



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**INSTITUTO DE CIENCIAS**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**



*"La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra"*

**CALIDAD DE SUELOS Y SERVICIOS AMBIENTALES EN EL PARQUE NACIONAL  
IZTACCIHUATL POPOCATÉPETL**

**TESIS**

Que para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta

**YASELDA CHAVARIN PINEDA**

Director de tesis:  
Dr. Miguel Ángel Valera Pérez



Octubre 2021



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**INSTITUTO DE CIENCIAS**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**



*“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”*

**CALIDAD DE SUELOS Y SERVICIOS AMBIENTALES EN EL PARQUE NACIONAL  
IZTACCIHUATL POPOCATÉPETL**

TESIS

Que para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta

**YASELDA CHAVARIN PINEDA**

Comité tutorial:

Director	Dr. Miguel Ángel Valera Pérez
Co-director	Dr. Gerardo Cruz Flores
Integrante Comité Tutorial	Dra. Gladys Linares Fleites
Integrante Comité Tutorial	Dra. María Lilia Cedillo Ramírez
Integrante Comité Tutorial	Dr. Eduardo Torres Ramírez

Octubre 2021

*Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de este trabajo de investigación (No. Apoyo 480806).*

*A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por permitirme formar parte de esta gran institución.*

*Al Posgrado en Ciencias Ambientales por su importante contribución a mi desarrollo profesional.*

*Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del Programa IV. Investigación y Posgrado. Apoyar a los programas de posgrado para lograr su incorporación al Padrón Nacional de Calidad. Indicador establecido en el Plan de Desarrollo Institucional 2017-2021.*

*Este proyecto forma parte de las actividades de la RED DE INVESTIGADORES DEL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL, registrada ante el CONACYT y la CONANP.*

Agradecimientos:

Mi profundo agradecimiento al Dr. Miguel Ángel Valera Pérez por ser un amigo y mentor, por guiarme en la elaboración de esta tesis.

Mi gratitud a todos los miembros de mi comité tutorial, Dr. Gerardo Cruz Flores, Dra. Lilia Cedillo Ramírez, Dra. Gladys Linares Fleites, por ayudarme a mejorar este trabajo.

Agradezco especialmente al Dr. Eduardo Torres Ramírez quien me apoyó y para alcanzar los objetivos del posgrado.

Esta tesis está dedicada a:

Eduardo Canek mi esposo y mejor amigo, porque todos los días me motivas a ser mejor y a creer en mí. Tu amor ha cambiado mi vida.

A mis padres Lucy y Alfredo, quienes lo han dado todo por mí. Su amor incondicional y apoyo me han traído hasta aquí.

A mi hermano Alfredo, mis hermanas Yeyi y Yanet, porque ustedes llenan mi vida de risas y amor.

A mis amigas Diana y Flor porque su amistad me ha ayudado a ser mejor persona.

A mi suegra Ivette por quererme como a una hija y por festejar cada pequeño logro conmigo.

A mi perrito Andosol que se recostó a mis pies para hacerme compañía mientras trabajaba en esta tesis.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo al Dr. Edgardo Torres Trejo y su familia, porque el doctor siempre me apoyó y alentó a hacer mis sueños realidad. Tu muerte dejó un vacío profundo en mucha gente, descansa en paz.

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	CALIDAD DE SUELO Y SUSTENTABILIDAD. ....	1
1.2	EL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL POPOCATÉPETL Y LA CALIDAD DE SUELO. ....	2
<b>2.</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>4.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	4
4.2	OBJETIVOS PARTICULARES.....	4
<b>5.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>6.</b>	<b>HIPÓTESIS.....</b>	<b>5</b>
<b>7.</b>	<b>MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....</b>	<b>6</b>
7.1	SERVICIOS AMBIENTALES .....	6
7.2	ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS .....	8
7.3	IMPORTANCIA DEL SUELO.....	10
7.4	DEGRADACIÓN DEL RECURSO SUELO .....	13
7.5	CALIDAD DEL SUELO.....	14
7.6	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO.....	16
7.7	ÍNDICES DE CALIDAD DE SUELO .....	23
<b>8.</b>	<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>25</b>
8.1	ESTUDIOS SOBRE CALIDAD DE SUELO EN ZONAS FORESTALES Y AGRÍCOLAS...25	
8.2	PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL.....28	
8.3	CONOCIMIENTO LOCAL Y PERCEPCIÓN AMBIENTAL.....35	
<b>9.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
9.1	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	38
	<i>Cambio de uso de suelo.....</i>	<i>39</i>
	<i>Determinación de las condiciones climatológicas dentro del Parque Nacional.....</i>	<i>40</i>
	<i>Evapotranspiración potencial.....</i>	<i>41</i>
	<i>Diseño de muestreo de suelos.....</i>	<i>43</i>
	<i>Prospección edáfica y muestreo de suelos para análisis en laboratorio y selección de suelos de referencia.....</i>	<i>46</i>

	<i>Determinación de propiedades físicas, químicas y de las denominadas como Ándicas</i> .....	46
9.2	CONSTRUCCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD O SALUD DEL SUELO.....	47
	<i>Contribución del suelo a los servicios ecosistémicos en el PINP</i> .....	50
9.3	PERCEPCIÓN AMBIENTAL .....	54
	<i>Identificación de los actores sociales</i> .....	54
	<i>Beneficios que el suelo trae a la comunidad</i> .....	54
	<i>Entrevista semiestructurada</i> .....	55
	<i>Sistema de puntuación para la Salud del suelo</i> .....	55
<b>10.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>57</b>
10.1	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	58
	<i>VEGETACIÓN Y CAMBIO DE USO DE SUELO</i> .....	58
	<i>Determinación de la temperatura y precipitación media en la zona de estudio</i> .....	62
	<i>Determinación de los regímenes de humedad y temperatura de los suelos</i> .....	65
	<i>Tipos de suelos dominantes en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl</i> .....	70
10.2	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SUELOS .....	74
	<i>RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE SUELO</i> .....	75
	<i>Color del suelo, índice melánico</i> .....	77
	<i>Carbono orgánico del suelo</i> .....	79
	<i>Nitrógeno total y relación C/N edáfica de las sustancias húmicas</i> .....	80
	<i>pH del suelo</i> .....	81
	<i>Iones Intercambiables, CIC y % Saturación en bases</i> .....	82
	<i>Cálculo del índice de Calidad de suelo (ICS)</i> .....	82
	<i>Funciones del suelo</i> .....	89
10.3	PERCEPCIÓN AMBIENTAL .....	92
	<i>Conocimiento del sitio</i> .....	93
	<i>Beneficios que perciben del ecosistema</i> .....	96
	<i>Problemas que detectan en la zona</i> .....	100
	<i>Soluciones o necesidades para mejorar el entorno natural</i> .....	101
	<i>Sistema de puntuación de la salud del suelo</i> .....	105
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>112</b>

11.1 REFLEXIÓN FINAL.....	115
<b>12. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>116</b>
<b>13. ANEXOS .....</b>	<b>135</b>
13.1 CUESTIONARIO SOBRE PERCEPCIÓN AMBIENTAL DENTRO DEL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL.....	135
13.2 CUESTIONARIO SOBRE SALUD DEL SUELO.....	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pérdida de servicios ambientales a partir del deterioro del bosque y sus efectos en el tiempo.....	8
Figura 2. Interrelaciones entre las prácticas de manejo, calidad del suelo, productividad, funciones ambientales y salud humana .....	15
Figura 3. Diagrama de flujo de los pasos involucrados en una evaluación de calidad de suelo.....	19
Figura 4. Conceptualización de las diferencias de la calidad inherente del suelo entre dos suelos.....	20
Figura 5. Problemáticas ambientales en el PNIP.....	29
Figura 6. Mapa de zonificación de acuerdo con el ordenamiento del plan de manejo .....	34
Figura 7. Mapa de sitios de muestreo dentro de las zonas estudiadas. ....	44
Figura 8. Muestreo de mantillo.....	45
Figura 9. Muestreo de suelo .....	46
Figura 10. Instrumentos de medición utilizados para evaluar la percepción ambiental de los actores principales. ....	55
Figura 11. Mapa de ubicación del PNIP .....	58
Figura 123. Mapas de vegetación dentro del PNIP (1992-2017).....	60
Figura 13. Mapa de cambio de uso de suelo (1992-2017) .....	61
Figura 14. Correlación entre la temperatura y las elevaciones dentro del PNIP. ....	62
Figura 15. Mapa de Isotermas del PNIP.....	63
Figura 16. Mapa de precipitaciones dentro del PNIP.....	64
Figura 17. Regímenes de humedad.....	66
Figura 18. Mapa de Evapotranspiración anual del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. ....	67
Figura 19. Climograma complementario de la estación climatológica Río Frío Ixtapaluca. ....	69
Figura 20. Distribución de las unidades de suelo dentro del PNIP de acuerdo con INEGI, 2014.....	71

Figura 21. Mapa de tipos de suelos .....	73
Figura 22. a) Subzona de recuperación en bosque de pino y pastizal. ....	74
Figura 23 a) Índice melánico en suelos de la subzona de recuperación del PNIP .....	79
Figura 24. Matriz de correlación de las propiedades del suelo altamente ponderadas en el ACP. ....	85
Figura 25. Comparación de los valores de calidad del suelo calculado para las diferentes zonas de manejo	87
Figura 26. Matriz de correlación para los diferentes ICS calculados. ....	88
Figura 27. Funciones del suelo evaluadas por zona de manejo.. ....	89
Figura 28. Fotografías algunas de las personas entrevistadas. Fotografías propias .....	92
Figura 29. Tipo de plantas, hongos y árboles mencionada por los participantes. ....	94
Figura 30. Animales mencionados por los entrevistados.....	95
Figura 31. Frecuencia de los servicios ecosistémicos mencionados por los entrevistados. ....	98
Figura 32. Servicios ecosistémicos detectados por los entrevistados y su relación con los componentes del bienestar.....	99
Figura 33. Historial del presupuesto asignado por SEMARNAT a la CONANP del año 2001 al 2020. ....	103
Figura 34. Frecuencia de respuestas de los entrevistados con respecto a la evaluación de las propiedades del suelo dentro del índice de salud del suelo. ....	106
Figura 35. Frecuencia de respuestas de los entrevistados con respecto a la evaluación de las propiedades de vegetación, salud animal y agua dentro del índice de salud del suelo. ....	107
Figura 36. Evaluación de la salud del suelo. ....	108
Figura 37. Sistema de la calidad del suelo forestal y sus servicios ambientales dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. ....	111

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de servicios ambientales que las sociedades humanas reciben de los ecosistemas y ejemplos representativos de cada uno de ellos.....	7
Cuadro 2. Resumen de los beneficios del suelo.....	12
Cuadro 3. Indicadores físicos, químicos y biológicos para evaluar la calidad del suelo .....	17
Cuadro 4. Lista de propiedades clave del suelo relacionadas con los servicios de los ecosistemas .....	22
Cuadro 5. Normas Oficiales Mexicanas Aplicables a las actividades a que está sujeto el Parque Nacional. .	30
Cuadro 6. Cartas topográficas utilizadas para elaborar el MDE.....	39
Cuadro 7. Estaciones utilizadas para los cálculos climatológicos.....	40
Cuadro 8. Contribución de los suelos a los servicios ecosistémicos .....	51

