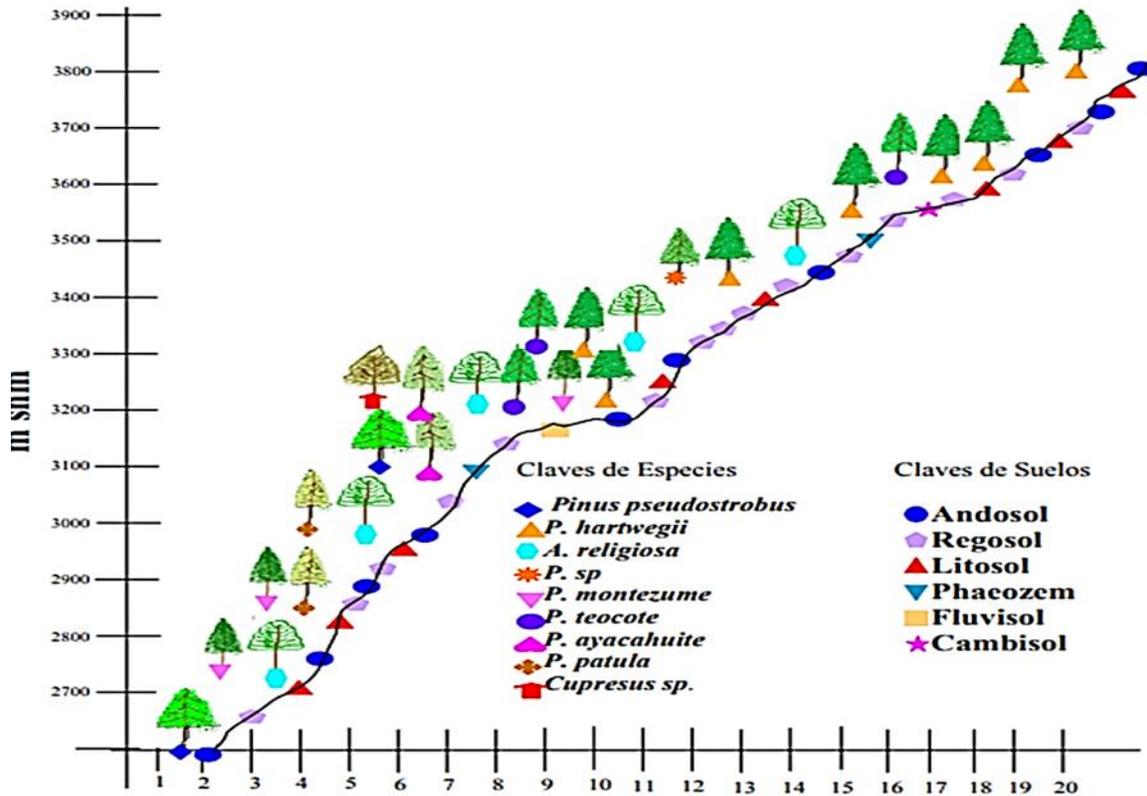


Figura 25. Vegetación y tipos de Suelos en el PN-IP (Tomado de Astudillo-Bravo, 2006)

También se encontraron *Phaeozems* y *Fluvisoles* en el sitio O1/F5. Con referencia al estrato arbóreo entre los 2,650 y 3,100 m s.n.m. se encontró a *P. pseudostrobus* entre 2,800 y 3,300 m s.n.m. *P. montezumae* de 2,900 a 3,000 m s.n.m.; *P. patula* de 3,000 a 3,200 m s.n.m.; *P. ayacahuite* de 3,300 a 3,600 m s.n.m. y *P. teocote* de 3,300 y *P. hartwegii* 3500 a 3828 m s.n.m. (Astudillo- Bravo, 2006 y Granados- Damián, 2003) (figura 25).

Se necesita mencionar que por distribución importancia en el país a lo largo del eje Neovolcánico, y en otros los tipos de suelos presentes, son aptos para desarrollar asociaciones forestales (*Pinus*, *Abies* y *Quercus*) que se distribuyen en piso subalpino y alpino en estas latitudes (aproximadamente paralelo 19 °). Estos son suelos jóvenes derivados de ceniza volcánica, de mediana fertilidad y que comparten con los suelos descritos, la acidez que va de moderada a fuerte.

Por otro lado los suelos *Andosols* son suelos con presencia significativa de materiales amorfos (alófano, imogolita, ferrihidrita y compuestos aluminico-húmicos), derivados de ceniza volcánica, ricos en MO pero con contenido de C-Orgánico y con cantidades altas de



Al+Fe (extractados en oxalato de amonio), una densidad aparente (medida a 33 kPa de retención de agua) de 0.9 g cm^{-3} o menos y una retención de fosfatos de 85 % o más (USDA, 1998), Olivares- Martínez *et al.* (2016), describen al tipo de suelo predominante en el Eje Neovolcánico transmexicano, como *Andosols*, los cuales, como se mencionó, tienen una elevada retención de P, un pH ácido y baja saturación de bases, lo que sugiere la presencia de minerales ricos en aluminio, lo que compete a esta investigación.

8.2. RECOPIACIÓN DE DATOS.

Para llevar a cabo esta investigación, se realizó una selección y recopilación de información, a partir de una base de datos de investigaciones anteriores del Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal (Lab. 8 UMIEZ) con la finalidad actualizar y aportar nuevos hallazgos a la luz de información actualizada en referencia a la calidad del suelo en el PN-IP.

La base de datos referida describe los valores derivados del análisis de algunas propiedades físicas, químicas y bioquímicas de los suelos de estos sitios, sin embargo, los análisis entre las variables originales apoyados bibliografía reciente y complementaria y se ampliaron a partir de cálculos de interacciones que permitieron generar nuevas variables de resultados a partir de esta misma base de datos, con el fin de continuar esta investigación.

Las nuevas variables determinadas fueron Delta pH, cálculo de la masa del suelo (en profundidad de 20 cm, en 0-5 cm y 5-10 cm), y de la MO, los contenidos gravimétrico de agua, y carbono total (en profundidad de 20 cm, en 0-5 cm y 5-10 cm) así como del nitrógeno total, la relación carbono- nitrógeno (C/N), un factor de disponibilidad de P calculado como el cociente resultante entre el P extraído en solución de Bray I y el extraído en solución de Olsen ($\text{P extraído con solución Bray I en Mg kg}^{-1} / \text{P extraído con solución Olsen en Mg kg}^{-1}$), otro factor de disponibilidad de P calculado como la diferencia entre fósforo extraído en solución de Olsen menos el fósforo extraído en solución Bray I ($\text{P extraído con solución Olsen en Mg kg}^{-1} - \text{P extraído con solución Bray I en Mg kg}^{-1}$) y por último un factor de disponibilidad de P calculado a partir del promedio del fósforo extraído en solución de Olsen con el fósforo extraído de la solución Bray I ($\text{P extraído con solución Olsen en Mg kg}^{-1} + \text{P extraído con solución Bray I en Mg kg}^{-1} / \text{número de muestras}$) y la Clase Textural (Anexo1)

8.3. INDICADORES FÍSICOS DE LA CALIDAD DEL SUELO.

Con los análisis realizados para los parámetros físicos, al medir las variables de pH (pH activo, pH potencial, y Δ pH) se encontró que los suelos dentro del PN-IP, presentan un pH activo desde 5.26 a 6.91 unidades de pH. La NOM-021-SEMARNAT-2000 indica que los valores entre 5.1 – 6.5 corresponden a la categoría de moderadamente ácidos, por lo que los suelos de La Cañada Amalacaxco, La Joya, Coapexco, Palomas y O1/F5, son suelos moderadamente ácidos, mientras que los suelos del sitio Potrero, se clasifican como neutros, según la Norma Oficial indicada (cuadro 13, figura 26).

Cuadro 13. Variables de pH y Carga Eléctrica (CE) en la zona de estudio

ALTITUD	SITIO	pH act	pH KCl	Δ pH	CE dS m ⁻¹
2679	Coapexco	5.81	5.29	0.52	0.16
2983	Palomas	6.31	5.6	0.68	0.015
3125	O1/F5	6.32	5.08	1.24	0.2
3399	Potrero	6.91	5.3	1.61	0.48
3659	Cañada Amalacaxco	5.26	4.29	0.96	0.07
3858	La Joya	5.38	4.43	0.94	0.1

En los diferentes sitios estudiados se encontraron poblaciones de *Pinus sp*, los cuales presentan tolerancia y eficiencia para desarrollarse en suelos muy ácidos (Pritchett, 1991, Granados-Damián, 2003, Astudillo-Bravo 2006). Los estudios realizados por Oliva-Cruz (2016) mencionan que el pH tiende a disminuir en sistemas con plantaciones o presencia de especies de *Pinus sp*, algo que se evidencia en las altitudes que van desde 2600 a 3100 m s.n.m. y a profundidades de 0 a 15 cm.

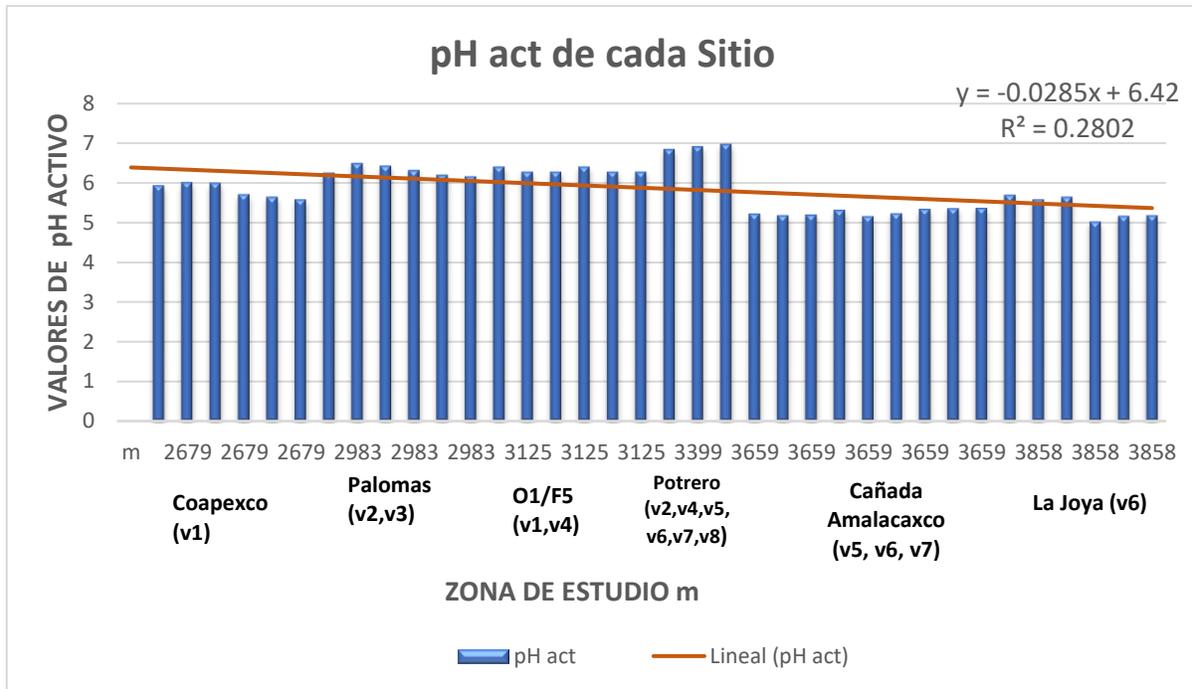


Figura 26. pH activo en los 11 sitios de Estudio. Donde v1 = *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3 = *Pinus patula*, v4 = *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 = *Pinus hartwegii*, v7 = *Abies religiosa*, v8 = *Cupresus*.

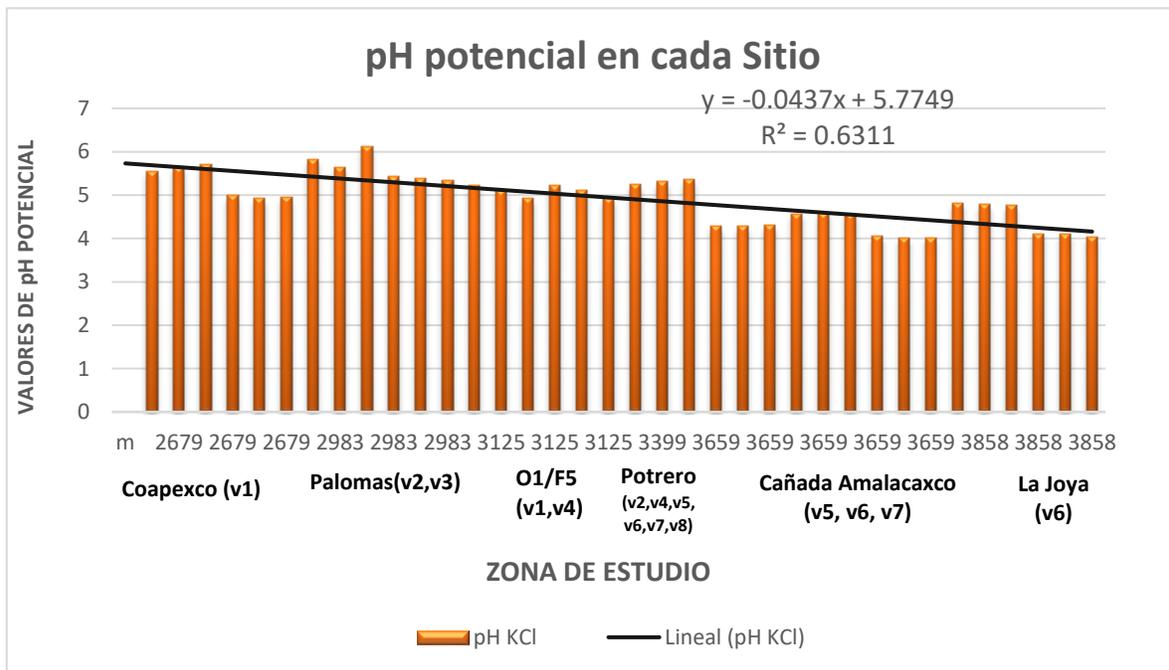


Figura 27. pH potencial en los 11 sitios de estudio. Donde v1= *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3 = *Pinus patula*, v4= *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 = *Pinus hartwegii*, v7 = *Abies religiosa*, v8 = *Cupresus*.

Teniendo una tasa de renovación estimada (y que va variando) de uno a tres años en climas templados- fríos como los del PN-IP. Esto puede contribuir a que se almacenen grandes cantidades de nutrientes, pero estén fijados debido a la composición mineral del suelo presente.

Por último, el ΔpH , resultado de la diferencia entre el pH act y el pH KCl, es una variable de gran interés, la cual tiene relación con otras variables. El ΔpH se puede interpretar como, $\Delta\text{pH} = (\text{pH KCl} - \text{pH act})$ donde: 1) $\Delta\text{pH} > 0$ indica predominio de carga positiva, 2) $\Delta\text{pH} = 0$ indica carga neutra y 3) $\Delta\text{pH} < 0$ indica predominio de carga negativa. Esta variable relaciona a los suelos ácidos con la cantidad de sales minerales o CE.

La zona de estudio en el PN-IP y sus zonas de influencia tiene un intervalo de ΔpH de 0.52 a 1.61 unidades, donde Coapexco posee el valor más bajo con 0.52 unidades y Potrero el valor más alto con 1.61 unidades (Cuadro 13 y figura 28).

De acuerdo a lo anterior el ΔpH se relaciona estrechamente con la CE y de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 indica que los valores $< 1 \text{ dS m}^{-1}$ corresponden a la categoría de suelos con efectos despreciables de la salinidad (ver Cuadro 7), por lo que los sitios de la zona de estudio tienen esta particularidad, al estar dentro de un intervalo de 0.007 a 0.478 dS m^{-1} (figura 29).

La DC (Densidad de Cilindro) de los suelos se encontró entre 0.81 hasta 1.37 g cm^{-3} , las cuales se consideran de ligeras – bajas, las cuales propician un desarrollo radical favorable para los individuos presentes en estos sitios, estos valores corresponden a lo encontrado por Granados- Damián (2003) y Astudillo- Bravo (2006) para el PN-IP. Para DP (Densidad de probeta) los valores encontrados estuvieron dentro del intervalo 0.39 a 1.19 g cm^{-3} , considerados de igual manera de ligeras – bajas.