Cuadro 9. Categorías para la evaluación de la salud del suelo. ....	57
Cuadro 10. Superficie de cambio del año 1992 al 2017. ....	59
Cuadro 11. Temperatura media en el PNIP. ....	63
Cuadro 12. Precipitación anual en el PNIP. ....	65
Cuadro 13. Fórmulas del clima calculada y régimen de humedad de suelo por estación meteorológica. ....	69
Cuadro 14. Unidades de suelo dentro del PNIP. ....	71
Cuadro 15. Coordenadas de los sitios de muestreo y vegetación. ....	75
Cuadro 16. Valores medios y desviaciones estándar de los parámetros evaluados en los suelos del PNIP por subzona de manejo. ....	76
Cuadro 17. Valores de carbono orgánico del suelo en las zonas estudiadas. ....	80
Cuadro 18. Propiedades del suelo utilizadas para el cálculo del índice de calidad y para el cálculo de las funciones del suelo. ....	83
Cuadro 19. Análisis de componentes principales. ....	84
Cuadro 20. Indicadores seleccionados para conformar el ICS, curva de funciones de puntuación y parámetros de pesos no lineales y lineales para los indicadores en el CMD. ....	86
Cuadro 21. Valores de ICS calculados por medio del ACP. ....	87
Cuadro 22. Contenido de Carbono orgánico del suelo por subzona de estudio. ....	91
Cuadro 23. Clasificación de los servicios ecosistémicos. ....	96
Cuadro 24. Actividades que sugirieron los entrevistados para mejorar la condición del Parque. ....	101
Cuadro 25. Resultados de la calificación de la salud del suelo por cada uno de los participantes. ....	108

## **RESUMEN**

*En este trabajo se evaluó la calidad del suelo en diferentes subzonas de manejo dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, para lo cual se calcularon distintos índices de calidad de suelo. El contenido de nitrógeno, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de K intercambiable fueron las variables más importantes para realizar el cálculo de los distintos índices de calidad. La zona que mostró mejor calidad de suelo fue la subzona de preservación en bosque de pino, seguido de la zona de influencia en bosque de pino y por último las zonas de recuperación tanto en bosque de pino como en la zona con pastizal. Los índices de calidad más adecuados para la evaluación de calidad de suelo fueron los obtenidos por medio de las ecuaciones lineales tanto por el método aditivo como el ponderado.*

*Se evaluaron ciertas funciones del suelo vinculadas a los servicios ecosistémicos, las cuales fueron la capacidad de soportar la biodiversidad, el almacén de carbono y la función de amortiguamiento. La capacidad de proveer estas funciones fue más adecuada en aquellas zonas con mayor contenido de carbono, menor densidad aparente y en donde las actividades humanas son más restringidas.*

*La percepción ambiental de la población también fue otro aspecto evaluado en este trabajo, la cual se determinó entre personas íntimamente relacionadas con el manejo y estudio del parque, para lo cual se utilizó una entrevista a profundidad y un cuestionario de evaluación de la salud del suelo. La población reconoció principalmente aquellos beneficios relacionados con los servicios ambientales de provisión, manifestaron que sus principales preocupaciones son la pérdida de vegetación y la extracción de especies, identificaron como problemas importantes la inseguridad, la basura y la falta de apoyo económico. De acuerdo con las respuestas del cuestionario de la salud del suelo, las propiedades relacionadas con el suelo y la vegetación se consideraron como saludables en su mayoría. El criterio no saludable se detectó en la salud animal ya que no se observan animales frecuentemente, la salud de la población fue considerada deficiente debido a la presencia de personas enfermas y de edad avanzada dentro de la población de comuneros.*

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 CALIDAD DE SUELO Y SUSTENTABILIDAD.

En la actualidad la Ciencia del Suelo, al ser una ciencia aplicada, rebasa su esquema tradicional, enmarcado en las ciencias naturales, reestructurándose como una ciencia ambiental, comprendiendo aspectos no solo ecológicos, sino también sociales y económicos, con un enfoque sistémico, abordando aspectos tan complejos como calidad y salud del suelo, seguridad del suelo, función del suelo y su relación con los servicios ecosistémicos; que son esenciales para el equilibrio de los sistemas terrestres (Vallejo *et al.*, 2020) con fundamentación en el uso sustentable del recurso natural.

Actualmente la ciencia del suelo opera simultáneamente en los ámbitos de la ecología y la economía, cada uno de los cuales se mueve por diferentes caminos que tienden a separarse. Numerosos aspectos de las ciencias naturales y los de la sociología son cruciales para la relevancia y el valor de la Ciencia del Suelo. Además, el papel de los suelos puede ser visto como un conjunto de compensaciones entre las diversas funciones de los suelos y la sociedad (Hartemink, 2006), como por ejemplo el pago por servicios ambientales por la captura o secuestro de carbono.

Debido a la inquietud con respecto a la degradación del suelo y a la necesidad de un manejo sostenible de los agroecosistemas que se ha manifestado desde décadas atrás (Carter *et al.*, 1997; Wang & Gong, 1998), resurgió la preocupación hacia sus variables, lo cual dio origen al concepto y modelo teórico de calidad de suelo (CS). Este enfoque de calidad reconoce las interacciones suelo-ser humano; de esta forma, se vuelve inseparable del concepto de sostenibilidad del sistema y se considera un indicador clave para determinarla. La calidad del suelo es el resultado de una conservación continua del recurso y de los procesos de degradación que lo afectan y, finalmente, representa la capacidad del suelo para funcionar como un ecosistema vivo saludable (Muscolo *et al.*, 2014). Se considera que uno de los retos más importantes que enfrenta, es la de desarrollar criterios que se utilicen también en una evaluación objetiva de riesgos ambientales (Sims *et al.*, 1997;

Giacometti *et al.*, 2013). En la evaluación de la calidad un componente esencial ha sido la identificación de un conjunto de atributos sensibles, que usualmente inicia con un juicio experto de las propiedades del suelo, seguido de la reducción de los datos estadísticos o el establecimiento de funciones de puntuación estándar lineales o no lineales (Ciarkowska & Gambus, 2020).

La calidad del suelo se define por medio de la determinación de propiedades indicadores que pueden ser físicas, químicas o biológicas y se reconocen dos tipos, inherente y dinámica. La calidad inherente está dada por las propiedades naturales del suelo y la calidad dinámica por las propiedades del suelo que ya han sido alteradas por el hombre (Karlen *et al.*, 2003). En este trabajo se identificó la calidad inherente en suelos con vegetación natural inalterada y la calidad dinámica en los suelos donde esta vegetación ya ha sido alterada por las actividades humanas.

## 1.2 EL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL POPOCATÉPETL Y LA CALIDAD DE SUELO.

Las áreas naturales protegidas (ANP) funcionan como sitios de preservación de la biodiversidad y de los ecosistemas que por sus características aportan enormes beneficios, sin los cuales no sería posible la vida de las sociedades contemporáneas y surgen a partir del deterioro resultado de la dependencia de la humanidad hacia los ecosistemas naturales. Por lo tanto, es necesario evaluar las características y manejo de estas áreas naturales, lo cual sirve de guía para su conservación. Uno de los indicadores más representativos de la sustentabilidad en el manejo de un área es la calidad del suelo; concepto que resulta de la nueva visión de la ciencia del suelo y que pretende evaluar las cualidades de este más allá de su productividad agrícola, con un enfoque más integral que considera las implicaciones ambientales y las relaciones dentro del sistema. En este trabajo se aborda el estudio de los cambios en la calidad del suelo (de inherente a dinámica), y su relación con los servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas comprendidos dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (PNIP). Esta es una zona de gran importancia local y regional, así como compleja respecto a las interacciones sociales y económicas que dentro de la región se han establecido

.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El PNIP es un sitio de importancia por la generación de servicios ambientales y que proporciona múltiples beneficios a una de las zonas más densamente pobladas en México (INEGI, 2015). Sus montañas captan y filtran el agua que abastece las cuencas hidrológicas de México y del alto Balsas, además alberga una amplia biodiversidad, funciona como un almacén de carbono, posee un paisaje excepcional, es un sitio de recreación y educación ambiental, entre otros. Sin embargo también sufre las fuertes presiones resultado de los requerimientos de la población en continuo crecimiento, entre ellas: la demanda de agua; la tala clandestina de árboles; la extracción de biota para comercialización; la presencia y acumulación de residuos sólidos en la zona de influencia que contaminan el agua, aire y suelo; la contaminación atmosférica debido a su cercanía con la zona metropolitana, las plagas, los incendios forestales ocasionados por prácticas agrícolas no sustentables, la ganadería extensiva, la expansión de plantas invasoras y el turismo desordenado, aunado al problema de la tenencia de la tierra en algunas zonas del parque que si bien es de propiedad federal existen conflictos con grupos sociales que no reconocen los límites debido a los decretos de propiedad que les fueron otorgados antes o incluso después de establecer el ANP (SEMARNAT-CONANP, 2013). Si bien el Parque Nacional constituye una de las áreas naturales protegidas más antiguas de México, durante muchos años permaneció en el abandono, lo cual ha provocado una merma en la riqueza de los bosques y de la fauna que habitaba (Becerra, 2018). Para la conservación de los bienes naturales el parque ha sido también incorporado al programa Reserva de la Biosfera en 2010 (UNESCO, 2010) y se creó el plan de manejo del Parque Nacional, en el cual se especifica el ordenamiento ecológico para regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, lo que implica diferentes tipos de manejo dentro de cada una de las subzonas que además involucra distintos actores sociales. Un elemento clave de la conservación de un ecosistema es el suelo debido a sus múltiples funciones ambientales, como sostén de la vida, además constituye un elemento clave en el almacén de carbono, y de las múltiples actividades dentro del parque, sin embargo debido a su fragilidad constituye uno de los primeros componentes ambientales que al ser alterados dejan de proporcionar sus numerosos beneficios (Cram *et al.*, 2008); por lo que es sumamente importante evaluarlo de una forma integral y compleja para alcanzar una

mejor comprensión de los problemas presentes y para posteriormente proponer soluciones pertinentes. Actualmente no existen estudios en el PNIP que aborden el tema de una manera holística y sistémica sobre la calidad de suelo y su relación con los servicios que ofrece; además que la información generada sobre las propiedades de los suelos en el PNIP se encuentra fragmentada, lo que complica el entendimiento y uso de la información para la mejora de la gestión ambiental. Por lo anterior, en este trabajo se aborda el estudio de la calidad del suelo en el PNIP en función de las subzonas en que ha sido ordenado (según el plan de manejo vigente) como una herramienta para diagnosticar su estado, así como la estimación de los servicios ecosistémicos que proporciona, la percepción ambiental de las personas involucradas en su manejo para conocer los beneficios sociales y económicos que ha aportado el parque o que potencialmente pueden aportar.

### **3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

Ante el panorama expuesto, los principales cuestionamientos que guiaron esta tesis fueron:

¿Cómo es la calidad de los suelos dentro de las diferentes subzonas dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl identificadas en su plan de manejo?

¿Cómo se relacionan la calidad del suelo y los servicios ambientales dentro del PNIP?

¿Cómo perciben los actores sociales la Calidad del Suelo y los problemas dentro del PNIP?

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la Calidad del Suelo dentro de las subzonas del PNIP y su relación con los servicios ecosistémicos en los cuales se ven implicadas las funciones del suelo.

#### **4.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

1. Evaluar la Calidad de suelo en las distintas subzonas de manejo del Parque Nacional.

2. Evaluar las funciones del suelo relacionadas con los servicios ambientales que provee el parque.
3. Conocer la percepción ambiental sobre el estado de los recursos naturales dentro del PNIP y su percepción con relación a la calidad del suelo.