En relación con el Espacio Poroso (EP) se registraron valores 7.98 a 81.10 %, esto debido al contenido de MOS, composición y estructura del suelo. Todos los suelos son franco arenoso, el sitio denominado Cañada Amalacaxco bajo la presencia de *Pinus teocote*, *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* posee baja cantidad de arcillas (6.32 – 8.32%) ver Cuadro 14 y mayor número de arena (67 – 69%). Se han encontrado estudios donde se menciona que los suelos

forestales con vegetación de pino, oyamel y robles, se caracterizan por texturas gruesas (Bockheim, 1991; Granados- Damián, 2003).

El porcentaje de humedad y contenido gravimétrico fue determinado en muestras de suelo tomadas a una profundidad de 0 - 5 cm y de 5 cm - 10 cm, presentando porcentajes para humedad entre 2.09 a 28.31 %. El contenido gravimétrico se encontró en el intervalo de 45.80 g kg⁻¹ a 322 g kg⁻¹, lo cual es influenciado por su porosidad (mayor a 50% en algunos casos), contenido de arcillas y arenas Cuadro 14.

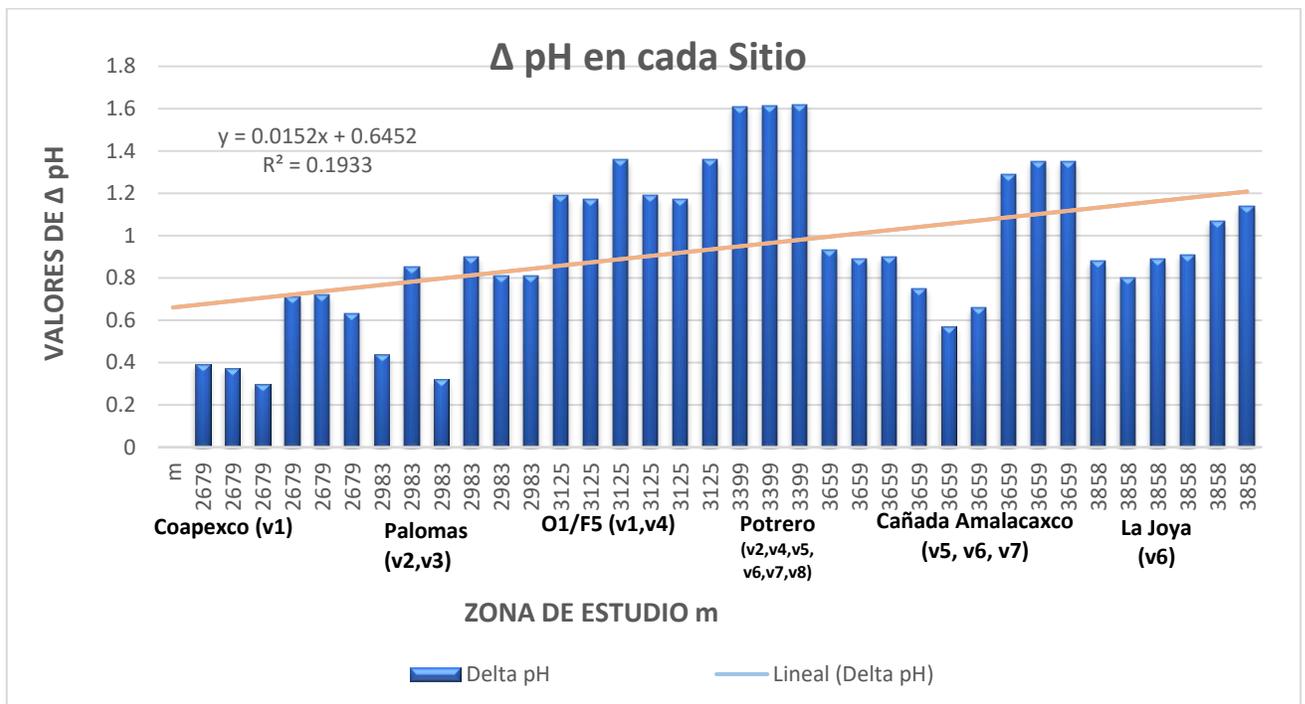


Figura 28. Δ pH en los once sitios de Estudio. Donde v1 = *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3 = *Pinus patula*, v4 = *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 = *Pinus hartwegii*, v7 = *Abies religiosa*, v8 = *Cupressus*.

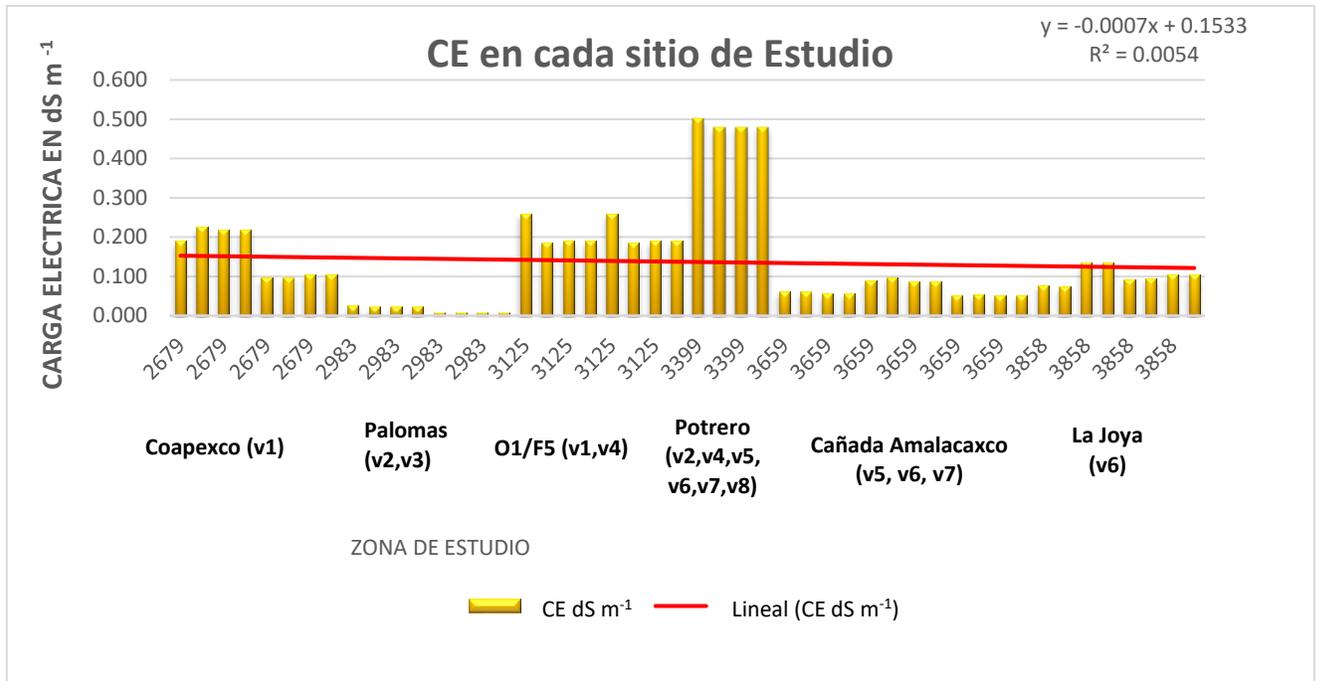


Figura 29. $\Delta\ pH$ en los 11 sitios de estudio. Donde v1 = *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3 = *Pinus patula*, v4 = *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 = *Pinus hartwegii*, v7 = *Abies religiosa*, v8 = *Cupressus*.

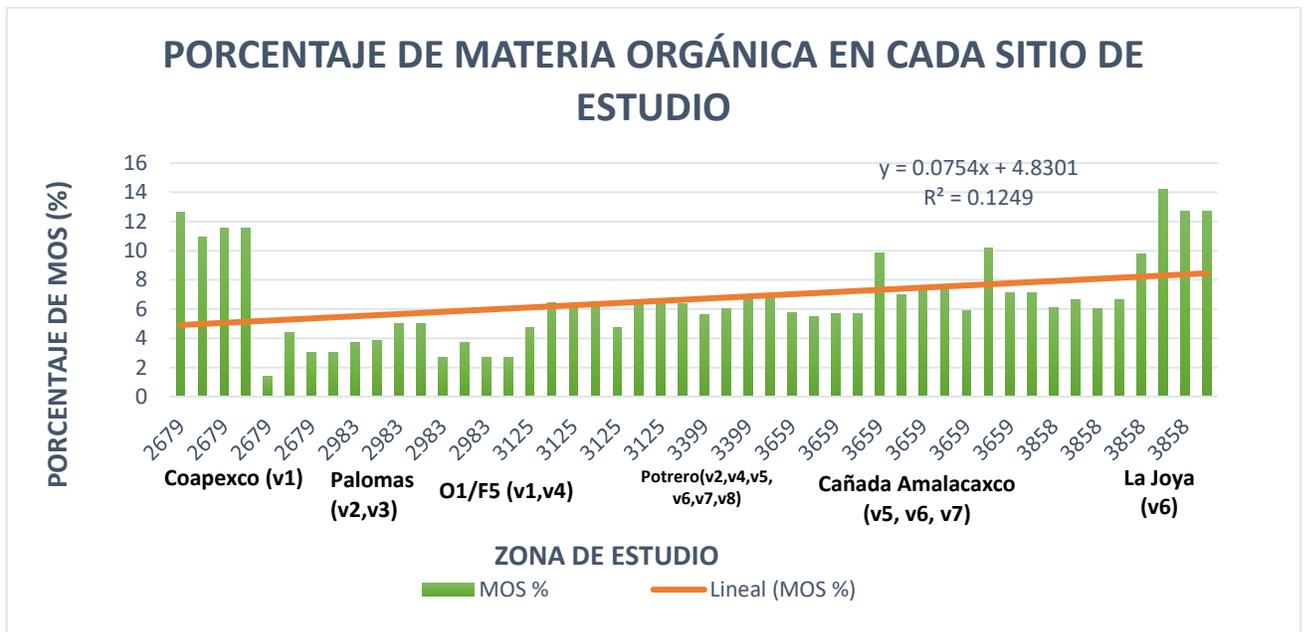


Figura 30: Porcentaje de MOS% en las zonas de estudio, con la línea de tendencia que indica como aumenta. Donde v1 = *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3 = *Pinus patula*, v4 = *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 = *Pinus hartwegii*, v7 = *Abies religiosa*, v8 = *Cupressus*.



Cuadro 14. Propiedades físicas del suelo en la zona de estudio

LOCALIDAD	DAP PROB	DA CIL	EP	% ARCILLA	% LIMO	% ARENA	% HUM	CONT GRAV H2O	CLASE TEXTUR.
COAPEXCO	0.95	0.8	17.4	12.32	26	61.68	20.4	322	franco-arenoso
COAPEXCO	0.96	0.6	38.1	12.32	26	61.68	20.4	242.2	franco-arenoso
COAPEXCO	0.93	0.6	36.3	12.32	26	61.68	18.8	223.2	franco-arenoso
COAPEXCO			36.3	12.32	26	61.68	18.8		franco-arenoso
COAPEXCO	1.16	0.8	30.1	14.32	28	57.68	10.7	174.7	franco-arenoso
COAPEXCO	1.16	0.9	24.4	14.32	28	57.68	11.1	196.3	franco-arenoso
COAPEXCO	1.17	0.7	39.5	14.32	28	57.68	8.4	119.7	franco-arenoso
COAPEXCO			39.5	14.32	28	57.68	8.4		franco-arenoso
POLOMAS	1.33	1	20.8	8.32	24	67.68	6.7	141	franco-arenoso
POLOMAS	1.37	0.6	52.7	8.32	24	67.68	8.4	108.9	franco-arenoso
POLOMAS	1.37	0.8	38.2	8.32	24	67.68	8.9	150	franco-arenoso
POLOMAS			38.2	8.32	24	67.68	8.9		franco-arenoso
POLOMAS	1.3	0.8	38.8	8.32	24	67.68	14.3	237	franco-arenoso
POLOMAS	1.3	0.9	26.7	8.32	24	67.68	11.6	222.1	franco-arenoso
POLOMAS	1.36	0.5	60	8.32	24	67.68	28.3	308.2	franco-arenoso
POLOMAS			60	8.32	24	67.68	28.3		franco-arenoso
O1/F5	1.08	0.8	24.2	6.32	22	71.68	11	180.6	franco-arenoso
O1/F5	1.11	0.9	21.5	6.32	22	71.68	8.5	148.9	franco-arenoso
O1/F5	1.1	0.9	14.3	6.32	22	71.68	10.6	199.6	franco-arenoso
O1/F5			14.3	6.32	22	71.68	10.6		franco-arenoso
O1/F5	1.08	0.8	24.3	6.32	22	71.68	11	180.6	franco-arenoso
O1/F5	1.11	0.9	21.5	6.32	22	71.68	8.5	148.9	franco-arenoso
O1/F5	1.1	0.9	14.3	6.32	22	71.68	10.6	199.6	franco-arenoso
O1/F5			14.3	6.32	22	71.68	10.6		franco-arenoso
POTRERO	1.2	0.9	20.7	6.32	26	67.68	2.7	51.6	franco-arenoso
POTRERO	1.18	1.2	20.7	6.32	26	67.68	2.7	64	franco-arenoso
POTRERO	1.2	1.1	8	6.32	26	67.68	10.2	225.5	franco-arenoso
POTRERO			8	6.32	26	67.68	10.2		franco-arenoso
POTRERO CAÑADA									
AMALACAXCO	0.94	0.5	48.2	8.32	22	69.68	29.8	299.8	franco-arenoso
AMALACAXCO CAÑADA									
AMALACAXCO	1.21	0.2	81	8.32	22	69.68	33.6	122.8	franco-arenoso
AMALACAXCO CAÑADA									
AMALACAXCO	1.2	0.7	31	8.32	22	69.68	21.1	288.3	franco-arenoso
AMALACAXCO CAÑADA									
AMALACAXCO			32.1	8.32	22	69.68	21.1		franco-arenoso
AMALACAXCO CAÑADA									
AMALACAXCO	0.97	0.7	24.5	6.32	26	67.68	18.4	252.9	franco-arenoso
AMALACAXCO CAÑADA									
AMALACAXCO	0.96	0.9	17.4	6.32	26	67.68	12	208.4	franco-arenoso
AMALACAXCO CAÑADA									
AMALACAXCO	1	0.7	32.1	6.32	26	67.68	17.7	256.5	franco-arenoso
AMALACAXCO CAÑADA									
AMALACAXCO			32.1	6.32	26	67.68	17.7		franco-arenoso
AMALACAXCO CAÑADA									
AMALACAXCO	0.9	1.1	48.5	10.32	22	67.68	2.1	45.8	franco-arenoso
AMALACAXCO CAÑADA									
AMALACAXCO	1	0.6	48.5	10.32	22	67.68	11.1	138.9	franco-arenoso

8.4. INDICADORES QUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL SUELO

La cantidad de MOS para el PN-IP fue de 66.11 Mg ha^{-1} representando el valor más alto en La Joya (93.6 Mg ha^{-1}) y el menor en Palomas (36.6 Mg ha^{-1}) y sabiendo que aproximadamente el 55-60% de la MOS corresponde a carbono orgánico del suelo (COS) (FAO y GTIS, 2015), se presentan los mismos sitios con los valores más alto y bajos (Cuadro 15, figura 30 y 31).

En la zona de estudio la concentración de COS varió de 69.3 a 30.9 Mg ha^{-1} con una media de 52.7 Mg ha^{-1} en todo el espesor de las muestras tomadas. Estos resultados pueden ser explicados, si se consideran dos factores:

- 1) la altitud es un factor que influye sobre la temperatura y esta a su vez sobre el tipo de vegetación presente en el lugar y el metabolismo tanto de macro como microorganismos.
- 2) la liberación de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera se produce cuando la MOS se oxidan por medio de organismos y raíces subterráneas (Raich y Potter, 1995). Esto último tiene relación con el aumento del porcentaje de la MOS en la zona de Coapexco, con el 7.3 % (figura 30, cuadro 15)

En el caso de los microorganismos que se sabe que intervienen en la descomposición de la MO, debe influir en la lenta descomposición de MOS y así su contenido se incrementa y se relaciona con la altitud. De acuerdo a esto se puede observar que en los sitios más bajos del gradiente altitudinal se encontraron valores de 3.6 % (Palomas) mientras que los localizados a mayor altitud, el porcentaje de MOS fue mayor 9.3 % (La Joya). Esto último puede ser uno de los factores que contribuyan a la acidez del PN-IP.

Cuadro 15. Promedio y Masa de MOS, Carbono Total en cada Sitio

Localidad	%		g Mg ha ⁻¹					
	MOS	COS	MASA MOS 20 cm	MASA MOS 0-5 cm	MASA MOS 6-10cm	MASA COS 20 cm	MASA COS 0-5 cm	MASA COS 6-10 cm
Coapexco	7.3	38	73	25.4	25.4	52.877	13.2	13.2
Polomas	3.6	19	36.6	14.8	14.8	30.9	7.7	7.7
O1/F5	6	31	59.8	25.9	25.9	53.95	13.5	13.5
Potrero	6.3	33	62.9	33.3	33.3	69.33	17.3	17.3
Cañada								
Amalacaxco	7.1	37	70.8	24.8	24.8	51.6	12.9	12.9
La Joya	9.3	49	93.6	27.8	27.8	57.8	14.4	14.4

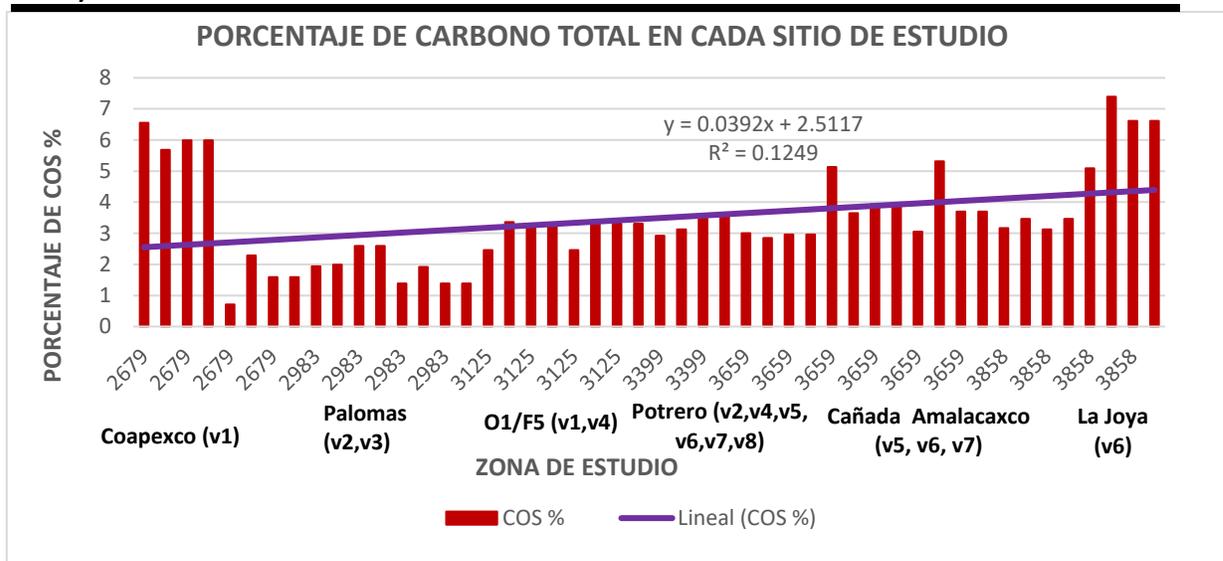


Figura 31: Porcentaje de COS (%) en las zonas de estudio, con la línea de tendencia que indica como aumenta Donde v1 = *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3=*Pinus patula*, v4 = *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 = *Pinus hartwegii*, v7 = *Abies religiosa*, v8 = *Cupresus*.

La cantidad de CO₂ en suelo natural en los primeros centímetros de espesor del suelo para el PN-IP fue de 17.2 Mg CO₂ en 20 g suelo, representando el valor más alto en Coapexco (32 Mg CO₂ en 20 g suelo) y el menor en O1/F5 (8.5 Mg CO₂ en 20 g suelo), los valores para los 6 a 10 cm de profundidad fueron similares teniendo a Coapexco como el valor más alto con 24.5 Mg CO₂ en 20 g suelo, y el valor más bajo esta vez fue Potrero con 9.2 Mg CO₂ en 20 g suelo. (Cuadro 16, figura 31) teniendo un promedio de 52.7 Mg ha⁻¹.

Cuadro 16: Relación de CO₂ en suelo natural y fumigado a dos profundidades (0-5 cm y 6-10cm) y carbono microbiano a dos profundidades (0-5 cm y 6-10cm)

Localidad	CO ₂ Suelo natural 0-5 cm	CO ₂ Suelo natural 6-10 cm	CO ₂ Suelo fumigado 0-5 cm	CO ₂ Suelo fumigado 6-10 cm	C Bio Microb 0-5 cm	C Bio Microb 6-10 cm
	Mg CO ₂ en 20 g suelo				Mg 20g ⁻¹ suelo	
Coapexco	32	24.5	41.9	39.4	22	33.1
Polomas	10.1	17.8	28.1	34.8	40	37.6
O1/F5	8.5	14.7	15.4	19.9	15.5	11.4
Potrero	11.4	9.2	21.3	15.8	22	14.7
Cañada Amalacaxco	19.9	15	32.4	27.2	27.8	27
La Joya	21.3	14.2	40.3	32	38.6	42.7

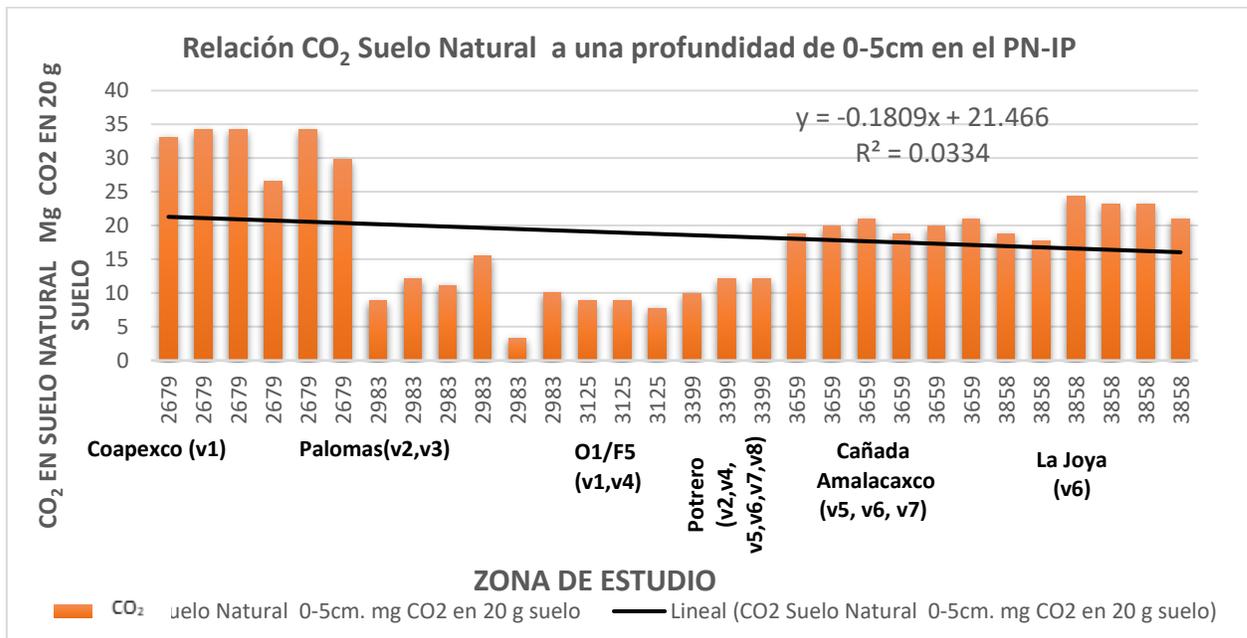


Figura 32. Contenido de CO₂ en suelo natural a una profundidad de 0-5 cm en el PN-IP Donde v1 = *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3=*Pinus patula*, v4 = *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 = *Pinus hartwegii*, v7= *Abies religiosa*, v8 = *Cupresus*.

Un elemento esencial de gran importancia para los ecosistemas y la nutrición vegetal es el Nitrógeno. Respecto al Nitrógeno Total (N-Total) se encontraron valores entre 0.32 a 0.1 %, su interacción fue similar con la de la MOS y COS Cuadro 16).

La cantidad de Nitrógeno (N) y MOS en el suelo depende de muchos factores tanto climáticos como edáficos, perturbaciones naturales y las provocadas por el hombre. Los contenidos de N-Total se encuentran principalmente en la capa de humus de la cubierta forestal (Pritcett, 1991; Astudillo- Bravo, 2006). Así se puede ver que la cantidad de N-Total en el suelo depende de la MOS que se encuentre en él, y por lo tanto su relación con otros elementos como el Carbono y el Fósforo, ya que en la MOS se presentan niveles elevados de nutrimentos.

El comportamiento del porcentaje de N-Total fue similar a los de la MOS y COS principalmente, donde aumentaba el porcentaje conforme a la altura, con excepción de Coapexco donde se observa un incremento (0.31%). Este resultado se puede explicar con variables del sitio de estudio como temperatura, CO₂ obtenido y la vegetación del lugar (figura 33).

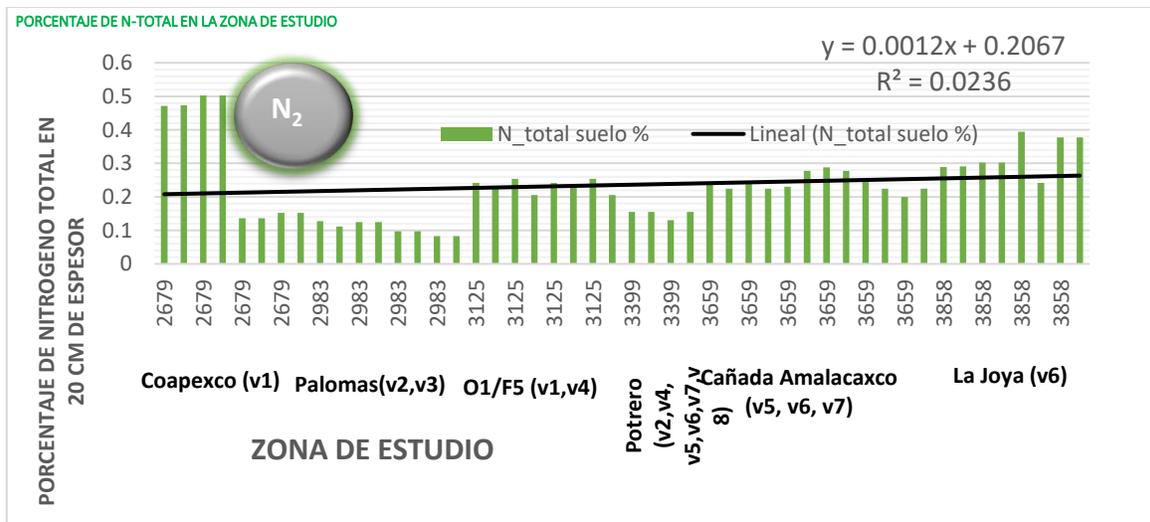


Figura 33. Relación de N-Total con cada uno de los sitios de estudio. Donde v1 = *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3 = *Pinus patula*, v4 = *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 = *Pinus hartwegii*, v7 = *Abies religiosa*, v8 = *Cupresus*.

La MO es una fuente principal de P en el Suelo. Según Astudillo-Bravo (2006) existe menos P en suelos que sostienen a cultivos de coníferas que en los que se hallan debajo de maderas duras.

Cuadro 17. Contenido de P-extractable por Bray I y Olsen en cada zona

ALTITUD	SITIO	ppm P-Olsen	ppm P-Bray
2679	Coapexco	15.12	24.22
2983	Palomas	19.2	22.84
3125	O1/F5	10.62	13.75
3399	Potrero	11.85	39.73
3659	Cañada Amalacaxco	11.71	15.9
3858	La Joya	12.9	17.11
Promedio		13.6	22.3

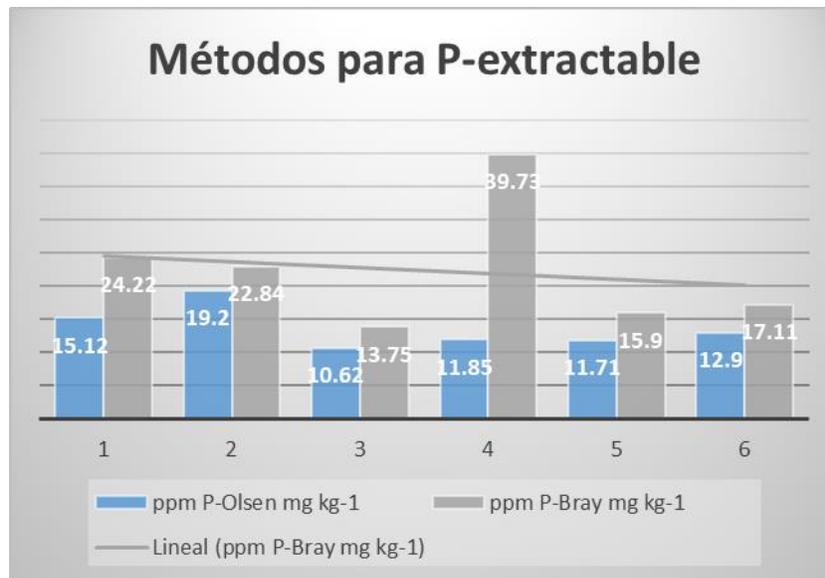


Figura 34. Disponibilidad de P por ambos métodos

Una gran proporción de P del suelo es aportada por combinaciones orgánicas; esto debido por el ataque de microorganismos, los compuestos orgánicos de P se mineralizan y así se cambian las combinaciones inorgánicas.

La cantidad de P- disponible encontrado por el método Bray I para el PN-IP fue entre 13.8 y 39.7 Mg P kg⁻¹, en Palomas y Cañada Amalacaxco respectivamente con promedio de 22.3

Mg P kg⁻¹, con el método de Olsen, la extracción de P fue de 10.6 a 19.2 Mg P kg⁻¹, en O1/F5 y Palomas respectivamente, con media de P de 13.6 Mg kg⁻¹

Como se puede observarse la solución de Bray I extrae casi 40 % más fósforo que la solución extractora de Olsen. Respecto a la actividad fosfatasa ácida, al considerar ambas profundidades, el valor mínimo (0.00056 µg de p- NP g⁻¹), se encontró en Coapexco donde el ΔpH tuvo el menor valor (ΔpH = 0.52) y la Joya con 0.0014 µg de p- NP g⁻¹ (ΔpH = 0.94) tuvo el mayor valor de AFac y una media general de 0.00095 µg de p- NP g⁻¹ con un ΔpH = 0.99 (cuadro 19)

Cuadro 18. Propiedades químicas de los suelos en el PN-IP

Localidad	N_total suelo	COS	C/N	MOS	COS	ppm P-Olsen	ppm P-Bray I	FDP I Cociente P- Bray I/ P- Olsen	FDP II Diferencia P-Bray I – P-Olsen	FDP III (P- Bray I +P- Olsen)/2
Coapexco	0.31	3.8	12	7.3	38	15.1	24.2	1.6	9.1	5.4
Polomas	0.1	1.9	18	3.7	19	19.2	22.8	1.2	3.6	2.4
O1/F5	0.23	3.1	14	6	31	10.6	13.7	1.3	3.1	2.2
Potrero	0.15	3.3	22	6.3	32.7	11.8	39.7	3.4	27.9	15.6
Cañada Amalacaxco	0.24	3.7	15	7.1	36.8	11.7	15.9	1.6	5.7	3.6
La Joya	0.32	4.9	15	9.4	48.7	12.9	17.1	1.3	4.2	2.8

Se encontró que la AFac fue 40% mayor en los suelos de sitios más altos. La actividad de la fosfatasa alcalina, presentó un valor mínimo (0.0009 µg de p-NP g⁻¹) en la Cañada Amalacaxco (ΔpH = 0.96) y el valor máximo (0.0016 µg de p- NP g⁻¹) en Palomas con ΔpH = 0.68 y una media de 0.0011 µg de p-NP g⁻¹. De acuerdo a estos datos la AFal fue 54% mayor en sitios bajos. Una variable de interés en este estudio fue el ΔpH puesto que relaciona en suelos ácidos la influencia de sales disueltas (Mite *et al.*, 2009), teniendo así a los suelos de la zona de estudio como suelos con efectos despreciables de salinidad.

Cuadro 19. Relación de actividad fosfatasa ácida y alcalina respecto a la altitud en un gradiente altitudinal de 2679 a 3858 m s.n.m.