## **5. JUSTIFICACIÓN**

El PNIP es merecedor de gran atención debido a su fragilidad como sistema terrestre forestal, así como contribuyente al desarrollo económico, cultural y social de la población. Al ser declarado Reserva de la Biosfera requiere la evaluación de su funcionalidad de una manera holística, que proporcione información sobre el estado actual de los bienes naturales. El suelo forma parte esencial e integradora de los ecosistemas dentro del Parque Nacional, por lo tanto, el cambio en su calidad proporciona información de los procesos de degradación, conservación y recuperación referidos al manejo de los recursos naturales.

## **6. HIPÓTESIS**

La Calidad de suelo dentro del PNIP es más adecuada para el mantenimiento de sus funciones ambientales en aquellas zonas destinadas a la preservación de los recursos con respecto a aquellas en donde existe un nivel menor de protección.

El suelo de las zonas más preservadas presenta mayor contenido de carbono orgánico y además su condición favorece la provisión de servicios ecosistémicos.

La percepción ambiental de los actores sociales involucrados funciona como un indicador del estado de los recursos naturales dentro del PNIP.

## 7. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 7.1 SERVICIOS AMBIENTALES

Los servicios ambientales también llamados servicios ecosistémicos se pueden considerar cualquier bien o servicio proporcionado por la naturaleza y que provee bienestar a algunas o muchas personas (Balvanera & Cotler, 2007). Las sociedades humanas dependen completamente de los ecosistemas y de sus servicios para la obtención de alimento, combustibles, agua, regulación del clima, habitación y recreación entre muchas otras necesidades; sin embargo, durante las recientes décadas los seres humanos hemos alterado de forma más rápida y extensiva los ecosistemas debido a la alta demanda de los servicios señalados. Estas alteraciones van desde el aumento de sedimentos en los cauces de los ríos y pérdidas de poblaciones de especies, originadas por el cambio de uso de suelo y la destrucción del hábitat, hasta los cambios a escala global en la composición de atmósfera y el clima causados por las emisiones (MEA, 2005). Otros servicios igualmente importantes pero que no han tenido lugar en la valuación de los beneficios que recibimos de la naturaleza como la producción de oxígeno y la captura de carbono, la fertilidad de los suelos y su retención en los ecosistemas, los polinizadores de plantas útiles para consumo humano, entre muchos otros, han comenzado a adquirir visibilidad, a partir de la evaluación de los ecosistemas del milenio, con el cual los esfuerzos para realizar estudios alrededor de todo el mundo se han ido incrementando, (Sarukhán *et al.*, 2017).

En el cuadro 1, se muestran los distintos tipos de servicios ambientales y ejemplos de ellos. Los servicios ambientales de soporte, son la base para la producción de las otras categorías, y sus beneficios se reciben de manera indirecta y a través de periodos muy largos de tiempo; los servicios ambientales de regulación son aquellos que se obtienen de los procesos ecológicos que regulan el estado de la biosfera local, regional y global; por su parte, los servicios ambientales de provisión son aquellos que generan recursos materiales, productos y bienes; y, finalmente, los servicios ambientales culturales son los beneficios no materiales que se pueden derivar de los ecosistemas; es importante mencionar que los servicios ambientales están relacionados entre sí y pueden caer en más de una categoría (MEA, 2005).

Cuadro 1. Tipos de servicios ambientales que las sociedades humanas reciben de los ecosistemas y ejemplos representativos de cada uno de ellos (Sarukhán *et al.*, 2017).

<b>Servicios de provisión o abastecimiento</b>	<b>Servicios de regulación</b>	<b>Servicios culturales</b>	<b>Servicios de soporte ecológico</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentos</li> <li>• Agua dulce</li> <li>• Madera y fibras</li> <li>• Combustibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Del clima (protección contra eventos extremos, como inundaciones)</li> <li>• Regulación de polinizadores</li> <li>• Enfermedades</li> <li>• Purificación del agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estéticos</li> <li>• Espirituales</li> <li>• Recreativos</li> <li>• Educativos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de nutrientes</li> <li>• Formación de suelo</li> <li>• Productividad primaria</li> </ul>

La mayor parte de los servicios ambientales se han degradado o se están usando de manera no sustentable y conforme avanzan estos procesos de degradación disminuye la capacidad de los ecosistemas de proveer los servicios ambientales de los que dependemos y cuyos efectos se perciben más en las comunidades humanas más desprotegidas y pobres lo que contribuye a incrementar la inequidad social (MEA, 2005). Los principales efectos de la degradación ecológica en la prestación de los servicios ambientales se ven reflejados en: la pérdida de biodiversidad, la disminución de productos y materias primas, la erosión del suelo, el escurrimiento del agua y escasa infiltración, la pérdida de sumideros de carbono y su captura y la baja productividad primaria (SEMARNAT, 2006). El crecimiento poblacional y su estilo de vida, la expansión de las ciudades, la demanda de recursos y servicios ambientales han ocasionado un fuerte deterioro de la salud e integridad de los ecosistemas, disminuyendo con ello la calidad y cantidad de servicios ambientales. El suelo constituye uno de los primeros componentes que al ser alterados dejan de proporcionar los beneficios necesarios para el mantenimiento de la calidad de vida de la población urbana (Cram *et al.*, 2008). A manera de ejemplo en la figura 1, se muestran las consecuencias del daño sobre el ecosistema de un bosque, la repercusión en el suelo, y su impacto final con en el tiempo en el resto del ecosistema.

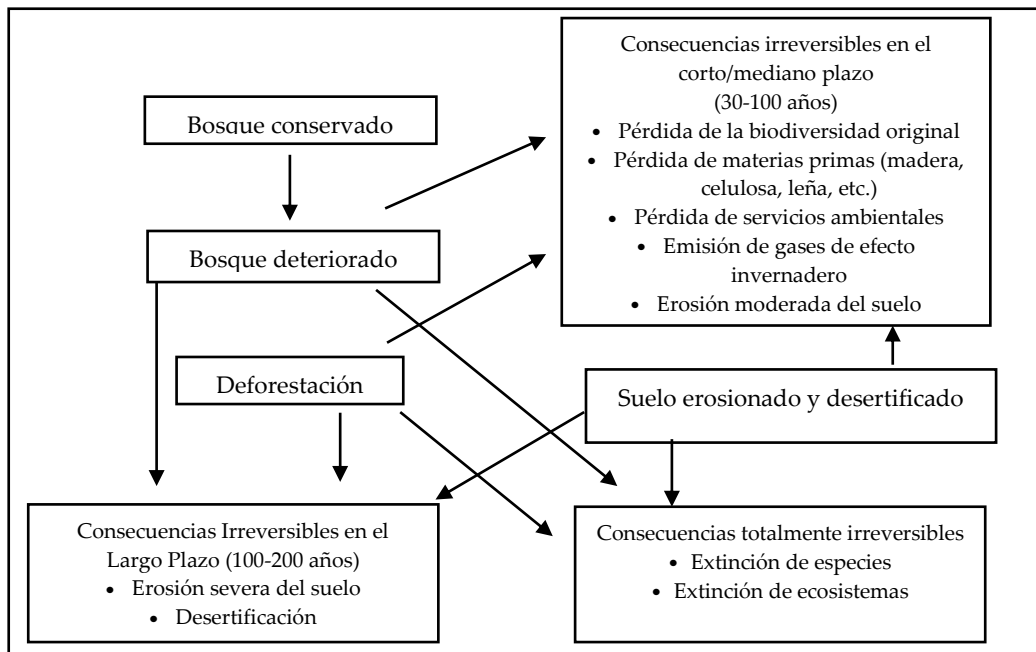


Figura 1. Pérdida de servicios ambientales a partir del deterioro del bosque y sus efectos en el tiempo. Tomado de SEMARNAT, 2006.

## 7.2 ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS

Los ecosistemas no solo son reservorios de la diversidad biológica, sino que además proporcionan servicios y bienes de valor inestimable, fundamentales para nuestra sobrevivencia y bienestar. Debido a esta dependencia y como consecuencia de los cambios inadecuados sin regulación o incontrolados y frente a los procesos críticos que han sufrido los ecosistemas han sido creadas las llamadas áreas naturales protegidas (ANP) que funcionan como un instrumento central para la protección de la biodiversidad y el mantenimiento de un gran número de funciones ambientales vitales (Carabias L & Quadri de la T, 1995). Las áreas protegidas surgen como instrumento para salvaguardar a la naturaleza de las acciones del propio ser humano. Su objetivo principal en su etapa de surgimiento fue el mantener espacios naturales para la recreación y el principal criterio de selección fue la estética. Muchas áreas protegidas se establecen en espesos bosques templados en impresionantes paisajes, como queriendo capturar monumentos naturales (Galindo, 2016).

Los parques nacionales se distinguen de otras categorías de áreas protegidas por su objetivo de

mantener condiciones naturales, lo que implicaría realizar en él solo actividades de recreación e investigación. La creación de parques nacionales, así como la política pública representó el parteaguas de un movimiento mundial que ha crecido hasta la fecha. En México durante la administración (1934-1940) del General Lázaro Cárdenas, con gran influencia del Ing. Miguel Ángel de Quevedo y Zubieta (1859-1946), fue cuando se promovió el decreto del mayor número de parques nacionales hasta entonces.

Además de Parques Nacionales y Reservas de la Biosfera, que en conjunto constituyen el 61% de las áreas protegidas en México, también existen otras cuatro categorías de áreas protegidas federales: Monumentos Naturales (5), Áreas de Protección de Recursos Naturales (8), Áreas de Protección de Flora y Fauna (37) y Santuarios (18). Otras categorías de áreas protegidas incluyen las estatales, municipales, privadas y comunitarias, que en general son de menor tamaño (Galindo, 2016).

A principios de los años 70's el Programa del Hombre y la Biosfera de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) propuso un modelo distinto de área protegida: las reservas de la biosfera, las cuales son áreas geográficas representativas de la diversidad de hábitats del planeta y que se caracterizan por ser sitios que no son exclusivamente protegidos sino que pueden albergar a comunidades humanas, quienes viven de actividades económicas sustentables que no ponen en peligro el valor ecológico del sitio (Becerra, 2018). De esta forma las Reservas de la Biosfera cumplen tres funciones: la conservación de los ecosistemas y la variación genética; fomento del desarrollo económico y humano sostenible; y servir de ejemplos de educación y capacitación en cuestiones locales, regionales, nacionales y mundiales de desarrollo sustentable. La ordenación de las reservas de la biosfera se encamina a demostrar que la conservación medioambiental puede servir para aumentar el desarrollo sostenible basado en los resultados de la investigación científica y en la participación de la población local (UNESCO, 1996).

Un incentivo derivado de las zonas de conservación que proveen servicios ecosistémicos es el pago por servicios ambientales. La idea central del pago por servicios ambientales es que constituyen una transición voluntaria, donde un servicio ambiental bien definido es corroborado por al menos

un comprador a un proveedor de servicios ambientales, donde éste asegura la provisión del servicio. La idea central del pago por servicios ambientales es que los beneficiarios externos de los servicios ambientales hagan contratos directos con los propietarios locales o los usuarios de las tierras para su manejo y a través de éste se asegure la conservación y restauración del ecosistema (FAO, 2009).

En México, el mayor instrumento de política pública para la conservación de la biodiversidad son las áreas naturales protegidas, cuya principal fuente de financiamiento para su administración, manejo y operación proviene de los recursos fiscales; sin embargo, también existen fuentes de financiamiento alternas donde destacan los recursos del GEF (Fondo Mundial para el Medio Ambiente Global, por sus siglas en inglés), donativos, aportaciones a proyectos específicos por fundaciones y también a través de la recuperación del pago de derecho y compensaciones ambientales. El pago por servicios ambientales (PSA) no se considera una estrategia para el financiamiento de las ANP ya que el pago se da directamente a los propietarios de las tierras, sean privadas o de propiedad social. El esquema de PSA en México ha sido llevado a cabo por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y diversos socios importantes como la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). Este programa tiene como finalidad impulsar el reconocimiento del valor de los servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas forestales, agroforestales y recursos naturales, además de apoyar la creación de mercados de estos servicios. Estos programas apoyan a comunidades, ejidos, asociaciones regionales de silvicultores y a propietarios de terrenos forestales. Actualmente los conceptos de apoyo se agrupan en cinco categorías siendo hidrológicos, biodiversidad, sistemas agroforestales, captura de carbono y elaboración de proyectos (CONANP, 2010).