ALTITUD	SITIO	AF ac 0-5 cm AF ac 6-10 cm AF al 6-10 cm		
		µg de p-NP g ⁻¹ h ⁻¹		
2679	Coapexco	0.0006	0.0005	0.001
2983	Palomas	0.0006	0.0006	0.002
3125	O1/F5	0.0018	0.001	0.0008
3399	Potrero	0.001	0.001	0.0006
	Cañada			
3659	Amalacaxco	0.0006	0.0005	0.0009
3858	La Joya	0.0015	0.001	0.0009

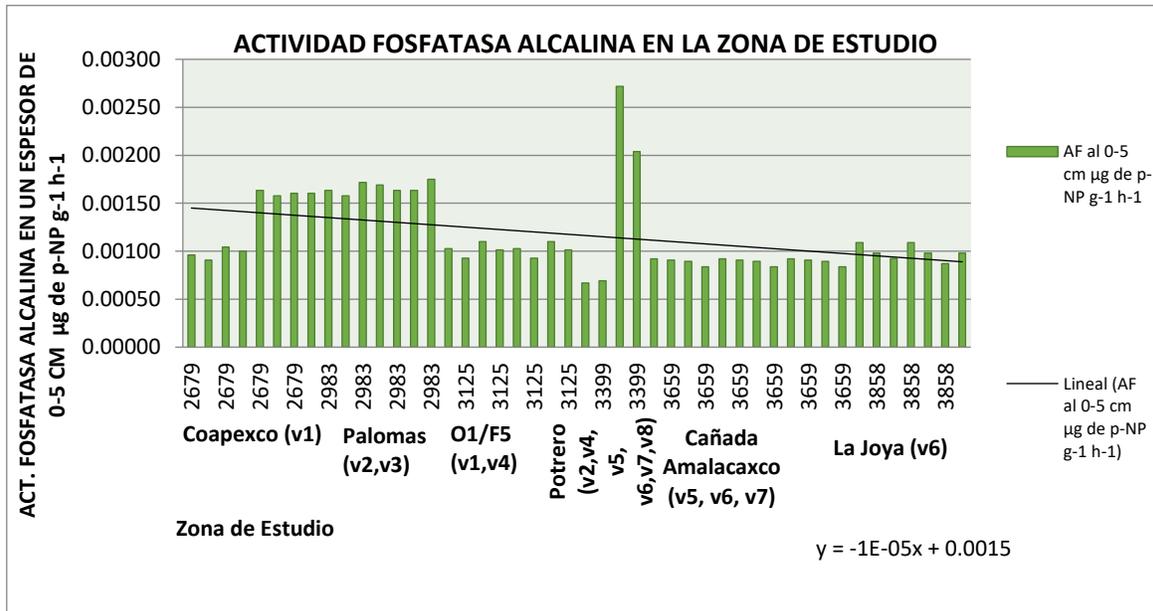


Figura 35. Relación fosfatasa alcalina en la zona de estudio. Donde v1 = *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3 = *Pinus patula*, v4 = *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 = *Pinus hartwegii*, v7 = *Abies religiosa*, v8 = *Cupresus*

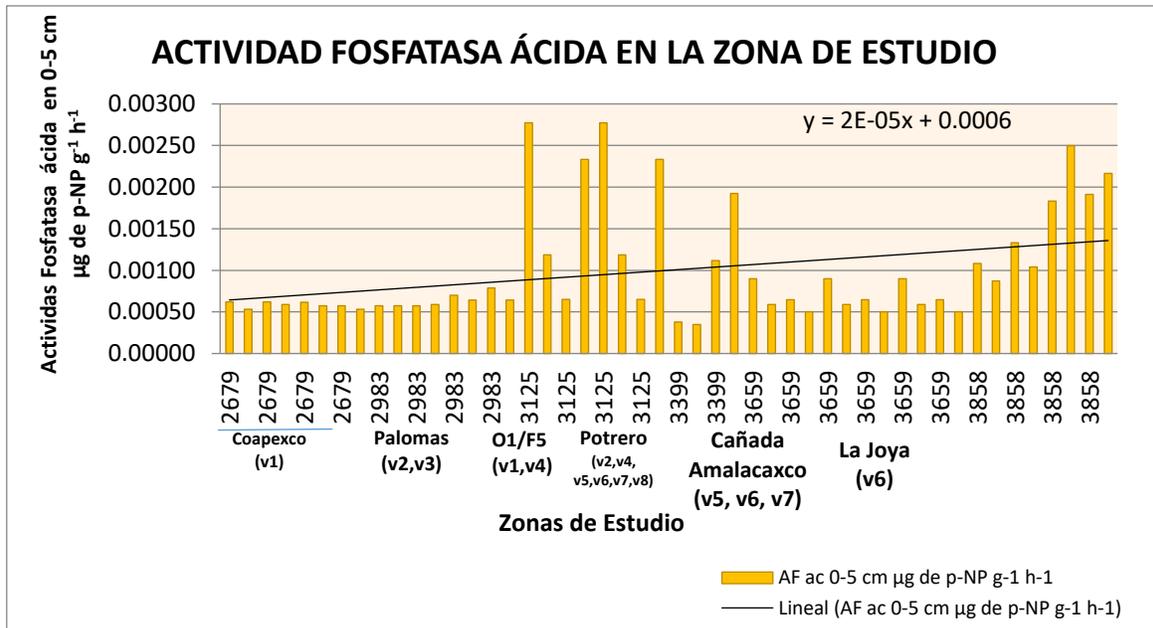


Figura 36. Relación fosfatasa ácida en la zona de estudio. Donde v1= *Pinus pseudostrobus*, v2 = *Pinus montezumae*, v3 = *Pinus patula*, v4 = *Pinus ayacahuite*, v5 = *Pinus teocote*, v6 *Pinus hartwegii*, v7 = *Abies religiosa*, v8 = *Cupressus*

8.5. CORRELACIONES DE PEARSON DE LOS FDPI, FDPII Y FDP III CON PÁRAMETROS DE SUELO:

Para determinar la relación entre los valores de P-disponible por ambos métodos con las propiedades que se determinaron en los suelos, se propusieron tres factores de disponibilidad de P, enunciados a continuación.

Los Factores de Disponibilidad de Fósforo se determinaron de la siguiente manera:

a) Factor de Fósforo Disponible I =

$$FDPI = \frac{(\sum P - Bray1) + (\sum P - Olsen)}{2}$$

b) Factor de Fósforo Disponible II =

$$FDPII = \frac{P - Bray 1}{P - Olsen}$$

c) Factor de Fósforo Disponible III =

$$FDPIII = (P - Bray 1) - (P - Olsen)$$

8.4.1. FACTOR DE FÓSFORO DISPONIBLE I (FPD I)

Del análisis de correlación de Pearson entre el FPD I, contra CE, se encontró una r de 0.65 con alta significancia estadística ($p = 0.001$), lo cual indica que, a mayor CE en estos suelos de bajos valores de esta variable, el FDPI aumenta (figura 37). Interpretado de la siguiente manera:

$$FDP I = (PdB + PdO)/2 \text{ vs } CE \rightarrow R = 0.65$$

Donde PdB = Fósforo extractable por el método Bray I, PdO = Fósforo extractable por el método Olsen, CE : Conductividad Eléctrica

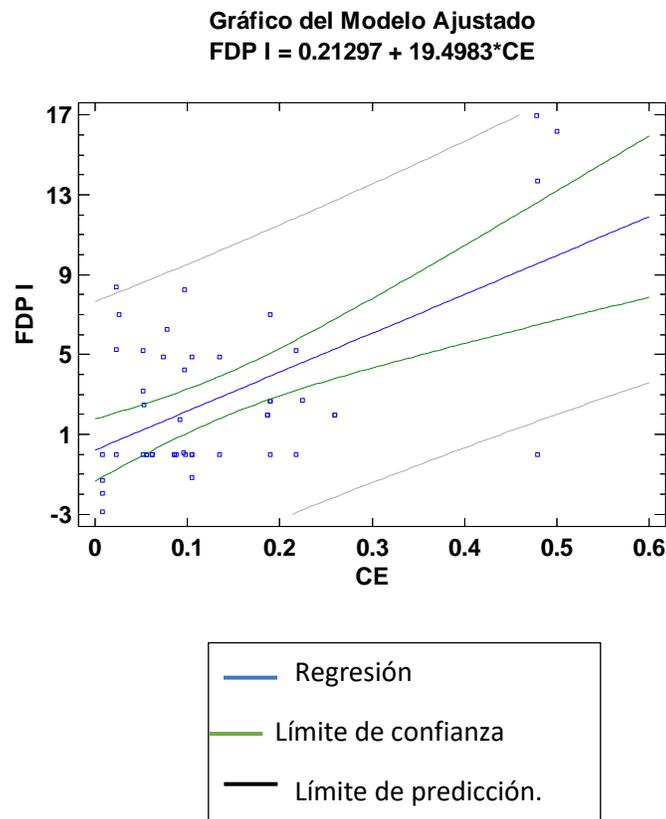


Figura 37. Correlación entre la conductividad eléctrica (CE), y el FDP I

Se encontró una relación positiva entre FDP I y el pH activo (1:2), encontrando una r de 0.47 con alta significancia estadística ($p = 0.007$), lo cual indica que, al aumentar el pH activo en estos suelos considerados como moderadamente ácidos, el FDP I aumenta (figura 38). Interpretado de la siguiente manera:

$$\text{FDPI} = (\text{PdB} + \text{PdO})/2 \text{ vs } \text{pH act} \rightarrow R = 0.47 \text{ (} p \leq 0.05 \text{)}$$

Donde PdB = Fósforo extractable por el método Bray I, PdO = Fósforo extractable por el método Olsen, pHa = pH activo

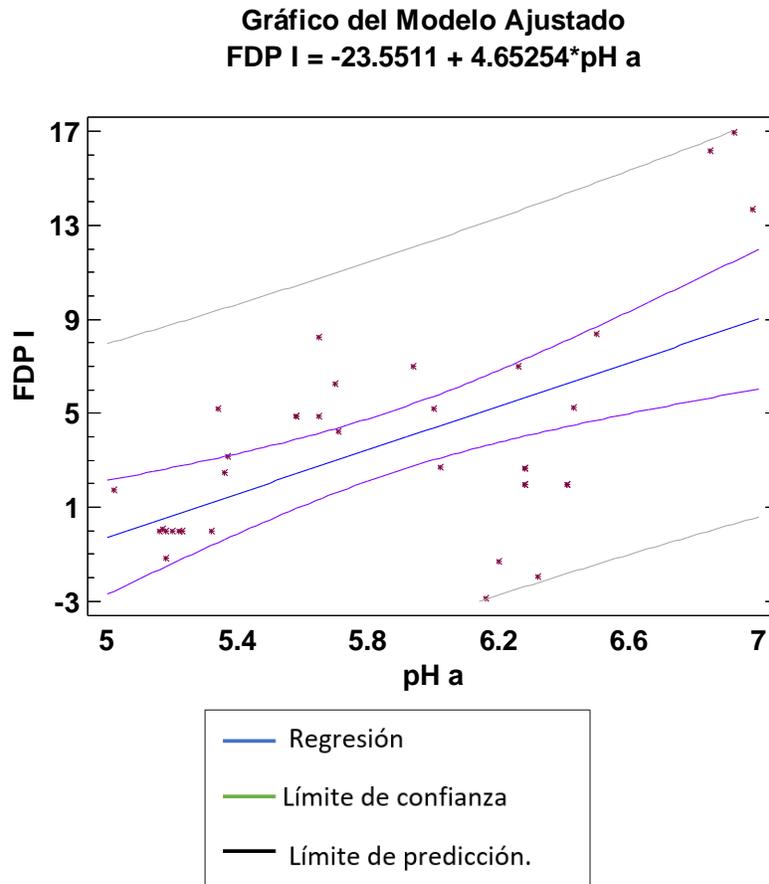


Figura 38. Correlación entre el pH activo (pH a), y el factor de FDP I

Como lo menciona Gupta *et al.*, (1989) se ha demostrado que en los suelos sódicos calcáreos se produce liberación de P la cual se ve estimulada por el nivel de electrólitos, la saturación de Na, el pH y la presencia de alcalinidad, relacionados con CE.

Respecto a la relación entre FPD I y el porcentaje de Humedad, se encontró una $r = -0.40$ con significancia estadística ($p = 0.0248$), esto indica que, al aumentar el porcentaje de Humedad en estos suelos, el FDP I disminuye (figura 39). Interpretado de la siguiente manera:

$$\text{FDP I} = (\text{PdB} + \text{PdO}) / 2 \text{ vs } \% \text{ Humedad} \rightarrow R = -0.40$$

Donde PdB = Fósforo extractable por el método Bray I, PdO = Fósforo extractable por el método Olsen.

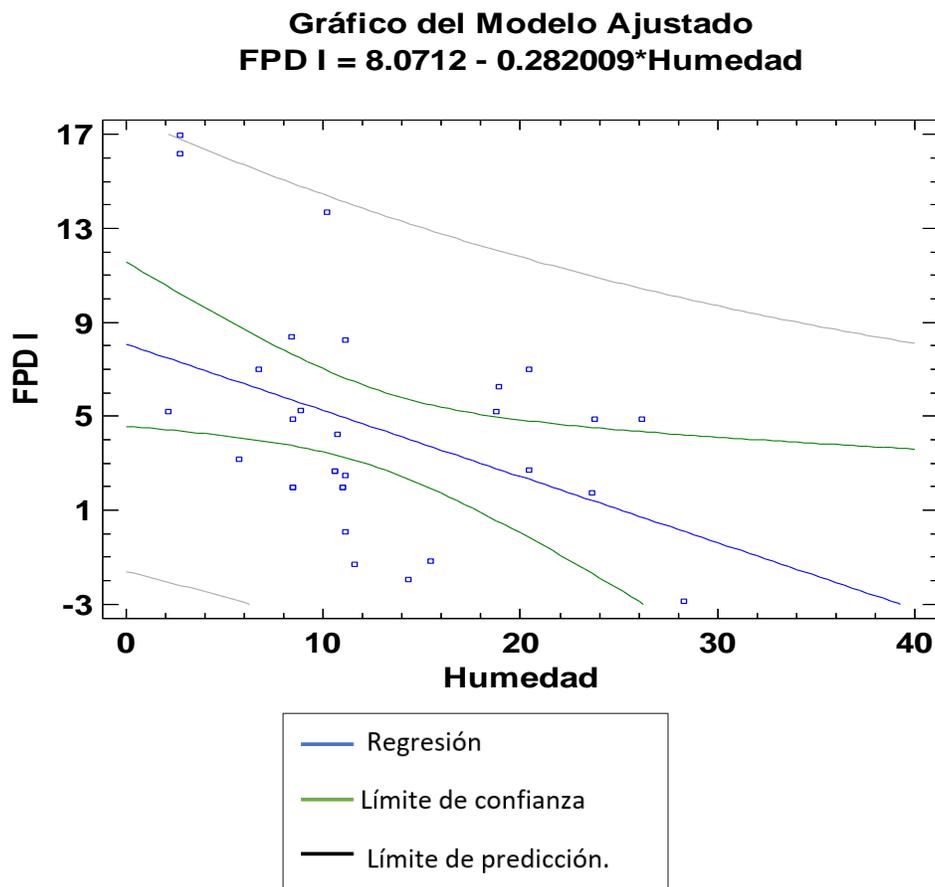


Figura 39. Correlación entre el %Humedad activo y el factor de Fósforo disponible I

Se encontró una relación inversa entre la actividad fosfatasa ácida a 0-5cm (AFAC1) y el FPD I con una r de -0.37 con alta significancia estadística ($p = 0.04$), lo cual indica que, a mayor AFAC1 en estos suelos de la zona, el FDP disminuye (figura 40). Interpretado de la siguiente manera:

$$\text{FDP I} = (\text{PdB} + \text{PdO})/2 \text{ vs AFAC1} \rightarrow R = -0.37$$

Donde PdB = Fósforo extractable por el método Bray I, PdO = Fósforo extractable por el método Olsen, AFAC1 = actividad fosfatasa ácida en 0-5 cm

Esto último sugiere una tendencia a la inhibición de la actividad de la enzima Fosfatasa cuando los contenidos de P disponible en el suelo son muy altos; ello podría ocurrir cerca de la rizósfera (Henriquez *et al*, 2014).