### 7.3 IMPORTANCIA DEL SUELO

El suelo es un recurso dinámico que soporta la vida vegetal, está compuesto por partículas minerales de diversos tamaños (arena, limo y arcilla), materia orgánica, y numerosas especies de organismos vivos (Friedman *et al.*, 2001). Es uno de los componentes más importantes del medio ambiente natural y en gran parte no renovable, con una alta velocidad de degradación y una

regeneración extremadamente lenta (Tóth *et al.*, 2007). Las funciones del suelo son: sostener la actividad biológica, diversidad y la productividad, regular y distribuir el agua, filtrar y amortiguar, degradar, inmovilizar y desintoxicar materiales orgánicos e inorgánicos, incluyendo los subproductos municipales e industriales y la deposición atmosférica, almacenar y regular el ciclo de nutrientes y otros elementos dentro de la biosfera y proveer soporte a las estructuras socioeconómicas, y a los tesoros arqueológicos asociados con la población humana (Seybold *et al.*, 2018). Las funciones del suelo no ecológicas ligadas a la industria y actividades socio-económicas son el soporte físico de las actividades humanas, la fuente de materias primas y patrimonio geogénico y natural (Blum, 2005).

Los suelos son fundamentales para la vida en la Tierra, pero las presiones humanas sobre los recursos están alcanzando límites críticos. El manejo cuidadoso del suelo representa un elemento esencial de la agricultura y también del clima, así como una vía para salvaguardar servicios y biodiversidad. Como se mencionó, una función importante del suelo dentro de los ecosistemas es el almacén de carbono, que va ganando atención en los años recientes debido a que cada vez se entienden más sus interacciones con el sistema del clima en la Tierra. El secuestro de carbono es un proceso natural, eficiente en cuanto a costos y amigable con el ambiente, una vez secuestrado el carbono permanece en el suelo tanto como sea el manejo restaurativo de la tierra, no haya prácticas de labranza y otras prácticas de manejo recomendadas se lleven a cabo (Lal, 2004). El suelo es el mayor reservorio de carbono, su capacidad de almacenamiento supera a la atmósfera y la vegetación terrestre combinados. El suelo es un importante regulador de otros servicios vitales que incluyen el ciclo de nutrientes, regulación de gases de efecto invernadero y la purificación del agua (Wall, 2012). Los suelos soportan el crecimiento de las plantas y por eso son vitales para la humanidad, ellos proveen de nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre y muchos elementos traza que hacen posible la producción de biomasa. La producción de biomasa es importante para el suministro de alimentos, para la producción de energía y fibras, y como una fuente para la industria química. Otros servicios que proporciona el suelo incluyen el suministro de alimentos y agua segura, la regulación asociada a la purificación y flujo del agua (FAO & ITPS, 2015).

El suelo es reconocido como elemento para combatir el cambio climático y por lo tanto es necesario conocer cómo responderá a este cambio, a la modificación de la vegetación, a la erosión y a la contaminación; se estima que los suelos forestales contienen unas existencias totales de carbono de 292 000 millones de toneladas, o 72.3 toneladas por hectárea, lo que representa un volumen superior al total de existencias de carbono en la biomasa forestal. Si se suman los totales de carbono en la biomasa, la madera muerta, la hojarasca y los suelos, el total estimado de existencias de carbono en los bosques es de 652 000 millones de toneladas, que equivale a 161.8 toneladas por hectárea (FAO, 2010). En el cuadro 2, se resumen los beneficios relacionados a funciones específicas del suelo, las cuales son de inmenso valor para las poblaciones:

Cuadro 2. Resumen de los beneficios del suelo (NRCS, 2011).

Función del suelo	Beneficios de valor para los seres humanos	
	En el sitio	Fuera del sitio
Ciclo de nutrientes	Proporciona nutrientes a las plantas	Mejora la calidad del aire y del agua
	Almacén de carbono mejora una variedad de funciones del suelo	Almacén de N y C puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero
Mantenimiento de la biodiversidad y el hábitat	Soporta el crecimiento de los cultivos, pastizales y árboles	Ayuda a mantener la diversidad genética
	Puede aumentar la resistencia y resiliencia al estrés	Soporta las especies salvajes y reduce las tasas de extinción
Relaciones con el agua	Reduce la resistencia de los pesticidas	Mejora la estética del paisaje
	Controla la erosión	Provee control antes las inundaciones y la sedimentación
	Permite la recarga de agua en el sitio de las corrientes y estanques	Recarga de agua subterránea
Filtración y amortiguamiento	Vuelve disponible el agua para plantas y animales	
	Puede mantener los niveles de sales, metales y micronutrientes dentro de un intervalo tolerable para plantas y animales	Mejora la calidad del agua y aire

Estabilidad física y soporte	Actúa como un medio para el crecimiento de las plantas	Almacena objetos arqueológicos
	Soporta caminos y construcciones	Almacena basura
Funciones múltiples	Sostiene la productividad	Mantiene o mejora la calidad del agua y/o el suelo

## 7.4 DEGRADACIÓN DEL RECURSO SUELO

La degradación del suelo se define como un cambio en el estado de salud del suelo que resulta en una disminución de la capacidad del ecosistema para proporcionar bienes y servicios a sus beneficiarios; los suelos degradados no proporcionan los bienes y servicios normales del suelo particular en su ecosistema (Oldeman *et al.*, 1991).

El suelo es un recurso de gran importancia a nivel global, y en el caso de Latinoamérica y la región del Caribe (LAC), se considera fundamental para cubrir las necesidades de una población humana en continuo y rápido crecimiento. Se estima que el potencial agrícola de LAC de 576 millones de hectáreas están afectadas por procesos de degradación; en donde el cambio climático y la presión antropogénica son los principales factores que impulsan dichos procesos de degradación del suelo (Gardi *et al.*, 2014)

Se ha estimado que 45% de la superficie de México presenta degradación inducida por las actividades humanas (SEMARNAT & COLPOS, 2003). El nivel de degradación predominante va de ligero a moderado, mientras que los procesos más importantes de degradación son de tipo químico (principalmente por la pérdida de fertilidad), la erosión hídrica y la erosión eólica. Estos tres procesos están presentes en el 87% de los suelos degradados en el país. Entre las principales actividades de degradación se identificaron el cambio de uso del suelo para fines agrícolas y el sobrepastoreo (17.5% en ambos casos). La deforestación (7.4%) ocupa el tercer lugar, seguida de la urbanización (1.5%) (SEMARNAT-CONANP, 2016); tan solo en México del 2005 al 2010 se perdieron 775 mil hectáreas de bosques y selvas (FAO, 2010). Es importante mencionar que uno de los principales problemas ambientales en México es la deforestación, que ha llegado a alcanzar 1.5 millones de hectáreas por año, ésta pérdida incluso se ha llevado a cabo dentro de áreas naturales

protegidas (CCMSS, 2008).

Los procesos como la conversión de los sistemas naturales a sistemas agrícolas causan una disminución del carbono orgánico del suelo hasta del 60% en suelos de regiones templadas y del 75% o más en zonas cultivadas en los trópicos. Esta degradación reduce su potencial de producción de biomasa y disminuye su capacidad para filtrar el agua (Lal, 2004).

## 7.5 CALIDAD DEL SUELO

La calidad del suelo (CS) se ha definido como “la capacidad de un tipo específico de suelo para, dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad vegetal y animal, mantener o aumentar la calidad del aire y del agua, y soportar la habitación y la salud humana” (Friedman *et al.*, 2001). Esta definición es similar a la de Doran & Jones (1996), quien definió la calidad del suelo como “la capacidad del mismo para funcionar, dentro de los límites de un ecosistema y los límites del manejo de tierras, para sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de las plantas, de los animales y de los seres humanos.” La calidad del suelo tiene dos partes: una intrínseca que cubre una capacidad inherente del suelo para el crecimiento vegetal; y una dinámica, que es influenciada por el uso o manejo del suelo (Doran *et al.*, 1996). El suelo varía naturalmente en sus funciones, por lo tanto, la calidad es específica para cada tipo de suelos. La diferencia entre propiedades inherentes y dinámicas es que las características inherentes son aquellas directamente asociadas con los factores formadores del suelo (Jenny, 1945), mientras que las características dinámicas son aquellas que han sido fácilmente afectadas por las decisiones y acciones humanas (Karlen *et al.*, 2001).

La calidad y la salud del suelo suelen ser conceptos equivalentes porque se representa al suelo como algo vivo, un sistema dinámico cuyas funciones son mediadas por una gran diversidad de organismos vivos que requieren de manejo y conservación (Doran *et al.*, 1996); sin embargo, otros autores consideran la salud del suelo como la capacidad de producir de manera sustentable cultivos sanos y nutritivos (Larson & Pierce, 1991). El concepto de calidad del suelo continúa evolucionando con el propósito primario de servir como una herramienta de evaluación ecológica o un protocolo para evaluar los efectos a corto y largo plazo del manejo del suelo sobre la salud o

la calidad y sustentabilidad de los recursos del suelo. La calidad del suelo tiene interrelaciones con las prácticas de manejo, la productividad y otros aspectos de los ecosistemas, mostrando interdependencia controlada por los mecanismos de retroalimentación (Figura 2); la calidad del suelo está conectada a la salud humana ya que el suelo puede actuar como una fuente o una ruta de vectores patógenos (Zornoza *et al.*, 2015); por lo otro lado, las prácticas del manejo del suelo son determinantes primarios de la calidad del mismo, por lo que los indicadores de la calidad del suelo no solo deben identificar la condición del recurso suelo sino también definir la sustentabilidad económica y ambiental de las prácticas de manejo de la tierra (Doran, 2002).

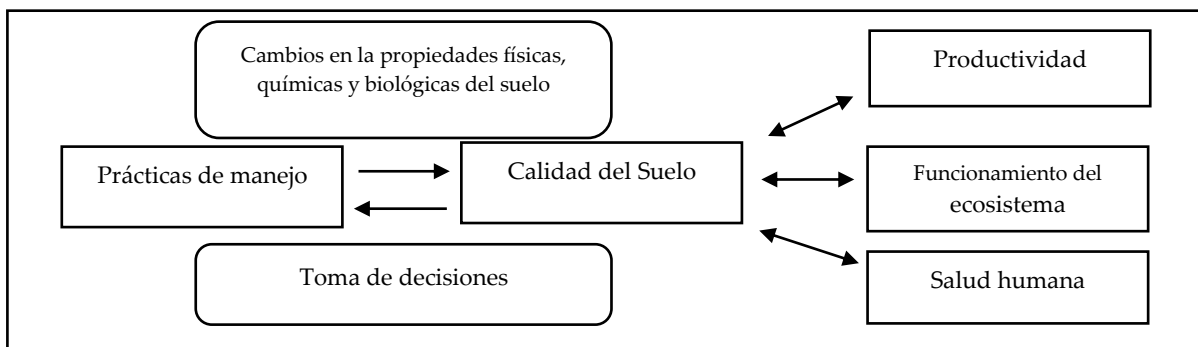


Figura 2. Interrelaciones entre las prácticas de manejo, calidad del suelo, productividad, funciones ambientales y salud humana. Tomado de: Zornoza *et al.*, 2015.