Gráfico del Modelo Ajustado
 $\text{FDP I} = 7.10162 - 2609.25 \cdot \text{AFAC1}$

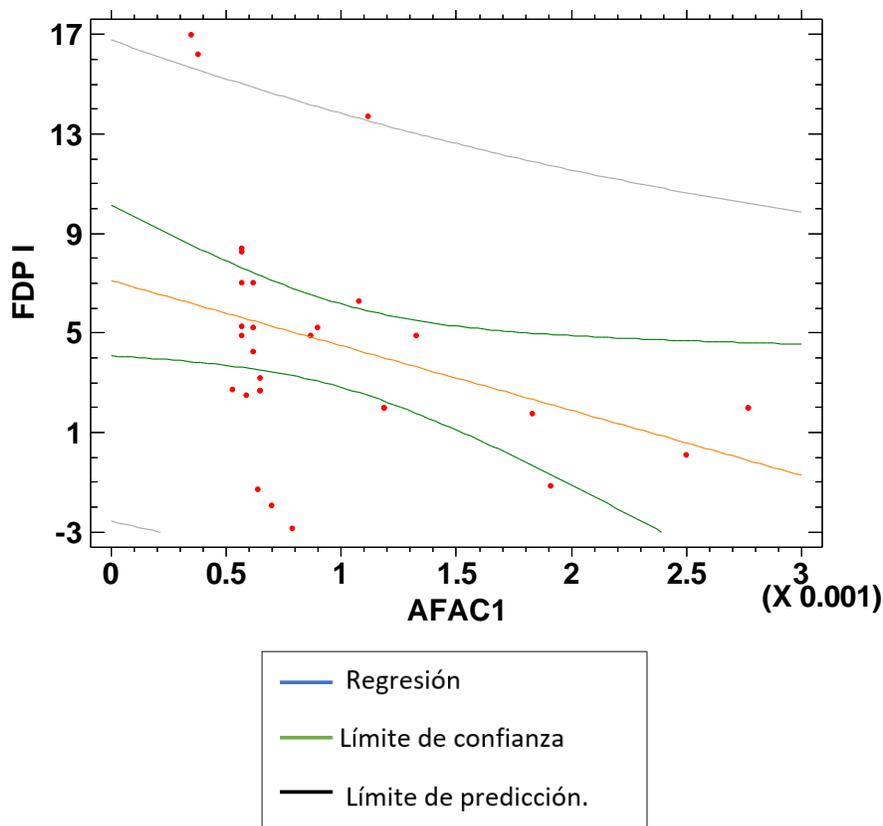


Figura 40. Correlación entre la AFAC 1 y el factor de Fósforo disponible I

8.4.2. FACTOR DE FÓSFORO DISPONIBLE II (FPD II)

Para el análisis de las correlaciones de Pearson en el FPD II, se encontraron correlaciones significativas con las mismas variables CE, pH activo, %Humedad y AFAC 1. Teniendo así a las propiedades CE y pHa como correlaciones positivas significativas con una $r = 0.64$ (significancia $p = 0.001$) y una $r = 0.47$ (significancia de $p = 0.07$), respectivamente donde

ambas propiedades aumentan cuando aumenta el FPD II. En relación con el %Humedad y AFAC 1 se encontraron correlaciones negativas significativas con una $r = -0.40$ (significancia $p = 0.024$) y una $r = -0.37$ (significancia de $p = 0.04$), respectivamente donde si ambas propiedades aumentan el FPD II disminuye (figura 41)

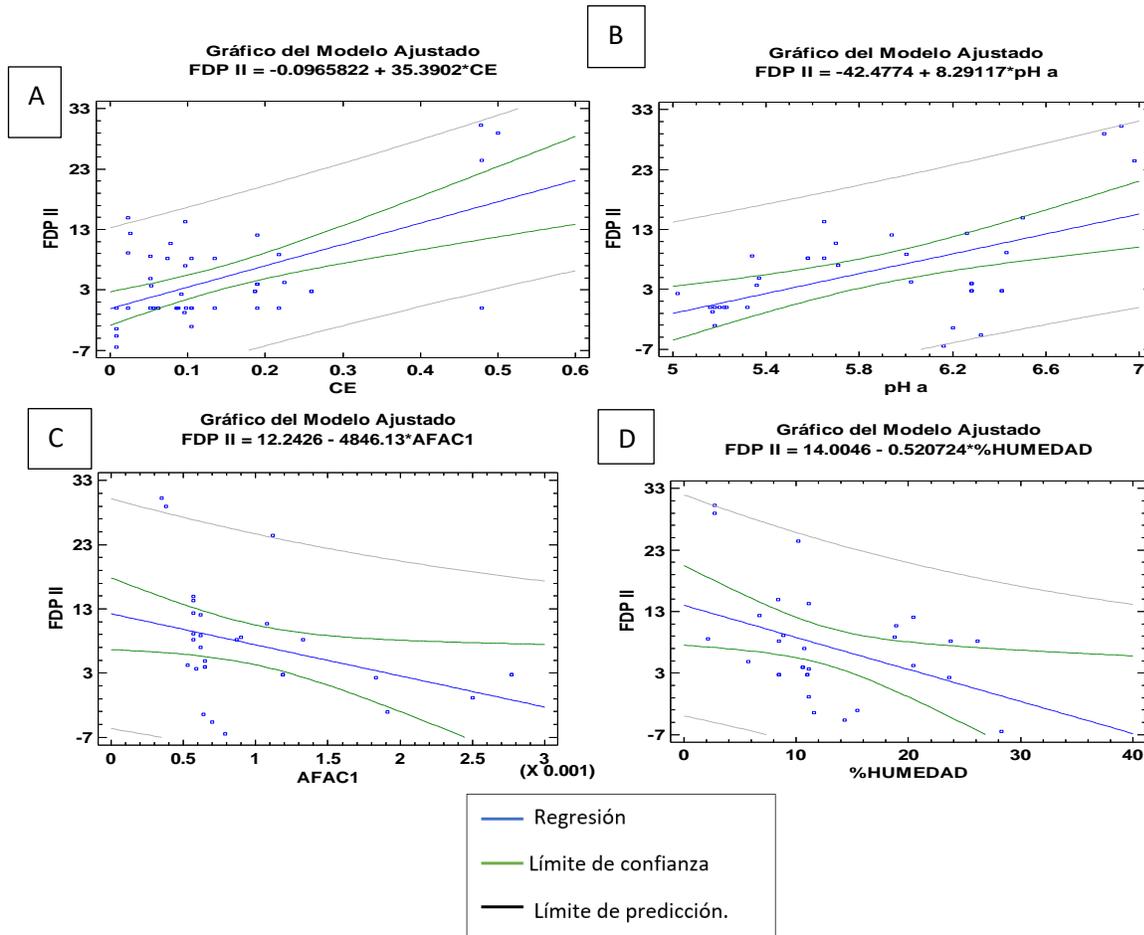


Figura 41: Correlación de FDP II con A= CE: Carga Eléctrica con una ecuación ($FDP II = (PdB - PdO)$ vs CE $R = 0.64$), B = pHa: pHActivo: con una ecuación ($FDP II = (PdB - PdO)$ vs pHa $R = 0.47$), C = AFAC 1 con una ecuación ($FDP II = (PdB - PdO)$ vs AFAC 1 $R = -0.40$) y D= %Humedad con ecuación ($FDP II = (PdB - PdO)$ vs %humedad $R = -0.37$).

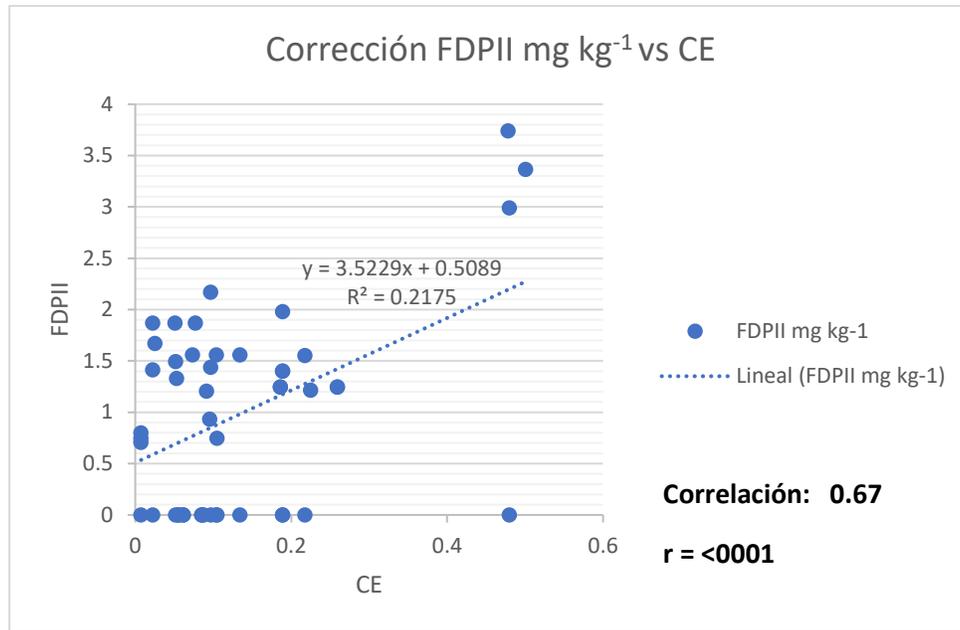


Figura 42. Correlación coeficiente de disponibilidad vs CE

En el gráfico de la figura 42 se observa como la cantidad de sales minerales aumenta conforme aumenta la concentración del cociente de P extractable por ambos métodos (Bray I / Olsen), además la mayor cantidad de P extractable ocurre en el rango de 0.022 a 0.25 dS m⁻¹ en esta situación se encuentra el 80.7 % del total de las muestras.

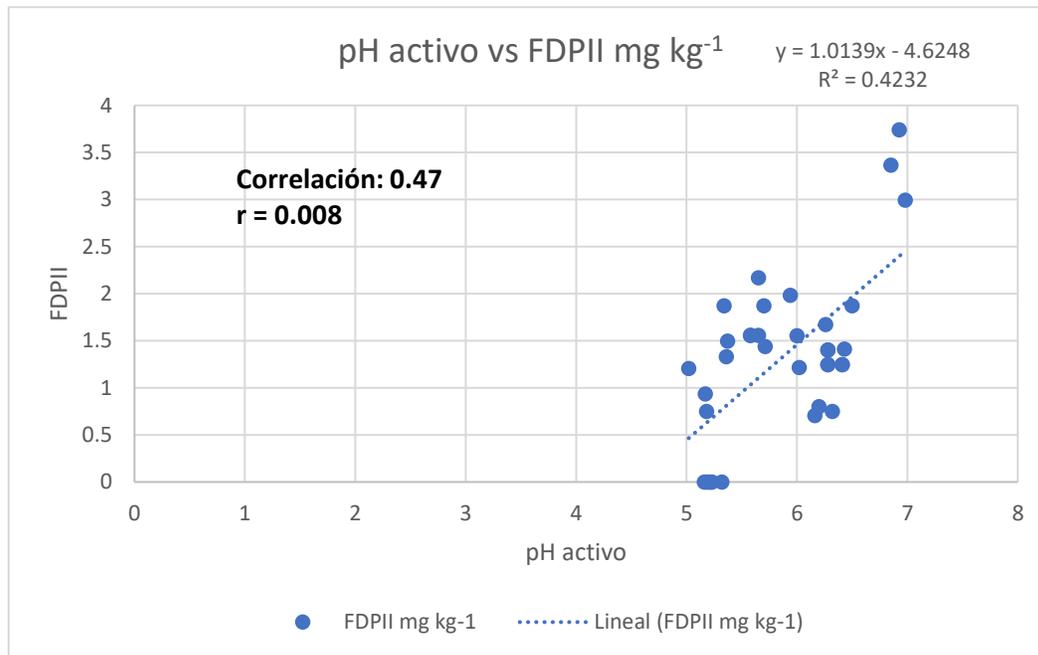


Figura 43. Correlación cociente de disponibilidad vs pH activo

En la figura 43 nos indica que en ambos casos que al aumentar el pH activo aumentará la concentración de P extractable, pero este no tendrá relevancia, ya que su correlación es muy baja.

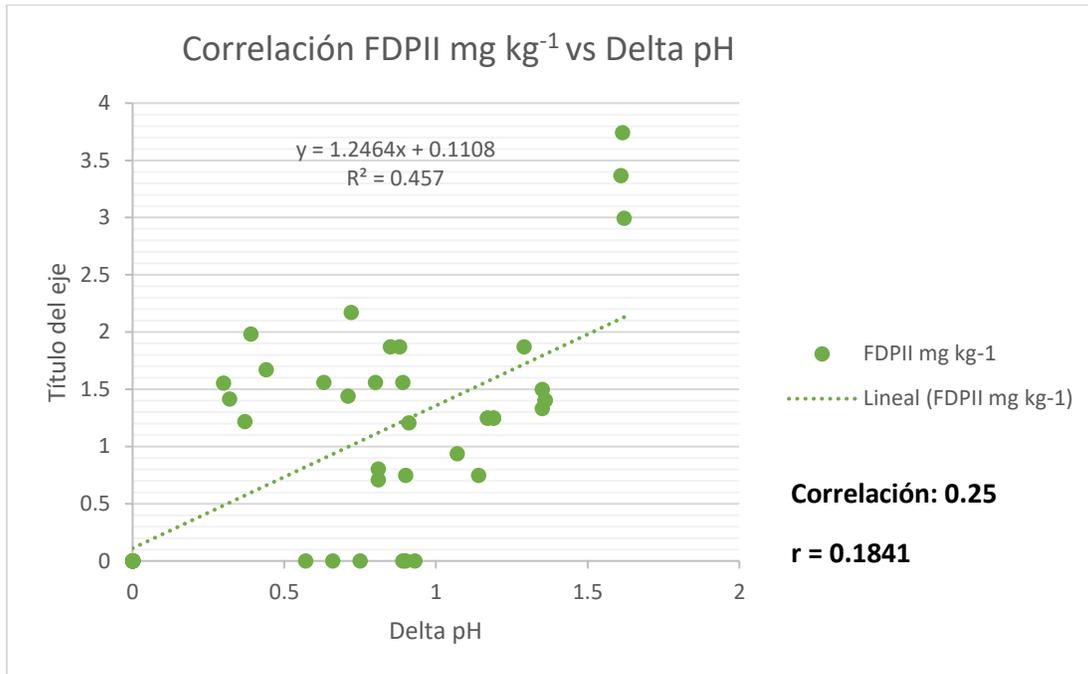


Figura 44. Correlación cociente de disponibilidad vs Delta pH

En el grafico 44 se observa que la mayor cantidad de P extractable se presenta en el intervalo de pH 5 a 6.5, en esta situación se encuentra el 85.18 % del total de las muestras, en el gráfico de la figura 41 la mayor cantidad de P extractable ocurre en el rango de 0.37 a 1.36 ΔpH en esta situación se encuentra el 88.88 % del total de las muestras. no hay una relación aparente entre las variables

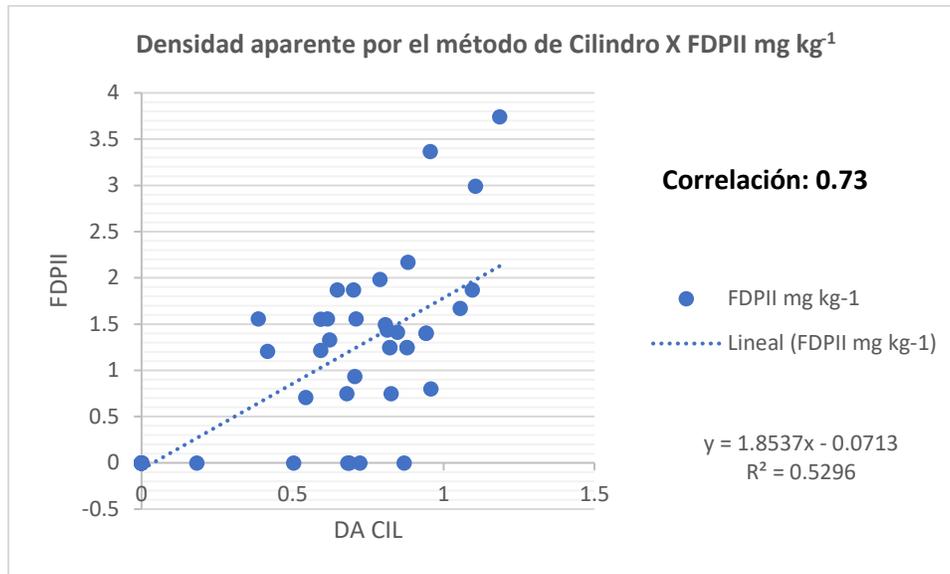


Figura 45. Correlación cociente de disponibilidad vs Densidad por el método del cilindro

En el gráfico de la figura 45, se observa como la densidad del cilindro aumenta conforme aumenta la concentración del cociente de P extractable por ambos métodos (Osen / Bray), además la mayor cantidad de P extractable ocurre en el rango de 0.38 a 1.09 g cm⁻³ en esta situación se encuentra el 88.8 % del total de las muestras, expresando el 66.6% de la varianza, lo que indica que al aumentar la densidad aumentará la concentración de P extractable considerablemente

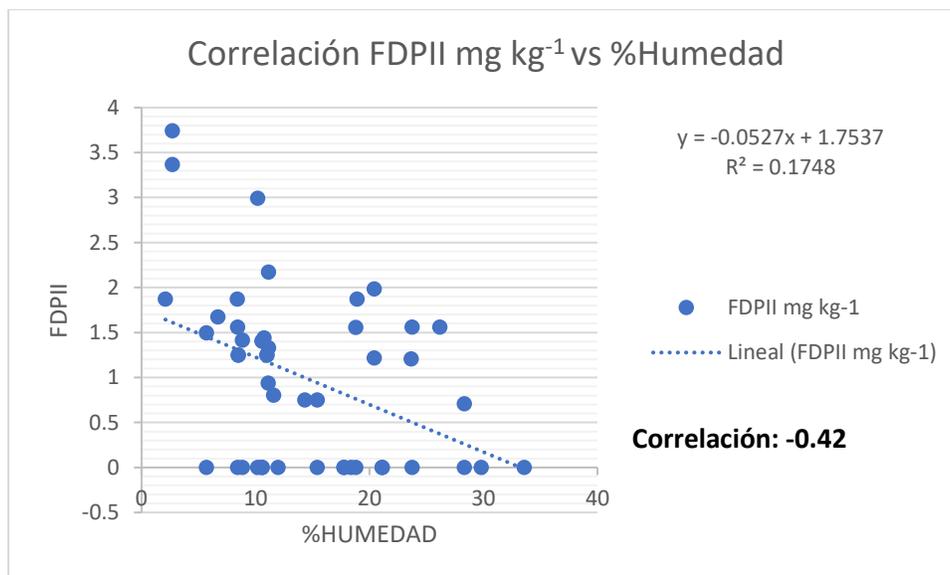


Figura 46. Correlación cociente de disponibilidad vs % Humedad

En la figura 46 se presenta una correlación negativa débil, esto quiere decir que mientras aumente el % de Humedad, el cociente de la concentración de P extractable por ambos métodos disminuye y viceversa. Expresando el 62.96% de la varianza cercana a la línea de tendencia. A pesar de esto no hay una correlación significativa.

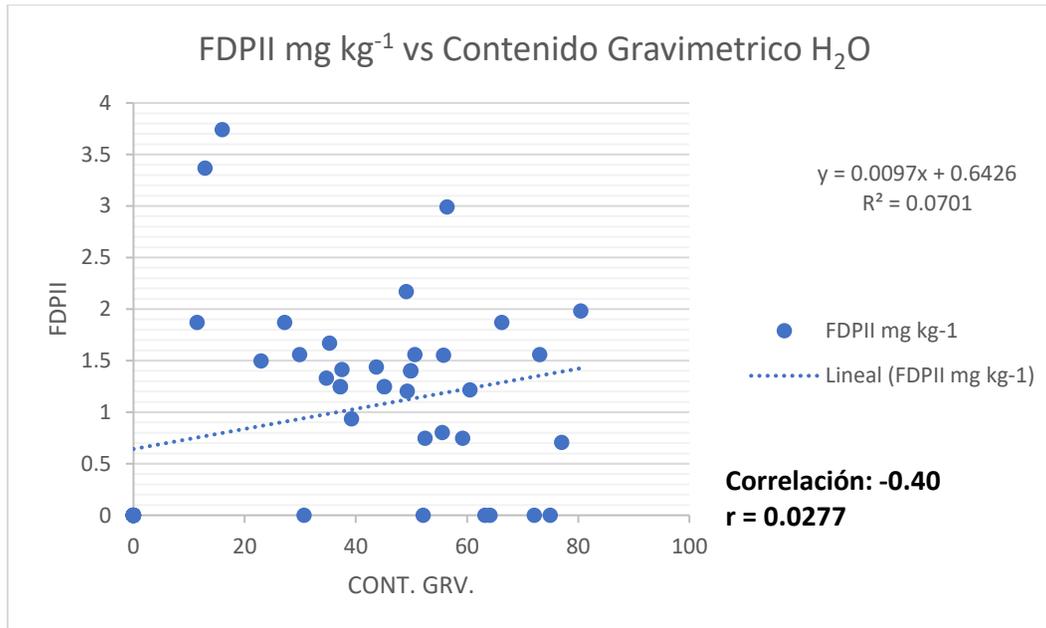


Figura 47. Correlación cociente de disponibilidad vs contenido gravimétrico

Este caso es similar, una correlación negativa débil, expresando el 55.56% de la varianza cercana a la línea de tendencia, también se puede observar que la mayor cantidad de P extractable se encuentra en un rango de 91.89 a 242.25 g kg⁻¹ de contenido gravimétrico del agua en el suelo, lo que nos indica que al aumentar este último disminuye la concentración de fosfatos, pero al ser débil no hay una correlación significativa

8.4.3. FACTOR DE FÓSFORO DISPONIBLE III (FPD III)

Del análisis de correlación de Pearson entre el FPD III, contra CE y pH activo, se encontraron correlaciones significativas como correlaciones positivas significativas con una $r = 0.68$ (significancia $p = 0.0001$) y una $r = 0.48$ (significancia de $p = 0.007$), respectivamente donde ambas propiedades aumentan cuando aumenta el FPD III, interpretado de la siguiente manera:

FDP III = (P-Bray I (P-Olsen) vs CE y pH a

Donde PdB = Fósforo extractable por el método Bray I, PdO = Fósforo extractable por el método Olsen, CE = Conductividad Eléctrica y pH activo = pH activo

Para el análisis de las correlaciones de Pearson en el FPD III, con las demás propiedades se encontró que la relación con %Humedad y la actividad ureasa AU del suelo s 6-10 cm encontraron correlaciones negativas significativas con una $r = -0.40$ (significancia $p = 0.007$) y una $r = -0.54$ (significancia de $p = 0.0023$), Además de encontrar correlaciones significativas con la actividad fosfatasa ácida del suelo con una $r = -0.37$ (significancia de $p = 0.041$).

9. CONCLUSIONES

Los materiales amorfos como alófano, imogolita, ferrihidrita y compuestos alumínico-húmicos, ocasionan una retención de fosfatos de un poco más del 85% y baja saturación de bases.

- En relación a lo anterior de los dos métodos utilizados para extracción de fósforo, se encontró que la extracción con la solución ácida en el método Bray I, extrae mayores cantidades de fósforo que la solución alcalina del método Olsen. No obstante, lo anterior, los resultados muestran que el método Olsen mostró mayor número de correlaciones significativas (18) con otras variables edáficas en estos suelos forestales, en comparación con el metro Bray I (7 correlaciones).
- Olsen se correlación significativamente con la densidad aparente, con el contenido de MOS, de Ac. Húmicos, con el pH activo (pH KCl y el Delta pH, mientras que con la solución de Bray I solo se observó correlación significativa con los pH activo (1:2) y pH potencial (KCl 1:2).
- Debido al alto número de correlación significativa de P Olsen con otras propiedades del suelo, se optó por emplear tres factores de disponibilidad de P (FDP) , de los cuales el FDP I ($(\sum P - BRAY + \sum P - OLSEN)/2$), tuvo mayor relación con

propiedades de interés como CE, pH a, delta pH, % humedad, actividad ureasa, actividad fosfatasa alcalina, P- extractable por la solución Bray I, y carbono microbiano del suelo, por lo cual este facto es el de mayor rendimiento para posteriores análisis de P- disponible en suelo y planta, como nuevo método de análisis.

10. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Acevedo S A, Valera P M A, Prieto G F. (2010) Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlan, Hidalgo, México. Instituto de investigaciones en Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca Hidalgo. México. pp 137-150
- Aguilera H.N. (1989) Tratado de Edafología México Tomo 1. Facultad de Ciencias UNAM. México.
- Alkorta, I., Aizpurua, A., Riga, P., Albizu, I., Amézaga, I., & Garbisu, C. (2003). Soil enzyme activities as biological indicators of soil health. *Reviews on environmental health*, 18(1), 65-73.
- Arnon, Stout (1939). «The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper». *Plant Physiology* 14 (2): 37
- Astudillo- Bravo, Y. (2006). Fosfatasa ácida y alcalina del suelo y su efecto en la disponibilidad del P en suelos de Bosques templados de México. Tesis de Licenciatura (Biología). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México, CDMX.
- Azcón-Bieto J. y Talon M. (2013) Fundamentos de fisiología vegetal. Mc Graw-Hill. Interamericana Segunda Edición. Madrid España. 669 pp
- Baležentienė L. 2012. Hydrolases Related to C and N. Cycles and Soil Fertility Amendment: Responses to Different Management Styles of Agro-Ecosystems. *Pol. J. Environ. Stud.* 21(5):1153-1159.
- Barrientos – Reyna Ma. G. (2015) Cambio de Uso de suelo forestal en México. Su legislación y Gestión. Tesis de Licenciatura. Facultad de Derecho. UNAM.



- Bautusta-Cruz, et. al., (2004) La calidad del suelo y sus indicadores. México: Ecosistemas 13 (2): 90-97.
- Bockheim J.G, (1991). Suelos Forestales.Pp. 119-139. In Young R.A. (ed) Noriega Editores. México
- Brady, Nyle C (1974) The nature properties of soil. 8th. Ed. The Macmillan Co., New York. 639 Pp.
- Buol S., Hole, F. y McKraken. (1991). Génesis y clasificación de suelos. 2a Ed. Editorial Trillas. México, D. F.
- Buol, S. W. (1995). Sostenibilidad del uso del suelo. Revisión anual de ecología y sistemática 26: 25-44.
- Burns, R. G. (1982). Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology. Soil biology and biochemistry, 14(5), 423-427.
- C.O.N.A.B.I.O. (2021). Bosques templados. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado>
- Caldwell, Licenciatura en Letras (2005). Actividades enzimáticas como componente de la biodiversidad del suelo: una revisión. Pedobiología , 49 (6), 637-644.
- Carpa, R. (2009). Enzymological research on soils from different environments. Annals of RSCB, 16(1), 44-48.
- Carrero A., Alejandro, et. al. (2015) Comparación de dos métodos de extracción de fósforo disponible en un suelo ácido Avances en Química, vol. 10, 2015, pp. 29-33.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. En Soil quality for crop production and ecosystem health (eds. Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.11.
- Cepeda-Dovala J.M.(1991) Química de Suelos. Trillas, México.
- Chavarría A.R. (2005) Cuantificación retrospectiva (1993-1999) de la depositacion acida en suelos forestales del Desierto de los Leones, Iztapopo y Zoquiapan, y determinación multielemental aplicando la técnica de pixe. TESIS DE LICENCIATURA. FES ZARAGOZA: UNAM.



- Colli – Cortés 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.
- CONABIO (2021) Bosques templados. Biodiversidad Mexicana. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado>
- Críquet S. (2004). Annual dynamics of phosphatase activities in an evergreen oak litter influence of biotic factors Soil Biology & Biochemistry.
- Críquet, S. (2004). Annual Dynamics of phosphatase activities in an evergreen oak litter influence of biotic and abiotic factors Soil Biology y Biochemistry
- Cruz-Flores G. (2006) Ecología del suelo un enfoque hacia la nutrición mineral de plantas superiores. UNAM. Pag 1-3.
- Dick, WA y Tabatabai, MA (1992). Importancia y usos potenciales de las enzimas del suelo. Ecología microbiana del suelo: aplicaciones en la gestión agrícola y ambiental. , 95-127.
- Dixon, J. (2013). Pedogenesis with Respect to Geomorphology, pp. 27-43. In G. Pope, Treatise on Geomorphology (Vol. 4). Weathering and Soils Geomorphology, Academic Press.
- Donahue R.L, Raymond W. Miller, John C. Shickluna, Jorge Peña C. (1981). Introducción a los suelos a al crecimiento de plantas. Prentice/Hall. Nueva Zelanda.
- Doran, J. W. and Parkin, T. B. (1994). defining and assessing soil quality. In Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek D. F., and Stewart B. A. (Eds). 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Special Publication Number 35.
- Doran, J. W. and Parkin, T. B. (1994). defining and assessing soil quality. In Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek D. F., and Stewart B. A. (Eds). 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Special Publication Number 35.
- Doran, J. W. and T. B. Parkin. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. pp. 3-22. In: J. Doran, Coleman D, Bezdicek D. y Stewart B. (ed.). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment SSSA Special Publication No. 35. Wisconsin, U.S.A
- Etchevers, J. Bautista Cruz, Angélica., Jorge; Castillo, Rafael F. del; Gutiérrez, Carmen. (2000) Calidad del suelo e indicadores de la calidad y captura de carbono. Pp. 507-520. In: R. Quintero -Lizaola, T. Reyna – Trujillo, L. Corlay Chee. A. Ibáñez



- Huerta y N. E. García – Calderón (ed) La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo II. Colegio de Posgraduados, UNAM, UACH. México.
- Etchevers, J. D., M. A. Bautista y M. A. Vergara. 2000. Calidad del suelo, indicadores de calidad y captura de carbono. Pp.507-520. In: R. Quintero - Lizaola, T. Reyna - Trujillo, L. Corlay Chee. A. Ibañez - Huerta y N. E. García - Calderón. (ed.). La Edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo II. Colegio de Postgraduados, UNAM, UACH. México.
 - Fadda Guillermo S. (2017) MORFOLOGÍA DEL SUELO. Catedra de edafología. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán. <https://www.edafologia.org/>
 - FAO (2019) Portal de Suelos. Sitio Web: <http://www.fao.org/soils-portal/es/>
 - FAO (2023) Portal del suelo de la FAO. Recuperado 26 de febrero 2023, de: <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
 - FAO–ISRIC–Isss. (1998). World Reference Base. Rome, Italy.
 - FitzPatrick, E. 1985. Suelos. Su Formación, Clasificación y Distribución. Compañía Editorial Continental. México. 430 pp
 - Flores-Delgadillo L., Alcalá-Martínez J.R. (2010) Manual de procedimientos Analíticos. Física de Suelos. Ciudad de México: UNAM. 56pp
 - Frossard E., L M. Condron, A. Oberson, S Simaj and J. Fardeau. (2000). Processes governing phosphorus availability in temperate soils. J. Enviroment. Qual. 29: 12-53.
 - Fuentes, Y. J. L, (1999). El suelo y los fertilizantes. 5ta edición. Ed. Mundi-prensa. Madrid, España.
 - Führer, E. (2000) Forest funtions, ecosystem stability and management. Forest ecology an management: 132: 29-37.
 - Gajda A., Martyniuk s. 2005. Microbial Biomass C and N and Activity of Enzymes in Soil under Winter Wheat Grown in Different Crop Management Systems. Polish Journal of Environmental Studies 14(2):159-163.
 - Galvis, JH, Amézquita, E. y Madero, E. (2007). Evaluación del efecto de la intensidad de labranza en la formación de costra superficial de un oxisol de sabana en los Llanos Orientales de Colombia. II. Caracterización física en superficie. Acta Agronómica , 56 (4), 191-194.



- García- Hernández Ma. S (2004) Indicador de Calidad del Suelo y Estado Nutricional de *Abies religiosa* (H.B.K) Schl et Cham., en la exposición occidental de los Volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl
- García, H. M. S. (2003). Indicadores de calidad del suelo y estado nutricional de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl, et Cham, en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. FESZaragoza. UNAM.
- Gayoso J, S Gayoso. (2003). Diseño de zonas ribereñas: Requerimientos de un ancho mínimo. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 12 p
- Gisbert, R. A. (2017). La falta de fósforo pone en riesgo la seguridad alimentaria mundial. All you need is Biology. <https://allyouneedisbiology.wordpress.com/2016/11/30/falta-defósforo/>
- Granados-Damián M.R. (2003) Calidad del Suelo y estado nutricional del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. Fes Zaragoza. UNAM
- Granados-Sánchez, D.; Hernández-García, M. Á.; López-Ríos, G. F.I. (2006) Ecología de Zonas Ribereñas. Revista de Chapingo, Vol XII, no. 001. Pp. 57- 69.
- Henríquez, C., Uribe, L., Valenciano, A., & Nogales, R. (2014). Actividad enzimática del suelo-deshidrogenasa, β -glucosidasa, fosfatasa y ureasa-bajo diferentes cultivos. *Agronomía costarricense*, 38(1), 43-54.
- Hernández- Salgado G. O. (2020) Abundancia de bacterias de los géneros *Azospirillum* y *Azotobacter* en suelos ribereños y su relación con sus contenidos de nitrógeno total en un gradiente altitudinal de la Reserva de la Biósfera de los Volcanes. Tesis de Licenciatura. UNAM.
- Holford JCR, 1980. Greenhouse evaluation of four phosphorus soil tests in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. *Soil Sci. Soc. A. J.* 44:55-559.
- Honorato, P. R. (2000) Manual de Edafología. Ed. Alfaomega. 4ª ed. México.
- Hu, Z., Haneklaus, S., Sparovek, G. y Schnug, E. (2006). Elementos de tierras raras en suelos. *Comunicaciones en ciencia del suelo y análisis de plantas*, 37 (9-10), 1381-1420.