El manejo sustentable del suelo comprende actividades que mantienen o mejoran los servicios de soporte, abastecimiento, regulación y culturales sin perjudicar significativamente cualquiera de sus funciones (FAO & ITPS, 2015). La CS se determina mediante el uso de indicadores y las funciones que lleva a cabo (Burger & Kelting, 1999); el concepto de calidad incluyen tres principios importantes (Arshad & Coen, 1992; Parr *et al.*, 1992; Doran & Parkin, 1994):

- a) la productividad del suelo, que se refiere a la capacidad de este para promover la productividad del ecosistema o agroecosistemas, sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas.
- b) la calidad medio ambiental, entendida como la capacidad para atenuar los contaminantes ambientales, patógenos y cualquier posible daño hacia el exterior del sistema, que incluye los servicios ecosistémicos que ofrece como reservorio de carbono, mantenimiento de la biodiversidad, recarga de acuíferos, etc.

- c) la salud, como la capacidad del suelo para producir alimentos sanos y nutritivos para los seres humanos y otros organismos.

La calidad del suelo y sus funciones son conceptos interrelacionados que representan el alcance de las propiedades del suelo y su asociación con los procesos ecológicos (Page-Dumroese *et al.*, 2010); y se refiere a los efectos del uso y manejo humano sobre éstas funciones (Seybold *et al.*, 2018), por ejemplo, el suelo de los bosques es un elemento clave para el mantenimiento de la salud de los ecosistemas, pero también es el que más impacto sufre por su manejo y por el fuego (Tiedemann *et al.*, 2000); por lo que la calidad en un bosque es un criterio para determinar la sustentabilidad del sistema (Schoenholtz *et al.*, 2000).

## 7.6 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO

El concepto de CS incluye la evaluación de las propiedades del suelo, sus procesos, y como éstos se relacionan con la capacidad del suelo para funcionar efectivamente como un componente de un ecosistema saludable (Schoenholtz *et al.*, 2000). La calidad del suelo se evalúa en cada suelo individual, utilizando indicadores que reflejen los cambios en sus funciones. Los suelos presentan propiedades y procesos químicos, biológicos y físicos que interactúan en una forma compleja para dar al suelo su capacidad para funcionar; por lo tanto, los indicadores se relacionan con estas propiedades edáficas sensibles a los cambios de uso del suelo. Una evaluación proporciona información sobre el estado funcional actual. La evaluación debe comenzar con una comprensión del estándar o el valor de referencia que se utilizará para la comparación. Se pueden hacer evaluaciones para ayudar a identificar las áreas donde ocurren los problemas, identificar áreas de especial interés o comparar campos bajo diferentes sistemas de manejo (Friedman *et al.*, 2001). Para su interpretación, las mediciones deben ser evaluadas con respecto a tendencias a largo plazo o a señales de sustentabilidad. Una secuencia general de cómo evaluar la calidad del suelo es: (1) definir las funciones del suelo en cuestión, (2) identificar procesos edáficos específicos asociados a esas funciones, e (3) identificar propiedades del suelo e indicadores que sean suficientemente sensibles como para detectar cambios en las funciones o procesos del suelo de interés (Carter *et al.*, 1997).

Un indicador es una variable que proporciona información sobre otras variables a las que es difícil acceder y que puede ser usado como punto de referencia para la toma de decisiones (Gras, 1989), dada la complejidad del funcionamiento del suelo, es improbable e incluso imposible que un solo indicador pueda evaluar la salud del suelo. De acuerdo con algunos autores como (Doran *et al.*, 1996) los indicadores deben:

- 1) Abarcar procesos ecosistémicos y relacionar a los procesos orientados a la modelación.
- 2) Integrar propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos.
- 3) Ser accesibles a muchos usuarios y aplicable a las condiciones del campo.
- 4) Ser sensibles a las variaciones en el manejo y el clima en una escala apropiada de tiempo.
- 5) Cuando sea posible, que sean componentes de bases de datos de suelo ya existentes.

En el cuadro 3 se describen las propiedades físicas, químicas y biológicas que son utilizados como los indicadores de rutina para evaluar la calidad del suelo, considerando que existen otras características susceptibles de ser evaluadas a partir del tipo de manejo que se da al suelo; los indicadores de calidad pueden ser definidos como aquellas propiedades del suelo y sus procesos que poseen gran sensibilidad a los cambios en las funciones del suelo (Andrews *et al.*, 2004).

Cuadro 3. Indicadores físicos, químicos y biológicos para evaluar la calidad del suelo. Tomada de (SAGARPA, 2012).

<b>Propiedades físicas</b>	<b>Relación con la condición y función del suelo</b>
Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces	Estima la productividad potencial y la erosión
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lavado; productividad y erosividad
Capacidad de retención de agua	Relación con la retención de agua, transporte y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica
<b>Propiedades químicas</b>	
Materia orgánica (N y C total)	Define la fertilidad del suelo; estabilidad y erosión.

---

pH	Define la actividad química y biológica.
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lavado; productividad y erosividad
Conductividad eléctrica	Define la actividad vegetal y microbiana.
P, N y K extraíbles	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de
<b>Propiedades biológicas</b>	
C y N de la biomasa microbiana	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica.
Respiración, contenido de humedad y temperatura	Mide la actividad microbiana; estima la actividad de la biomasa.
N potencialmente mineralizable	Productividad del suelo y suministro potencial de N

---

Muchos autores evalúan la calidad del suelo usando diferentes indicadores independientes pero otros prefieren su combinación en modelos o expresiones en la que involucran varias propiedades, como se puede ver en la figura 3, generando lo que se conocen como índices de la calidad del suelo (ICS) (Karlen *et al.*, 2001).

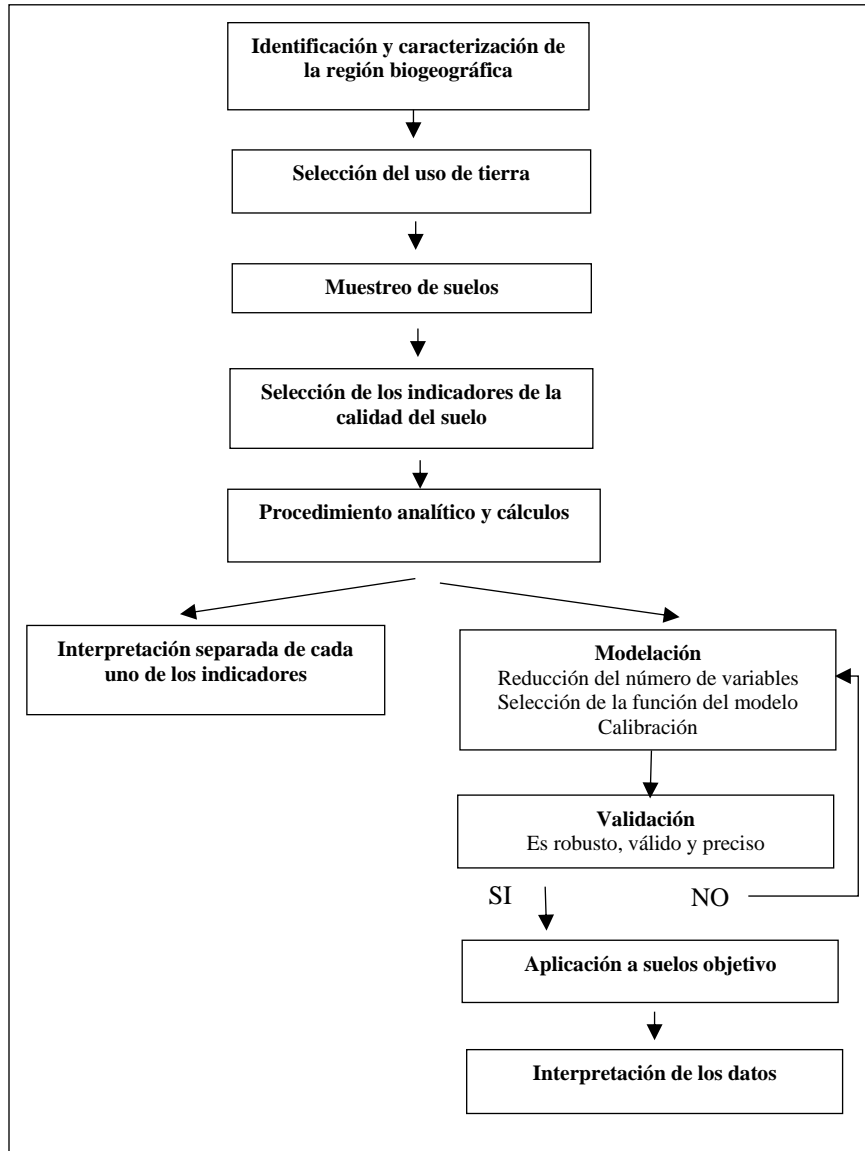


Figura 3. Diagrama de flujo de los pasos involucrados en una evaluación de calidad de suelo. Tomado de Zornoza *et al.*, 2015.

Los indicadores de calidad del suelo pueden variar en función del manejo; por ejemplo, los parámetros de la calidad del suelo que se pueden usar para evaluar qué tan bien un suelo acepta, retiene y transfiere agua a los cultivos puede incluir la medición de las estructuras del suelo, el tamaño de los poros y su distribución, la estabilidad de los agregados, la conductividad hidráulica saturada, la unión de las partículas o mecanismos de retención. Las propiedades químicas importantes para un suelo utilizado para la renovación de residuos pueden incluir capacidad de

intercambio, pH, contenido de C y capacidad de adsorción. Los indicadores biológicos de la calidad del suelo para la función de mantener el crecimiento de las plantas pueden incluir parámetros como la biomasa microbiana y/o la respiración, las asociaciones de micorrizas, las comunidades de nematodos, las enzimas o los perfiles de ácidos grasos (Karlen *et al.*, 1997). Las diferencias del suelo y comparaciones significativas solo pueden hacerse dentro de la misma serie de suelos, para una ubicación específica con el conocimiento de la historia de su manejo; las comparaciones entre diferentes suelos son casi sin sentido debido a las diferencias en los factores inherentes formadores del suelo y las fluctuaciones en cada suelo (Figura 4) que reflejan los efectos dinámicos y es proyectado a mostrar que habrá variaciones en las evaluaciones temporales (Karlen *et al.*, 2008).

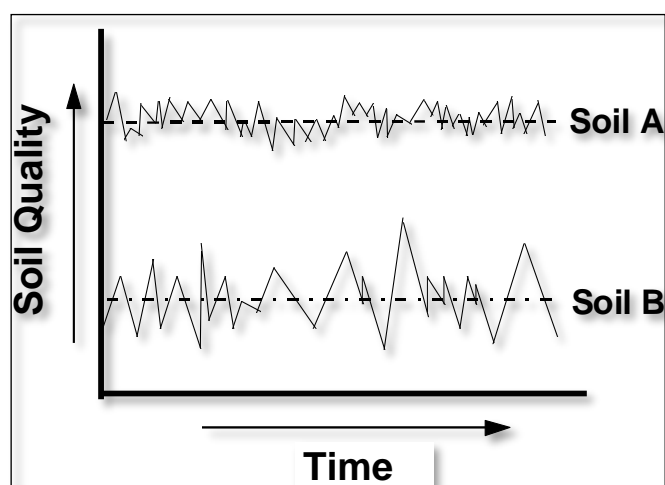


Figura 4. Conceptualización de las diferencias de la calidad inherente del suelo entre dos suelos. Tomado de Karlen *et al.*, 2008.