- HUERTO COBA (2020) PEDOGÉNESIS sitio web:
<https://www.facebook.com/287912754717757/photos/pb.100064104840574.2207520000.1648529668656052/?type=3>
- Jaramillo-Jaramillo D.F. (2002) Introducción a la ciencia del suelo. Universidad de Colombia. 59 pp.
- Jordán-López Antonio. (2006) Manual de Edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. España: Universidad de Sevilla. 143pp
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society of America J. 61: 4-10. 28.
- Lal, R. "Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation", en: Sustainability. 7, 5. 2015, pp. 5875-5895.
- Lal, R. 1988. Effects of macrofauna on soil properties in tropical ecosystems. Agric. Ecosyst. Environ. 24: 101-116. doi: [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90059-X).
- Larson, W.E. y Pierce, F.J. (1991). Conservación y mejora de la calidad del suelo. En evaluación para tierras sostenibles
- López Camelo LG. 1989. Indices de sorción de fósforo y su relación con algunas propiedades de los suelos. Ciencia del Suelo 7: 43-50
- López López Alma B. (2014) Influencia del relieve sobre las propiedades del suelo en una catena en laderas de montaña del parque Nacional Izta-Popo. TESIS DE MAESTRIA. UNAM.
- Martínez Mialma, Sergio Alejandro. (2012). "Actividad enzimática de suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/304869>
- Martínez, M. M., López, C. P. T., Toledo, Á. M., López, J. A. T., Colín, M. D. R. C., Morales, F. R. R., & Díaz, M. D. C. C. (2012). Técnicas para el análisis de actividad enzimática en suelos. Métodos ecotoxicológicos para la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos, 19-46.



- Mendoza RE. 1989. Different performances of soil phosphate tests for reflecting the effects of buffering capacity on uptake of native phosphate with time. *Plant and Soil* 113: 13- 19
- MIRAT. <http://www.mirat.net/fertilizantes/nutricion/macronutrientes/fosforo.htm>
- Nahas, E. (2002). Microorganismos do solo produtores de fosfatases em diferentes sistemas agrícolas. *Bragantia*, Campinas 61: 267-275.
- Narváez, N. (2001) Determinación de la sintomatología visual y producción de biomasa ante la carencia de N, P, K, Ca, Mg y S en el cultivo de maíz. Tesis de Licenciatura. UNAM.
- Naseby, DC, Moënné-Loccoz, Y., Powell, J., O'Gara, F. y Lynch, JM (1998). Actividades de las enzimas del suelo en la rizosfera de remolacha azucarera cultivada en el campo inoculada con el agente de biocontrol *Pseudomonas fluorescens* F113. *Biología y fertilidad de los suelos*, 27 , 39-43.
- Noinville, S., Revault, M., Quiquampoix, H. y Baron, MH (2004). Efectos estructurales del secado y la rehidratación de enzimas en suelos: un análisis cinético-FTIR de α -quimotripsina adsorbida en montmorillonita. *Revista de ciencia de coloides e interfaces*, 273 (2), 414-425.n
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y Nutrición vegetal*, 1(4), 1-4.
- Páez Osuna, Federico., Ramírez Reséndiz, Germán., Ruiz Fernández, Ana Carolina., Soto Jiménez, Martín Federico. (2007). La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa: flujos, fuentes, efectos y opciones de manejo. Serie Lagunas Costeras de Sinaloa. Primera edición. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. Mazatlán, México.
- Pieri, C. J., A. Dumanski, A. Hamblin y A. Young (1995) *Land Quality Indicators*. World Bank Discussion Paper 315, 80 p
- Pieri, C. J., A. Dumanski, A. Hamblin y A. Young (1995) *Land Quality Indicators*. World Bank Discussion Paper 315, 80 p
- Porta Casanellas, Jaime, Lopez-Acevedo Reguerin, Marta, Poch Claret, Rosa M. (2019) *EDAFOLOGÍA uso y protección de suelo*. 4ª Ed. Ediciones Mundi-Presa. España. 625 pp.



<https://books.google.es/books?hl=es&lr&id=SZ3BDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=formacion+del+suelo&ots=3KNHxugjbh&sig=gDYiJaPQmIGv7HnXo4TN4mUisO0&pli=1#v=onepage&q&f=false>

- Pritchett W. (1992) Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa, México.
- PROFEPA- LGEEPA (2016) LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE. SITIO: <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-del-equilibrio-ecologico-y-la-proteccion-al-ambiente-63043>
- Resh, M. H. 1992. Cultivos hidropónicos; nuevas técnicas de producción. 3ª. Edición. Editorial Mundi-Prensa, España, 369 p.
- Richardson, AE. (2001). Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Aust J Plant Physiology* 28: 897-907
- Rodríguez – Juárez Y. (2018) Estudio comparativo de los índices de acidez en el suelo forestal del PN Izta- Popo en el periodo 1993-2016. Tesis de Licenciatura. FES ZARAGOZA.UNAM
- Romig D., Garlynd M.J., Harris R, F., y Kevin McSweeney (1995) how farmers assess soil health and quality. *Journal of Soil and Water Conservation* 50(3): 229-236.
- Ron MM, Bussetti SG, Loewy T. 1995. Uso de un índice de sorción como complemento del fósforo extraíble para la fertilización del trigo. *Ciencia del Suelo* 13: 35-37.
- Ron MM, Loewy T. 1990. Fertilización fosfórica del trigo en el sudoeste bonaerense. I. Modelos de la respuesta. *Ciencia del Suelo*, 8(2): 187-194.
- S. Fadda Guillermo (2017). GUÍA DE ESTUDIO DE MORFOLOGÍA DEL SUELO. Cátedra de Edafología. Argentina: Universidad Nacional de Tucumán. 15pp
- Šantrůčková, H., Pícek, T., Tykva, R., Šimek, M. y Pavlů, B. (2004). Partición a corto plazo de 14 C-[U]-glucosa en el conjunto microbiano del suelo en distintos estados de aireación. *Biología y fertilidad de los suelos* , 40 , 386-392.
- Sanyal, SK & SK De Datta. (1991). Soil organic phosphorus. *Adv Soil Sci* 16: 72-89.



- Sanzano Agustin (2019). LOS FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO. Cátedra de Edafología. Argentina: Universidad Nacional de Tucumán. 15pp
- Sanzano, G. A., Corbella, R. D., García, J. R., & Fadda, G. S. (2005). Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ciencia del suelo*, 23(1), 93-100.
- Schlatter J, R Grez, V Gerding. (2003). Manual para el reconocimiento de suelos. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 114 p.
- Schlatter JE (1993). Fertilidad del suelo, conceptos y su aplicación en la actividad forestal. Charlas y Conferencias, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. p. 76-86.
- Schlatter JE, V Gerding, H Huber. (1995). Sistema de ordenamiento de la tierra. Herramienta para la planificación forestal aplicado a la X Región. Serie Técnica, Fac. Ciencias Forestales, Univ. Austral de Chile, Valdivia, 110
- Schlatter JE, V Gerding, J Adiazola. (1994). Sistema de ordenamiento de la tierra. Herramienta para la planificación forestal, aplicada a las regiones VII, VII y IX. Serie Técnica, Fac. Cienc. Forestales, Univ. Austral de Chile, Valdivia, 114 pp.
- Schlatter JE. (1993). Fertilidad del suelo, conceptos y su aplicación en la actividad forestal. Charlas y Conferencias 8, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. p. 76-86.
- SEGOB- DOF (1997) NORMA Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los lí-mites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997#gsc.tab=0
- SEGOB- DOF (2004) Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes (Continúa en la Segunda Sección). Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=664977&fecha=01/10/2004#gsc.tab=0



- SEGOB- DOF (2005) NORMA Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=791052&fecha=29/03/2005#gsc.tab=0
- SEMARNAT (2012) SUELOS. México. 121 Pp. Disponible: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf
- Seybold, C.A., M.J. Mausbach, D.L. Karlen y H.H. Rogers, 1997. Quantification of soil quality. pp. 387-404. In: Rattan, L., J.M. Kimble, R. F. Follett. B.A. Stewart. (ed.). Soil processes and the carbon cycle. CRC. U.S.A.
- Seybold, CA, Mausbach, MJ, Karlen, DL y Rogers. (1998). Quantification of soil quality. Pp. 387-404, In: Rattan, L., et. al. Soil processes and the carbón cycle. CRC. U.S.A.
- Siebe, C., S. Cram. 2015. Suelo y salud: un tema poco atendido que nos incumbe a todos. CONABIO. Biodiversitas, 122:1-5
- Singer M.J y Munns D.N (1999). Introducción a los Suelos. 4ta Edición. Prentice Hall, Inc. Reino Unido.
- Soil Science Society of America (2017) Soils Overview. Soil! Get the Inside Scoop book. <https://www.soils.org/search?searchQuery=2017&op=>
- Spurr S. (1982) Ecología Forestal, Agt. Editors. México. DF.
- Sumner, M.E. 2000. Handbook of Soil Sciencie. Ed. CRC prees. USA.
- Tabatabai M., (1994) Soil enzymes. In: Weavwe R.W. et. al., Pp 775-834. Methods of soil analysis. Part. 2. Microbial and Biochemical propiedades. Soil Sci of Am.USA.
- Tabatabai, M. (1994). Soil enzymes. In: Weavwe R. W., J. S. Angle and P. S. Bottomley, d. Besdizek, S. Smith, A Tabatabai, A. Wollum (ed). Pp 775-834. Methods of soil análisis. Part 2. Microbial and Biochemical propiedades. Soil Sci Of Am. USA
- Tabatabai, M. (1994). Soil enzymes. In: Weavwe R. W., J. S. Angle and P. S. Bottomley, d. Besdizek, S. Smith, A Tabatabai, A. Wollum (ed). Pp 775-834. Methods of soil análisis. Part 2. Microbial and Biochemical propiedades. Soil Sci Of Am. USA



- Targulian, V. y Krasilnikov, P. (2007). Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time Scales, and environmental significance. CATENA (71), 373-381.
- Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2021). Los suelos y su fertilidad. Reverté.
- TRASAR G., GIL-SOTRES F., LEIROS M. 2003. Determinación de la actividad fosfatasa del suelo, pp 52-76. In: C. García, F. Gil, T. Hernández y C. Trasar (eds.). Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos. Mundi-Prensa. Madrid
- Truscher H., Adler R., Seaton J. P., Vera r. (1987) EL SUELO Y SU FERTIIDAD. Ed. Continental. México.510 pp.
- Valásquez, E.P. Lavelle y M. Andrade. (2007) GISQ, a multifuncional indicator of soil quality. Elsevier-Soil Biology and Biochesmistry. No.39. 3066-3080 Pp.
- Valderrábano-Gómez J.M. (2013) Calidad del suelo forestal y su distribución esencial en bosques de coníferas del Parque Nacional Izta- Popo. Tesis de Maestría. Instituto de Geología- Fes Zaragoza. UNAM
- Vargas-Rodríguez (2021) Influencia del material parental y la topografía en el grado de expresión de las propiedades vérticas en los suelos de la cuenca del Rio Lerma. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geología, UNAM
- Zapata-Hernández R.D. (2002) Química de los procesos pedogenéticos. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20083>
- Zavala-Munguía B. (1993). Influencia del P en la actividad fosfatasa de raíz entre variedades de trigo (*Triticum aestivum*) y triticale (X *Triticosecale* Wittmack). Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza. México, D.F.

11. ANEXOS

Anexo 1. Tipos de Suelos en PN-IP

Tipo de Suelo

Características.



<i>Litosols.</i>	Suelos someros, con menos de 0.1 metros de espesor, formados sobre tepetates y que conservan las características del material parental, generalmente poco desarrollados.
<i>Regosols.</i>	Del griego <i>rhegos</i> , 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.
<i>Andosols.</i>	Del japonés <i>an</i> , oscuro y <i>do</i> , suelo. Se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes, así como con un alto contenido de materia orgánica; y la proporción de vidrios volcánicos presentes, pueden formar andosols húmicos que se presentan en áreas forestales poco alteradas; también pueden formar andosols vítricos en zonas con vegetación de coníferas cuando presentan más del 60 por ciento de vidrios, ceniza volcánica y texturas gruesas.
<i>Cambisols</i>	Del latín <i>cambiare</i> , 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.
<i>Fluvisols.</i>	Del latín <i>fluvius</i> , 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.

Anexo 2: FÓSFORO EXTRACTABLE (BRAYI, BRAY Y KURTZ)

7.1.11. La determinación del fósforo extraíble en suelos neutros y ácidos se realizará a través del método AS-11, por el procedimiento de Bray y Kurtz 1.

Principio y aplicación

Este método, es ampliamente utilizado en estudios de fertilidad de suelos para la determinación de fósforo disponible en suelos ácidos. El fósforo determinado con este procedimiento ha mostrado una estrecha relación con la respuesta de los cultivos. La solución extractora de P consiste de una combinación de HCl y NH_4F la cual remueve formas de P ácido solubles como los fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro. El NH_4F disuelve los fosfatos de aluminio y de hierro al formar un ion complejo con estos iones metálicos en solución ácida.

Reactivos

1. Solución de fluoruro de amonio 1 N. Disolver 37 g de NH_4F en agua destilada y diluir hasta un litro. Conservar esta solución en botella de polietileno.
2. Acido clorhídrico 0.5 N. Diluir 20.4 ml de HCl concentrado hasta 500 ml con agua destilada.
3. Solución extractora Bray-kurtz 1. Mezclar 30 ml de la solución de fluoruro de amonio 1 N con 50 ml de la solución de ácido clorhídrico 0.5 N y diluir a un litro con agua destilada. La solución resultante es 0.03 N en NH_4F y 0.025 N en HCl y es estable por más de un año si se conserva en frasco de polietileno.
4. Solución de tartrato de antimonio y potasio al 0.5%. Pese 0.5 g de $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, transféralo a un matraz volumétrico de 100 ml disuélvalo y afore con agua destilada.
5. Solución de molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$. Disolver 20 g de molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ en 300 ml de agua destilada. Agregue lentamente bajo constante agitación y con cuidado, 450 ml de H_2SO_4 (14 N) (194.4 ml H_2SO_4) concentrado diluido a 500 ml con agua da una concentración de aproximadamente 14 N. Agregue 100 ml de una solución al 0.5% (p/v) de tartrato de antimonio y potasio. Diluya las mezclas a 1 litro con agua destilada. Este frasco se debe mantener tapado y con papel aluminio y protegido de la luz.
6. Solución reductora con ácido ascórbico. Disolver 0.50 g de ácido ascórbico con un poco de solución patrón de molibdato de amonio y aforar a 100 ml con la misma solución. Esta solución es preparada cada vez que se vaya a formar color.
7. Solución patrón de 200 mg L^{-1} de P. Disolver 0.8786 g de fosfato dihidrógeno de potasio (KH_2PO_4), seco al horno, en agua y diluirla a un litro. Esta solución contiene 200 mg L^{-1} y debe guardarse refrigerada en frasco de plástico o de vidrio blando (no Pyrex) para evitar contaminación con arsénico. Algunos autores recomiendan agregar antes de enrasar 25 ml de H_2SO_4 7 N, lo cual ayudará a su conservación indefinida.
8. Solución patrón de 10 mg L^{-1} de P. Diluir 10 ml (medidos con bureta) de la solución de 200 mg L^{-1} P en 200 ml con agua destilada.

Material y equipo

1. Tubos de polietileno de 50 ml.
2. Papel Whatman No. 42.
3. Balanza analítica.
4. Espectrofotómetro para hacer lecturas a 880 nm y celdas.