Es muy importante reconocer que la evaluación de la sustentabilidad de diversos ecosistemas es que su gestión está impulsada por objetivos explícitos, ejecutados por políticas y protocolos que se fundamentan en el monitoreo y la investigación basados en la mejor comprensión de las interacciones ecológicas y los procesos necesarios para mantener la composición, estructura y función del ecosistema (Christensen *et al.*, 1996).

La calidad y salud de los suelos determinan la sostenibilidad agrícola y la calidad medio ambiental, y por lo tanto la salud de plantas, animales y humanos (Doran & Safley, 1997), a pesar de esto, existe una escasa valoración social del suelo, ya que no es un bien que se consuma directamente o

porque erróneamente se considera renovable (Burbano Orjuela, 2017). Una visión renovada de la calidad de suelo es la que busca preservar las funciones totales del recurso y no solo lo que refiere a la productividad (Bautista Z & Estrada M, 1998; Cotler *et al.*, 2016). La calidad del suelo no debe importar solo a los productores agrarios, ya que es prioritario para el bienestar de todos los sectores de la sociedad; por lo cual es necesario privilegiar la protección ambiental para mantener el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos (FAO, 2012).

Ya se ha reconocido la relación que existe entre los suelos y la salud humana, aunque su estudio es reciente debido a que el suelo es un sistema complejo que necesita estudios desde diferentes disciplinas que se ubican no solo en las ciencias agrícolas sino en las sociales y de la salud (López-Lafuente & González-Huecas, 2015).

La cuantificación de la relación entre los atributos del suelo y los servicios ecosistémicos puede facilitar el entendimiento de la relación entre el bienestar humano y la amenaza de la expansión de la degradación de la tierra. Ya se han abordado estudios en donde se manifiesta esta inquietud por mostrar los vínculos entre el suelo y los servicios de los ecosistemas. En el cuadro 4 se muestra la conexión de los atributos clave del suelo con los servicios ecosistémicos a través de las funciones del suelo; para lo que se han agrupado los servicios en cuatro clases principales: carbono del suelo, propiedades fisicoquímicas, propiedades hidrológicas y propiedades biológicas (Adhikari & Hartemink, 2016).

Cuadro 4. Lista de propiedades clave del suelo relacionadas con los servicios de los ecosistemas. Tomado de Adhikari & Hartemink, 2016.

Propiedad del suelo	Servicios de provisión		Servicios de regulación					Servicios culturales			Servicios de soporte					
	Alimentos, combustibles y fibras	Materias primas	Reservorio genético	Agua fresca/retención de agua	Regulación del clima y gases	Regulación del agua	Control de inundaciones y erosión	Regulación de plagas y enfermedades	Secuestro de carbono	Purificación del agua	Recreación/ecoturismo	Estética/sentido de pertenencia	Educación/inspiración	Patrimonio cultural	Formación del suelo	Ciclo de nutrientes
Carbono orgánico del suelo	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•	•
Arena, arcilla, limo y fragmentos		•	•	•	•	•		•	•				•	•	•	
pH	•						•		•					•	•	
Profundidad a la roca madre			•	•	•	•			•							
Densidad aparente	•									•	•					
Capacidad de agua disponible			•	•	•	•			•							
Capacidad de intercambio catiónico	•								•						•	
Conductividad eléctrica	•														•	
Porosidad del suelo y permeabilidad al aire	•		•	•	•	•					•					
Conductividad hidráulica e infiltración	•		•	•	•	•			•							
Biota del suelo	•		•	•	•	•	•	•	•	•				•	•	•
Estructura del suelo y agregación			•	•	•	•								•		•
Temperatura del suelo	•						•							•	•	
Mineralogía de arcillas	•	•							•					•	•	

Una forma para lograr una evaluación compleja, es decir a través del estudio de las interacciones entre las partes del sistema, podría darse por medio de la construcción de un modelo holístico que combina los servicios ambientales que se llevan a cabo a través de la determinación de la contribución relativa de cada servicio ecosistémico del suelo en un sitio específico por acuerdo entre expertos desde diferentes disciplinas (Rinot *et al.*, 2019) como fue propuesto para el índice de la salud del océano (Halpern *et al.*, 2012). Sin embargo, la mayoría de los estudios que evalúan la funciones del paisaje han fallado en incorporar el conocimiento de los usuarios de los recursos (Merrill *et al.*, 2013). En el caso de la agricultura, las investigaciones sugieren que el conocimiento local es valioso para entender a detalle los procesos agrícolas. Es importante que se realicen estudios profundos sobre percepción con respecto a los recursos naturales ya que esto ayuda a comprender de una forma más completa la relación entre el hombre y su ambiente; lo que puede favorecer la creación de mejores esquemas de protección de las áreas en conservación (Ramírez-Silva & Abundis, 2015).

## 7.7 ÍNDICES DE CALIDAD DE SUELO

El índice de calidad del suelo (ICS) surge de la necesidad de una herramienta científica para medir y evaluar la calidad del suelo (Armenise *et al.*, 2013). El ICS se ha utilizado en áreas agrícolas y forestales, donde el rendimiento de los cultivos y la producción silvícola son indicadores cruciales de la calidad del suelo; y con menos frecuencia se ha usado en suelos urbanos (Zornoza *et al.*, 2015; Bünemann *et al.*, 2018). Debido a la increíble complejidad y especificidad del suelo los estudios sobre los ICS se han centrado en la selección de los indicadores y su interpretación (Bünemann *et al.*, 2018). Estos indicadores pueden ser físicos, químicos o biológicos (Muñoz-Rojas, 2018). Las propiedades químicas más utilizadas son el carbono orgánico del suelo, el nitrógeno y el pH; por otro lado la distribución del tamaño de las partículas, la densidad aparente, el agua disponible, la estructura del suelo y la estabilidad de los agregados, entre los parámetros físicos, son posiblemente los más utilizados para evaluar la CS (Bünemann *et al.*, 2018; Pereira *et al.*, 2018). El uso de propiedades biológicas como la biomasa microbiana o las actividades enzimáticas han sido empleadas, aunque son menos frecuentes porque requieren métodos más complicados y costosos (Pulido *et al.*, 2017).

El marco de evaluación de la gestión del suelo (SMAFbpor sus siglas en inglés) desarrollado por el Instituto de calidad del suelo proporciona un marco para evaluar los indicadores combinando las puntuaciones en una evaluación global basada en la definición de los servicios ecosistémicos u objetivos de gestión. La interpretación se basa en curvas de puntuación y en la creación de un índice de calidad aditivo (Andrews *et al.*, 2004). El SMAF ha influido en el surgimiento de varios estudios que aplican métodos estadísticos multivariados para seleccionar los indicadores más adecuados, que luego se integran en funciones de puntuación para finalmente generar un ICS (Zornoza *et al.*, 2015; Biswas *et al.*, 2017; Guo *et al.*, 2017; Raiesi, 2017; Bünemann *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018b; Juhos *et al.*, 2019). La principal preocupación sobre el ICS es la correcta selección de los indicadores, que deben reflejar los principales procesos y funciones que ocurren en el suelo, conocidos como el conjunto mínimo de datos (CMD). Sin embargo, no existe una metodología establecida para la selección de indicadores o índices de calidad del suelo (Rangel-Peraza *et al.*, 2017). Los desafíos más significativos durante la selección de indicadores pueden ser la falta de datos, la incertidumbre en múltiples escalas, la heterogeneidad espacial del suelo, la calidad de los datos, el tamaño de la muestra, el diseño de la muestra y la propia limitación de los supuestos del modelo (algoritmos incorrectos) (de Paul Obade & Lal, 2016). Dado que el suelo es un sistema disperso de gran complejidad, no hay métodos de evaluación homogéneos o preestablecidos para evaluar su calidad; es decir, no se utilizan los mismos indicadores para todos los tipos de suelo. Por lo tanto, la selección de los indicadores dependerá del tipo de suelo y del uso previsto.

## 8. ANTECEDENTES

### 8.1 ESTUDIOS SOBRE CALIDAD DE SUELO EN ZONAS FORESTALES Y AGRÍCOLAS

En el año 2000 (Islam & Weil, 2000) se realizó una evaluación para detectar modificaciones en la calidad del suelo debido al cambio de uso de forestal a agrícola en bosques tropicales. Se analizaron suelos bajo cubierta forestal sin alteraciones humanas, suelo de pastizal, suelo de bosque reforestado y suelo para uso agrícola. A partir de sus resultados concluyeron que la degradación de la calidad del suelo que encontraron pudo resultar de un aumento en la ruptura de los macro agregados, reducción de la biomasa microbiana y a la pérdida de materia orgánica lábil debido al fuego, deforestación, labranza y a la acelerada erosión. La mejora reportada en la calidad del suelo y en la actividad biológica de la zona reforestada y el pastizal demostraron resiliencia inherente de esos suelos una vez revitalizado con árboles y pastos de rápido crecimiento y fácilmente adaptables.

En 2002 (Astier *et al.*, 2002) se propuso un marco para obtener indicadores para evaluar la CS, los cuales tuvieron las siguientes características: i) Utilizaron atributos ambientales de sustentabilidad, productividad, resiliencia y estabilidad; ii) caracterizaron el sistema de manejo, en términos de escalas espacial y temporal del análisis; y, iii) identificaron los puntos críticos en el agroecosistema estudiado. En un ejercicio hipotético seleccionaron tres sistemas de manejo agrícolas tomados de experiencias en México, el primer caso fue la producción de maíz en condiciones de temporal y agricultura campesina en Michoacán en un terreno experimental en donde se realizó una investigación de mediano plazo (4 años) sobre el efecto de la incorporación de abonos verdes durante el invierno (avena y leguminosas nativas); para este caso los indicadores seleccionados fueron el rendimiento del grano, nivel de P y N en maíz, mineralización de N, contenido de nitrato y amonio, larvas de rizosfera, grado de penetrabilidad, tasa de infiltración, contenido de humedad en época crítica y la medición de sedimentos para evaluar la erosión hídrica. El segundo caso ilustró la selección de indicadores de calidad de los suelos en un sistema silvopastoril mejorado en selva

baja caducifolia en la reserva de Chamela en donde la idea fue permitir el desarrollo de franjas de árboles o zonas de amortiguamiento, generar bordes de contención para reducir la erosión y establecer un sistema de pastoreo controlado; en este caso se utilizaron como indicadores la cantidad y composición de pastos por familia y especie, la carga animal, la evolución del grado de compactación, la tasa de infiltración, evolución del grado de encostramiento, el nivel de erosión, nivel y naturaleza de la escorrentía y la cobertura del suelo. El tercer caso estudió un sistema de agricultura intensiva en El Batán en donde se practicó una agricultura comercial e intensiva de maíz, el sitio presentaba condiciones nutrimentales adecuadas para las plantas, alta densidad aparente, compactación de la capa arable, exceso de humedad en el perfil en épocas críticas e inadecuada aireación radicular, se propuso un sistema de manejo intensivo mejorado basado en la rotación de abonos verdes, maíz y trigo; los indicadores evaluados fueron el rendimiento del grano, evolución del grado de compactación, la tasa de infiltración, nivel de humedad de la zona raíz, incidencia de *Pythium sp.*, estabilidad de agregados, densidad aparente, nivel de micronutrientes y medición de carbono orgánico. En los tres casos los indicadores seleccionados fueron considerados puntos críticos dentro de cada sistema dadas sus características particulares en cuanto a las actividades y las propiedades del entorno natural. Los autores concluyeron que la evaluación de calidad de suelos mediante el uso de indicadores permitió entender cómo evolucionaron las capacidades y propiedades de los suelos bajo determinados sistemas de manejo. Para los autores, alcanzar una agricultura sustentable, el suelo debe dejar de ser visto solo como un medio que proporciona nutrientes y sostén a las plantas para cultivarlas, el concepto de calidad del suelo se ubicó como el centro de procesos ambientales en todos los niveles.