5. Agitador mecánico recíproco ajustado a 180 oscilaciones por minuto.
6. Bureta de 10 ml.
7. Matraces volumétricos de 50 ml.

Procedimiento

1. Pesar 2.5 g de suelo previamente tamizado por malla de 2 mm y colocarlo en un tubo de polietileno de 50 ml.
2. Adicionar 25 ml de la solución extractora taparlo.
3. Agitar la suspensión en agitador de acción recíproca regulado a 180 oscilaciones por minuto, por 5 min.
4. El extracto se filtra a través de papel Whatman No. 42 u otro de calidad similar. Debe recordarse que algunos papeles filtro pueden contener cantidades altas de fósforo.
5. Tomar una alícuota de 2 a 40 ml del extracto, dependiendo de la concentración de P en solución (alícuotas de 5 a 10 ml son en general adecuadas para suelos bajos y medios en P) y colocarla en un matraz aforado de 50 ml.
6. Adicionar agua hasta completar aproximadamente 40 ml. Si es que se usa una alícuota inferior a este volumen.
7. Agregar 5 ml de la solución reductora, agitar y completar a volumen.
8. Esperar 30 minutos y leer la intensidad de la absorción de luz a 882 nm (nanómetros).
9. Preparar blancos siguiendo el mismo procedimiento que en las muestras.
10. Preparar una curva de calibración que contenga puntos correspondientes a 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 y 5 mg L⁻¹ de P. Para ello colocar en matraces aforados de 50 ml 0, 5, 10, 15, 20 y 25 ml de la solución de 10 mg L⁻¹ de P y proseguir en la forma descrita para las muestras.
11. Adicionar un volumen de solución extractante igual a la alícuota empleada para medir en las muestras conocidas.
12. Llevar a aproximadamente 40 ml con agua y adicionar 5 ml de la solución reductora, agitar y completar a volumen.
13. Esperar 30 minutos y leer la intensidad de la absorción de luz a 862 nm (nanómetros).

Cálculos

$$P \text{ (mg Kg}^{-1} \text{ de suelo)} = CC \times Vf/A \times Vi/p$$

Donde:

CC= mg L⁻¹ de P en la solución. Se obtiene graficando la curva de calibración (absorbancia contra mg L⁻¹) e interpolando en la misma los valores de absorbancia de las muestras analizadas a las cuales previamente se les ha restado el valor promedio de los blancos o por medio de una regresión simple.

Vf= volumen final de la solución colorimétrica, ml.

A= alícuota del extracto usado colorimetría, ml.

Vi= volumen de la solución empleada para hacer el extracto, ml.

p= peso de la muestra seca al aire.

Informe de la prueba

Los resultados del contenido de P disponible en el suelo se reportan en miligramos por kilogramo de suelo (mg Kg⁻¹). Se recomienda el uso de una cifra decimal. Adjunto al resultado debe hacerse referencia al método empleado.



Informe de la prueba

Los resultados del contenido de P disponible en el suelo se reportan en miligramos por kilogramo de suelo (mg Kg^{-1}). Se recomienda el uso de una cifra decimal. Adjunto al resultado debe hacerse referencia al método empleado.

Interpretación de resultados de Fósforo Bray y Kurtz 1

Los resultados de los análisis de suelos pueden ser interpretados de manera aproximada con el siguiente cuadro.

Clase	Mg Kg^{-1} de P
Bajo	< 15
Medio	15 - 30
Alto	> 30

Es necesario considerar que para cada condición climática y cultivo existe un nivel diferente de aprovechamiento del fósforo del suelo. Por lo que, si se conocen los criterios de interpretación para algún suelo y cultivo determinado, éstos se reportarán junto con el resultado del análisis.

Anexo 3: FÓSFORO EXTRACTABLE (OLSEN)

7.1.10. La determinación del fósforo aprovechable para suelos neutros y alcalinos se realizará a través del método AS-10, por el procedimiento de Olsen y colaboradores.

Principio y aplicación

Este método, es ampliamente utilizado en estudios de fertilidad de suelos para la determinación de fósforo disponible tanto en suelos neutros como alcalinos. El fósforo determinado con este procedimiento ha mostrado una estrecha relación con la respuesta de los cultivos. El fósforo es extraído del suelo con una solución de NaHCO_3 0.5 M ajustada a un pH de 8.5. En suelos neutros, calcáreos o alcalinos, conteniendo fosfatos de calcio, este extractante disminuye la concentración de Ca en solución a través de una precipitación del CaCO_3 , por tanto la concentración de P en solución se incrementa. En suelos ácidos conteniendo fosfatos de Al y Fe tales como la variscita y estregita, la concentración de P en solución, se incrementa conforme el pH se eleva. Este extractante evita que se presenten reacciones secundarias en suelos ácidos y calcáreos debido a que el nivel de Al, Ca y Fe se mantiene muy bajo en dicha solución.

Reactivos

1. Hidróxido de sodio 1M. Disolver 4 g de NaOH en 100 ml de agua.
2. Bicarbonato de sodio (NaHCO_3) 0.5 M. Disolver 42 g de NaHCO_3 en aproximadamente 1 litro de agua. Ajustar el pH de esta solución a 8.5 mediante la adición de solución de NaOH 1 M. Llevar a volumen con agua destilada. Algunos autores recomiendan adicionar aceite mineral para evitar la exposición de la solución al aire. Guardar la solución en un recipiente de polietileno y revisar el pH de la solución antes de usarse, de requerirse, volver a ajustar a 8.5.
3. Solución de tartrato de antimonio y potasio al 0.5%. Pese 0.5 g de $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, transféralo a un matraz volumétrico de 100 ml disuélvalo y afore con agua destilada.
4. Solución de molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$. Disolver 20 g de molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ en 300 ml de agua destilada. Agregue lentamente bajo constante agitación y con cuidado, 450 ml de H_2SO_4 (14 N) (194.4 ml H_2SO_4 concentrado diluido a 500 ml con agua da una concentración de aproximadamente 14 N). Agregue 100 ml de una solución al 0.5% (p/v) de tartrato de antimonio y potasio. Diluya las mezclas a 1 L con agua destilada. Este frasco se debe tapar y con papel aluminio, proteger de la luz.
5. Solución reductora con ácido ascórbico. Disolver 0.50 g de ácido ascórbico con un poco de solución de molibdato de amonio y aforar a 100 ml con la misma solución. Esta solución es preparada cada vez que se vaya a formar color.



6. Solución patrón de fósforo (200 mg L^{-1}). Pesar exactamente 0.8786 g de fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4) seco al horno a 105°C , disolver en agua y aforar a 1 litro . Guardar en envase de plástico o vidrio y conservar en refrigeración. Algunos autores recomiendan adicionar 25 ml de H_2SO_4 7 N antes de aforar para conservar la solución libre de contaminantes biológicos.
7. Solución patrón de 5 mg L^{-1} de P Diluir 5 ml de la solución de 200 mg L^{-1} de P a 200 ml con agua destilada. Preparar fresca cada 5 días .

Material y equipo

1. Tubos de polietileno de 100 ml .
2. Papel Whatman No. 42 o equivalente.
3. Agitador mecánico recíproco, ajustado a 180 oscilaciones por minuto.
4. Balanza analítica.
5. Matraces volumétricos de 50 ml .
6. Bureta de 10 ml .
7. Espectrofotómetro para leer a 880 nm y celdas de vidrio.

Procedimiento

1. Pesar 2.5 g de suelo previamente tamizado por malla de 2 mm y colocarlos en los tubos de polietileno.
2. Adicionar 50 ml de la solución extractora tapar y agitar la suspensión en agitador de acción recíproca durante 30 min. a 180 oscilaciones por minuto.
3. Filtrar inmediatamente a través de papel filtro Whatman No. 42 u otro de calidad similar.
4. Preparar blancos a partir de alícuotas de solución extractora y adicionando todos los reactivos como en las muestras.
5. Tomar una alícuota de 5 ml (o 10 ml si la concentración de P es muy baja) del filtrado y colocarla en un matraz aforado de 50 ml .
6. Agregar 5.0 ml de la solución reductora, agitar y aforar. Leer después de 30 min. pero antes de una hora a una longitud de onda 882 nm (leer previamente la curva de calibración).
7. Preparar una curva de calibración con patrones de $0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ y 1.0 mg L^{-1} de P.
8. Pipetear $0, 1, 2, 4, 6$ y 10 ml de una solución de 5 mg L^{-1} de P a matraces aforados de 50 ml .
9. Adicionar un volumen de solución extractante de NaHCO_3 0.5 M igual a la alícuota empleada para medir en las muestras desconocidas.
10. Llevar a aproximadamente 40 ml con agua y adicionar 5 ml de la solución reductora con ácido ascórbico, aforar.
11. Agitar nuevamente. Leer después de 30 minutos pero antes de una hora a 882 nm , leer las muestras y los patrones al mismo tiempo de reacción, contando el tiempo desde que se agrega el reactivo que genera el complejo hasta el momento de la lectura.



Cálculos

$$P \text{ (mg Kg}^{-1} \text{ de suelo)} = CC \times Vi/p \times Vf/a$$

Donde:

CC= mg L⁻¹ de P en la solución. Se obtiene graficando la curva de calibración (absorbancia contra mg L⁻¹) e interpolando en la misma los valores de absorbancia de las muestras analizadas a las cuales previamente se les ha estado el valor promedio de los blancos o por medio de una regresión simple.

Vi= volumen de la solución extractora adicionada.

p= peso de la muestra de suelo seca al aire.

Vf= volumen final de la solución colorimétrica a leer.

a= alícuota de la muestra empleada para la cuantificación.

Informe de la prueba

Los resultados se expresan en mg Kg⁻¹. Se deberá expresar mediante el uso de una cifra decimal. Adjunto al resultado debe especificarse el método empleado.

Comentarios

Se usarán recipientes de plástico para almacenar la solución extractante. En caso de utilizar vidrio, esta solución deberá prepararse cada mes.

Interpretación de resultados Fósforo Olsen

Los resultados de los análisis pueden interpretarse de forma aproximada con el siguiente cuadro.

Clase	mg Kg ⁻¹ de P
Bajo	< 5.5
Medio	5.5 – 11
Alto	> 11

Debe recordarse que para cada condición climática y cultivo se genera un nivel diferente de aprovechamiento del fósforo del suelo. Si se conocen los criterios de interpretación para algún suelo y cultivo determinado, éstos se reportarán junto con el resultado del análisis.

	dSm1	pHact	pHKCl	Delta pH	cgagkg1	PorCOS	COSk hg1	COTt	rCN	PorM OS	AU6_10	AAS0_5	AAS6_10	SULFB RAY	SULF OLSE	SULFA GUA	AFac0_5	AFalc 0_5	AFalc 6_10	P_Bray	FP1m gkg	FP2m gkg	FP3m gkg	CO2S F10	CBM10	ACHUM
P_O LSE N	-	0.2	0.6	-	0.21	-	-	-	-	-	-	0.4	0.3	-	-	0.55	-	0.4	0.7	0.2	-	-	-	0.5	0.4	-
	0.3	288	211	0.6	800	0.3	0.3	0.4	0.0	0.3	0.3	388	230	0.3	0.11	991	0.2	401	461	302	0.2	0.1	0.1	0.05	333	0.7
	424	3	2	309	0.20	015	015	231	080	017	618	0	6	853	692	0.00	919	9	5	1	782	788	865	7	8	781
	1	0.1	<.0	1	15	2	2	4	1	5	9	0.0	0.0	5	0.49	04	4	0.0	<.0	0.2	5	8	3	0.0	0.0	5
	0.0	795	001	<.0	36	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	074	546	0.0	71	36	0.0	092	001	210	0.1	0.3	0.3	048	167	<.0
	409	36	36	001	36	739	739	101	630	737	301	36	36	203	36	36	840	34	36	30	365	442	237	30	30	001
	36			36		36	36	36	36	36	36			36			36				30	30	30			36
P_B ray	0.5	0.5	0.5	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.2	0.1	-	-	0.28	-	0.2	0.02	1.0	0.8	0.9	0.9	-	-	-
	070	434	180	0.03	0.26	0.20	0.20	0.02	626	0.20	794	119	761	0.30	0.4	890	0.5	688	906	000	542	162	130	0.26	0.29	0.4
	6	4	7	584	840	776	776	797	6	773	5	9	2	108	211	0.12	032	6	0.87	0	0	6	3	046	124	503
	0.0	0.0	0.0	0.85	0.15	0.27	0.27	0.88	0.3	0.27	0.0	0.2	0.3	0.10	5	15	0	0.1	88		<.0	<.0	<.0	0.18	0.14	6
	042	019	034	09	15	06	06	33	905	07	386	608	519	59	0.0	30	0.0	665	30	30	001	001	001	95	05	0.0
	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	205	30	046	28	30	30	30	30	30	27	27	125
FP1 mgk g	0.7	0.4	0.1	0.3	-	-	-	0.20	0.1	-	0.5	-	-	-	-	-	-	0.0	-	0.8	1.0	0.9	0.9	-	-	-
	281	755	795	810	0.4	0.08	0.08	721	962	0.08	471	0.0	0.0	0.04	0.4	0.05	0.35	426	0.3	542	000	781	812	0.5	0.4	0.02
	0	5	0	0	042	064	064	0.27	0	047	4	368	120	692	202	091	293	0	639	0	0	7	8	249	983	324
	<.0	0.0	0.3	0.0	7	0.67	0.67	19	0.2	0.67	0.0	2	9	0.80	0	0.78	0.05	0.8	2	<.0	<.0	<.0	9	5	0.90	
	001	079	426	378	0.0	19	19	30	987	25	018	0.8	0.9	55	0.0	93	57	296	0.0	001	30	001	001	0.0	0.0	30
30	30	30	30	267	30	30		30	30	30	468	495	30	208	30	30	28	480	30	30	30	30	049	082	30	
FP2 mgk g	0.6	0.4	0.2	0.24	-	-	-	0.16	0.1	-	0.5	0.0	0.0	-	-	0.05	-	0.1	-	0.9	0.9	1.0	0.9	-	-	-
	725	746	662	923	0.4	0.08	0.08	336	721	0.08	338	327	459	0.13	0.3	960	0.3	166	0.27	162	781	000	998	0.4	0.4	0.12
	2	7	0	0.18	018	574	574	0.38	0	562	1	1	1	392	550	0.75	748	9	527	6	7	0	8	523	569	613
	<.0	0.0	0.1	41	7	0.65	0.65	84	0.3	0.65	0.0	0.8	0.8	0.48	1	44	4	0.5	0.14	<.0	<.0	<.0	4	4	0.50	
	001	080	551	30	0.0	24	24	30	631	28	024	638	096	05	0.0	30	0.0	543	09	001	001	30	001	0.0	0.0	66
30	30	30		277	30	30		30	30	30	30	30	30	542	30	413	28	30	30	30	30	30	178	166	30	
				30										30		30							27	27		



	dSm1	pHact	pHKC l	Delta pH	cgagk g1	PorCO S	COSk hg1	COTt	rCN	PorM OS	AU6_ 10	AAS0 _5	AAS6 _10	SULFB RAY	SULF OLSE	SULFA GUA	AFac0 _5	AFalc 0_5	AFalc 6_10	P_Bra y	FP1m gkg	FP2m gkg	FP3m gkg	CO2S F10	CBM1 0	ACHU M
FP3 mgk g	0.6	0.4	0.2	0.25	-	-	-	0.16	0.1	-	0.5	0.0	0.0	-	-	0.05	-	0.1	-	0.9	0.9	0.9	1.0	-	-	-
	776	754	601	940	0.4	0.08	0.08	693	742	0.08	355	276	416	0.12	0.3	144	0.3	114	0.28	130	812	998	000	0.4	0.4	0.11
	5	8	8	0.16	024	547	547	0.37	1	535	5	2	9	761	604	0.78	739	0	235	3	8	8	0	584	606	872
	<.0	0.0	0.1	63	8	0.65	0.65	79	0.3	0.65	0.0	0.8	0.8	0.50	7	72	3	0.5	0.13	<.0	<.0	<.0		9	9	0.53
	001	079	650	30	0.0	34	34	30	572	38	023	848	269	16	0.0	30	0.0	725	06	001	001	001	30	0.0	0.0	21
	30	30	30		275	30	30		30	30	30	30	30		504		418	28	30	30	30		162	156	30	
					30										30		30						27	27		

Anexo 4. Correlaciones significativas de los tres FDP



El equipo dinamita Angelito y yo



Mi amigo y querido Doctor Gerardo



Arriba = Mi primera Salida a Campo, Abajo = La ultima Salida