En otro estudio se estableció un conjunto mínimo de datos sobre calidad del suelo para un ensayo de labranza a largo plazo, manejo de residuos y rotación para trigo y maíz (Govaerts *et al.*, 2006). Los autores afirmaron que, basados en la evaluación de la calidad del suelo se pueden seleccionar tecnologías de manejo sustentable para transferirlas a los campesinos de la región de estudio. Las variables mínimas estudiadas para determinar la calidad del suelo fueron: retención de agua, estabilidad del agregado, punto de marchitamiento permanente y resistencia a la penetración del

suelo, además de las concentraciones de C, N, K y Zn, medidos en la parte superior del suelo de 0-5 cm y C, N entre 5-20 cm. Los resultados proporcionaron una fuerte justificación para promover la tecnología de labranza cero combinada con una gestión adecuada de los residuos en las tierras altas volcánicas del centro de México y otras regiones similares. También concluyeron que el conjunto mínimo de datos y las herramientas asociadas para monitoreo y observación son esenciales para evaluar la calidad del suelo en los campos de los agricultores.

En otra investigación (Cruz-Flores & Etchevers-Barra, 2011), se evaluó el contenido de carbono orgánico del suelo, la biomasa microbiana, biomasa en el mantillo y coeficientes metabólicos como indicadores de sustentabilidad, considerando que estos son importantes para diseñar estrategias de uso y manejo adecuado de suelos forestales, la investigación se realizó en nueve áreas protegidas de México con bosques templados sobre suelos desarrollados de material ígneo, sedimentario o complejos metamórficos. Los resultados de la investigación aportaron elementos para afirmar que las condiciones ecológicas y edáficas en bosques de pino y oyamel influyen sobre el contenido de carbono en suelos. Los investigadores concluyeron que las propiedades de la materia orgánica fueron indicadores importantes de la calidad del suelo.

En México se desarrolló una investigación interdisciplinaria sobre diversas prácticas de conservación en áreas forestales en México para evaluar la efectividad de los indicadores de la calidad del suelo y también para determinar indicadores de la aceptación y ejecución de las prácticas de conservación. En esta investigación, los representantes de los núcleos agrarios participaron en una entrevista semiestructurada para evaluar la percepción, aceptación y ejecución de las prácticas de conservación (Cotler *et al.*, 2013). Un paso en el monitoreo de la calidad del suelo fue la identificación de las propiedades y la selección de un mínimo de indicadores que fueran representativos de los cambios causados por las prácticas de manejo. Los investigadores encontraron que estos indicadores fueron suficientemente sensibles para identificar cambios causados por las prácticas de conservación, y esto representó un primer paso en la evaluación del impacto de política pública sobre la conservación de la calidad del suelo en México (Cotler *et al.*, 2013).

## 8.2 PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL

El 8 de noviembre de 1935, mediante Decreto Presidencial, se declaró Parque Nacional a las montañas denominadas Iztaccíhuatl y Popocatepetl (DOF, 1935), como uno de los primeros esfuerzos de conservación de esta zona tan importante en el país, y que estableció la curva de nivel de los 3 mil metros con una superficie de 39,819 hectáreas; posteriormente, en un nuevo decreto, del presidente Lázaro Cárdenas (13 de marzo de 1937) confirmó que los terrenos forestales de la hacienda de Zoquiapan habían quedado comprendidos en el Parque Nacional, lo que aumentó el área dentro del parque (DOF, 1937). Durante la década de los años 1940 comienza una etapa de rápido crecimiento demográfico, urbano e industrial que traen consigo un declive de la conservación, el entonces presidente Miguel Alemán decretó una subida en la cota del parque a los 3 6000 metros, lo que dio lugar a la explotación de madera para la elaboración de papel de la fábrica San Rafael (DOF, 1984). Finalmente, por acuerdo secretarial el 11 de febrero de 1992 se declaró la extinción de la Unidad Industrial de Explotación Forestal que permitía la tala para la producción de papel en San Rafael (DOF - Diario Oficial de la Federación, 1992). Desde el 2 de Junio de 2010 el Parque Nacional fue ingresado al programa de la UNESCO “El hombre y la Biosfera” como Reserva de la Biosfera “Los Volcanes”, con 171,774 hectáreas pasando a formar parte de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera (UNESCO, 2010), programa que desde 1971 ha trabajado para mejorar las relaciones entre las personas y el ambiente, combinando las ciencias sociales y naturales con las económicas, la educación y la capacidad de construir, el programa también ha promovido el uso sustentable y la conservación de la diversidad biológica (Cárdenas *et al.*, 2016)

El PNIP contiene el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro de México además ofrece múltiples beneficios ambientales a nivel local y regional y se encuentra en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transversal. El parque ocupa una parte sustancial de la Sierra Nevada, dividido en los estados de México, Puebla y Morelos representando una fuente importante de servicios ambientales en la zona más densamente poblada del país (INEGI, 2015), algunos de los servicios ambientales que ofrece son:

- a) Fuente de abastecimiento de agua

- b) Sumideros de carbono
- c) Reguladores del clima
- d) Centros de diversidad biológica
- e) Estabilizadores del suelo frente a los procesos erosivos

Debido a la diversidad de servicios y bienes ambientales que provee el parque se han generado múltiples actividades que perjudican su conservación y adecuado manejo. Los principales problemas ambientales que se presentan se muestran en la figura 5 (SEMARNAT-CONANP, 2013).

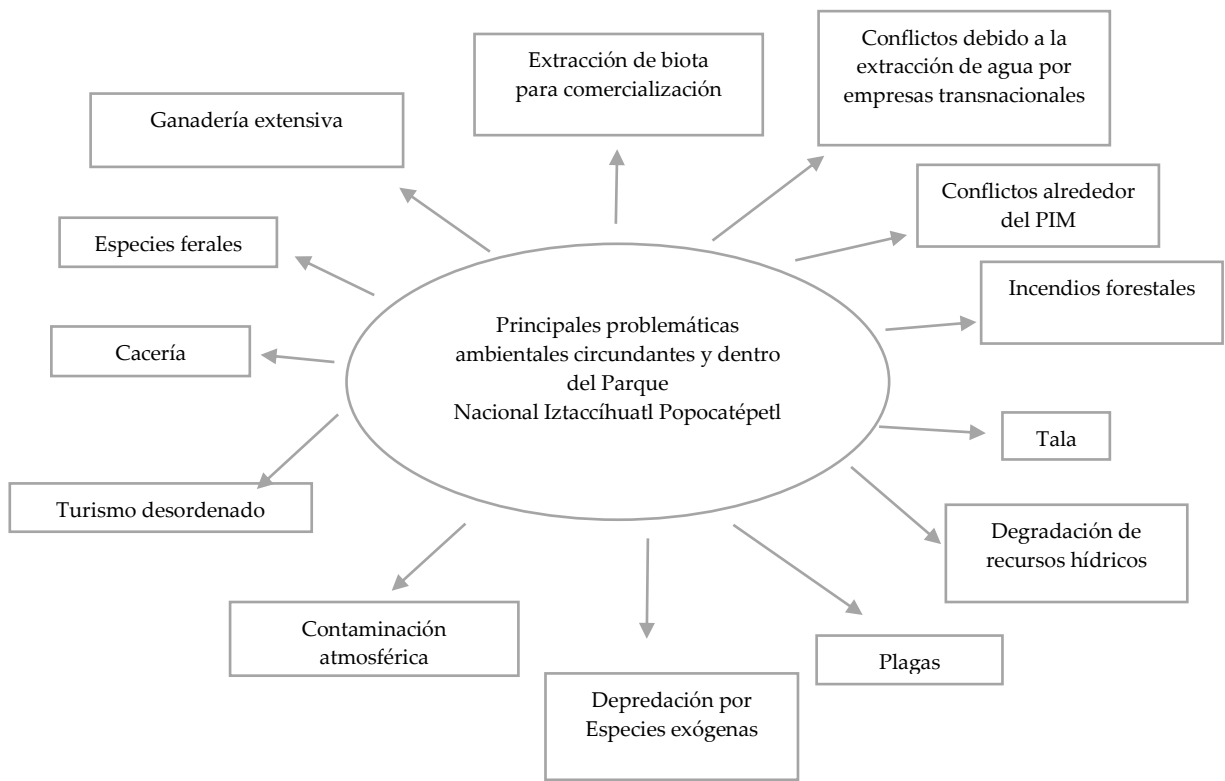


Figura 5. Problemáticas ambientales en el PNIP.

Un problema que además ha provocado conflictos sociales es la situación de la tenencia de la tierra, ya que la totalidad de la superficie del Parque Nacional son terrenos nacionales de propiedad federal, sin embargo, existen comunidades que cuentan con títulos de propiedad que datan de la colonia e incluso recibieron terrenos resultado del reparto agrario posterior al establecimiento del parque; algunos ejidos los recibieron sobre una superficie que corresponde al área natural protegida, lo cual favorece que se desarrollen otras problemáticas ambientales de degradación al

no conocer exactamente los límites y por lo tanto las actividades que se realicen pueden deteriorar el ecosistema. A pesar de las múltiples normas (Cuadro 5) que se aplican en el área y en las cuales se emiten los decretos de conservación y manejo del Parque Nacional, se dividen las opiniones entre los que aseguran que se pueden representar estrategias exitosas para evitar la pérdida del bosque y entre los otros que consideran que las amenazas pueden incrementarse después de dichos decretos (CCMSS, 2008); ya que en 1947 y 1992 se establecieron vedas forestales que dispararon la tala a niveles insospechados (SEMARNAT-CONANP, 2013). Es evidente que los programas de explotación intensiva a los que ha sido sometido el parque no mantuvieron un equilibrio entre la madera extraída y las posibilidades de regeneración del bosque, ya que es fácil observar los claros originados por la deforestación, lo que ha inducido el aumento de la intensidad de los procesos erosivos y la pérdida de cobertura vegetal (Hernández-García & Granados-Sánchez, 2006).

Cuadro 5. Normas Oficiales Mexicanas Aplicables a las actividades a que está sujeto el Parque Nacional.

NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007 Que establece las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario.	Norma Oficial Mexicana NOM-012-SEMARNAT-1996. Procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de leña para uso doméstico.
Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-especies nativas de México flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo.	Norma Oficial Mexicana NOM-019-SEMARNAT-2006. Que establece los lineamientos técnicos de los métodos para el combate y control de insectos descortezadores.
Norma Oficial Mexicana NOM-126-SEMARNAT-2000. Especificaciones para la realización de actividades de colecta científica de material biológico de especies de flora y fauna silvestres y otros recursos biológicos en el territorio nacional.	Norma Oficial Mexicana NOM-07-TUR-2002. De los elementos normativos del seguro de responsabilidad civil que deben contratar los prestadores de servicios turísticos de hospedaje para la protección y seguridad de los turistas o usuarios.

---

<p>Norma Oficial Mexicana NOM-062-SEMARNAT-1994. Especificaciones para mitigar los efectos adversos sobre la biodiversidad, ocasionados por el cambio de uso del suelo de terrenos forestales a agropecuarios.</p>	<p>Norma Oficial Mexicana NOM-08-TUR-2002. Que establece los elementos a que deben sujetarse los guías generales y especializados en temas o localidades específicas de carácter cultural.</p>
<p>Norma Oficial Mexicana NOM-007-SEMARNAT-1997. Procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de ramas, hojas o pencas, flores, frutos y semillas.</p>	<p>Norma Oficial Mexicana NOM-09-TUR-2002. Que establece los elementos a que deben sujetarse los guías especializados en actividades específicas.</p>
<p>Norma Oficial Mexicana NOM-010-TUR-2001. De los requisitos que deben contener los contratos que celebren las y los prestadores de servicios turísticos con las y los usuarios-turistas.</p>	

---

Aunado a los problemas antes mencionados, como resultado del Proyecto Integral Morelos (PIM) a partir del 2011 se conoció mediante la manifestación de impacto ambiental (MIA) que fue invisibilizada la probabilidad de que ocurriera un conflicto social por el agua residual del río Cuautla (González-Chávez, 2020). Además, una parte de la distribución de gas natural se lleva a cabo en la zona sur de la zona de influencia del PNIP. Dentro de la misma MIA no se proyectó ningún escenario relacionado con la actividad eruptiva del volcán Popocatepetl, en donde una parte de la distribución de gas natural se lleva a cabo y en donde se encuentran instaladas dos plantas termoeléctricas (BUAP, 2019). Por otro lado, la zona circundante al Parque ha exhibido múltiples problemas sociales, económicos y ambientales relacionados con el desabasto de agua en poblaciones en donde las grandes empresas trasnacionales Nestlé y Bonafont extraen de las corrientes de agua de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl el agua que comercializan desde hace más de 25 años, lo cual solo ha generado ganancias multimillonarias a dichas empresas; las multinacionales se encuentran asentadas en los pueblos de Santa Cruz Otlatla, municipio de Santa Rita Tlahuapan; Santa María Zacatepec, perteneciente a Juan C Bonilla, las cuales son localidades con índices de pobreza mayor a 50 por ciento de su población, según cifras del INEGI del 2020 (Llaven-Anzures, 2021).

El Programa de Manejo del Parque Nacional se generó como un instrumento de planeación y regulación basada en el conocimiento de la problemática del área y de sus recursos naturales; el cual plantea la organización, jerarquización y coordinación de acciones que permitan alcanzar los objetivos por los cuales fue creada el ANP. El programa ha sido dividido en 6 subprogramas de conservación: protección, manejo, restauración, conocimiento, cultura y gestión. Dentro del subprograma de restauración se pretende recuperar y restablecer las condiciones ecológicas previas a las actividades humanas o de fenómenos naturales con la finalidad de permitir la continuidad de los procesos naturales en los ecosistemas; uno de éstos recursos que se pretende restaurar es el suelo, el cual se ha visto deteriorado por la pérdida de cubierta forestal que ocasiona su erosión y de esta forma disminuye la capacidad de infiltración de agua, el secuestro de carbono y la continuidad de los ciclos biogeoquímicos (SEMARNAT-CONANP, 2013). Cada una de las actividades dentro del programa de manejo busca cumplir objetivos específicos; como la prevención de la tala, el manejo adecuado del ganado, el control sobre las actividades que involucran el fuego, la preservación de la biodiversidad, entre otras. Dichas actividades ayudan a mejorar la calidad del suelo y viceversa y dado que los ecosistemas dentro del Parque Nacional son complejos, es necesario considerar las interacciones que involucran el medio físico, biológico y la sociedad; y cuyas interacciones determinan su funcionamiento.

A través del ordenamiento ecológico del ANP se pretende regular o inducir el uso del suelo y las actividades; en la actualidad el PNIP tiene una superficie de 39 mil 819.086 hectáreas y se encuentra a cargo de SEMARNAT a través de la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP). La extensión del Parque Nacional ha sido dividida en las siguientes subzonas y zona de Influencia (Figura 6):

a) Subzona de Preservación: Abarca una superficie total de 18,798.985 hectáreas, constituida por cuatro polígonos que se caracterizan por ser sitios en donde los recursos naturales han sido aprovechados de manera tradicional y continua por la población vecina, sin ocasionar alteraciones significativas en los ecosistemas

b) Subzona de Uso Público: Abarca una superficie total de 14,415.543 hectáreas, conformada por

seis polígonos, caracterizándose por ser sitios que presentan atractivos naturales para la realización de actividades de recreación y esparcimiento, en donde es posible mantener concentraciones de visitantes en los límites que se determinen con base en la capacidad de carga de los ecosistemas.

c) Subzona de Recuperación: Abarca una superficie de 6,604.558 hectáreas, conformada por cuatro polígonos, caracterizándose porque en ellas los recursos naturales han resultado severamente alterados o modificados, y por lo tanto son objeto de programas de recuperación y rehabilitación.

d) Zona de influencia: Para delimitar la zona de influencia del PNIP se consideraron las superficies boscosas en buen estado de conservación o susceptibles de restauración que van siguiendo, una zona de amortiguación de un kilómetro de separación con respecto a los linderos del parque, delimitándose así un polígono de 17,442.1140 hectáreas que se ubican alrededor de dicha área.

Esta organización del área natural protegida permite ordenar su territorio en función del grado de conservación y representatividad de sus ecosistemas, la vocación natural del terreno, de su uso potencial y con base en los objetivos de conservación y manejo que se pretenden alcanzar (SEMARNAT-CONANP, 2013). Otra forma de favorecer la conservación de los recursos naturales dentro del Parque es la valoración de los servicios que ofrece. Se ha estimado que la recreación generada por el Parque tiene un valor para la economía local de \$9.2 millones de pesos al año; además se pueden generar beneficios adicionales hasta de \$161 millones de pesos al año si se adoptan prácticas productivas sustentables como la milpa mejorada, sistemas silvopastoriles y un manejo forestal sustentable (CONANP-GIZ, 2017); se ha calculado que el valor económico del servicio de infiltración de agua provisto por el Parque es de \$199 millones de pesos al año y en la Reserva Los Volcanes designada por UNESCO alcanza una cifra de \$1,168 millones de pesos; el Parque Nacional puede generar beneficios económicos adicionales, al mejorar el manejo hasta en \$47.5 millones de pesos al año por infiltración de agua y secuestro de carbono y de implementarse las prácticas productivas sustentables se evitarían costos por \$473 millones de pesos al año en la instalación de infraestructura para el control de la erosión, todos estos beneficios económicos ayudarían a garantizar la conservación de los recursos y los servicios ambientales dentro del Parque (CSF, 2012).



### 8.3 CONOCIMIENTO LOCAL Y PERCEPCIÓN AMBIENTAL

El conocimiento es información valorada por determinados agentes que se proponen conocer el mundo y transformarlo; es decir el conocimiento es el resultado de la interpretación de datos.

Con la finalidad de interconectar el conocimiento local, científico y profesional, son necesarios mecanismos efectivos para acceder, registrar, evaluar y sintetizar el conocimiento sobre temáticas diferentes desde las fuentes. El conocimiento es un aspecto central de la cultura, que deriva de la educación y experiencia, puede ser usado en conjunto con determinados sistemas de valores y prioridades en competencia y posibilidades para la toma de decisiones (Dixon *et al.*, 2001). El conocimiento se crea, acumula, difunde, distribuye y se aprovecha; adquiere valor de muchas maneras orientando las decisiones y acciones humanas que permite la intervención exitosa del mundo. No todo el conocimiento es susceptible de apropiación pública ya que muchas veces se crean mercados de conocimiento; sin embargo, el conocimiento adquiere valor de muchas maneras y puede ser por razones estrictamente epistémicas, para apaciguar la ansiedad que genera la ignorancia, por razones estéticas, éticas, históricas, culturales o sociales. El conocimiento puede incorporarse en objetos, procesos y prácticas, los cuales pueden intercambiarse en un mercado y en otros casos como los que tienen que ver con el cuidado, la preservación o la restauración del ambiente la mercantilización resulta más difícil (Olivé, 2012).

La percepción social puede ser conceptualizada como la manera en que las personas construyen sus imágenes del ambiente y como crean significados a sus experiencias con los ecosistemas y con otros actores sociales (Castillo *et al.*, 2005). Las percepciones ambientales son entendidas como la forma en que cada persona aprecia y valora su entorno (Ramos Ribeiro *et al.*, 2014). Dado que la percepción ambiental es la forma en que las personas perciben los cambios en su entorno, se puede concluir que algunos componentes sociales de las sociedades humanas pueden afectar fuertemente su percepción, tales como: i) experiencia pasada; ii) visión social del valor económico de los recursos naturales; iii) visión social de recursos naturales no valiosos; y iv) conocimiento ecológico acumulado del área por la población. En resumen, la percepción ambiental puede estar limitada por los valores humanos sobre la naturaleza y puede ser extremadamente importante para

determinar las preocupaciones de la comunidad sobre los impactos ambientales (Castillo et al., 2005; 2004; Pinheiro, 2004; Silvano & Begossi, 2005).

Las interacciones entre humanos y su ambiente natural son fundamentales para la comprensión de los problemas ambientales y el estudio de estas puede proporcionar información valiosa para la gestión de los recursos naturales. En un estudio realizado dentro de un ANP en Noruega (Engen *et al.*, 2019) se investigaron las percepciones sobre la conservación entre personas locales que participaban en la gestión de diversas áreas protegidas. En dicho trabajo se analizó la relación entre las percepciones de las amenazas sobre los objetivos de conservación, las acciones de gestión prioritarias y la confianza en la gobernanza de las ANP. Como resultados se encontraron que las percepciones de conservación difirieron entre los propietarios y los representantes de la conservación de la naturaleza como las organizaciones no gubernamentales (ONG). Los propietarios percibieron como prioridad actividades como la agricultura moderna, el pastoreo, la producción de heno y la garantía de los intereses de los titulares; los propietarios tuvieron menor apoyo y estaban a favor de un enfoque centrado en "las personas y la naturaleza". Sin embargo, los representantes de la conservación de la naturaleza priorizaron las acciones de gestión para aumentar la biodiversidad y reducir el desarrollo de la tierra, tenían una mayor confianza en las autoridades medioambientales e identificaron el uso de vehículos motorizados como una amenaza para los valores de conservación; apoyaron mucho las áreas protegidas y estaban a favor de un enfoque de conservación que mitigara amenazas de la actividad humana (es decir, "la naturaleza a pesar de las personas"). En el estudio ambas percepciones fueron muy diferentes, lo cual demuestra que el contacto directo con un ANP y los vínculos que se establecen con el entorno modifican la percepción y por lo tanto las prioridades de los individuos sobre los recursos naturales.

En Camboya (Hing & Riggs, 2021) se elaboró un estudio a corto plazo sobre un programa dirigido por WWF (World Wildlife Fund) para apoyar las áreas protegidas comunitarias en Mondulkiri, Camboya; dicho programa tuvo como objetivo reducir las amenazas a los recursos destinados a la conservación mediante la generación de ingresos a través de empresas forestales comunitarias. En dicho estudio se aplicó un cuestionario diseñado para identificar los cambios en los conocimientos,

las actitudes y las prácticas de los miembros que participaron en la gestión forestal comunitaria. Los resultados mostraron que los beneficios percibidos estuvieron vinculados a atributos no monetarios como el acceso a la información y los recursos; los miembros percibieron mejoras en la gestión de los recursos naturales, pero expresaron su preocupación por las dificultades de gestión de las empresas forestales. La evaluación del programa a corto plazo sugirió que las áreas protegidas comunitarias en Camboya pueden tener un impacto positivo en la gobernanza comunitaria, pero planteó dudas sobre los resultados realistas. De acuerdo con los autores es necesario analizar las percepciones locales dentro de las áreas protegidas comunitarias, lo cual puede ayudar a fundamentar mejor los objetivos de los programas de conservación aplicados en las localidades.

Un estudio en México (Calva-Soto *et al.*, 2019) analizó el proceso de decreto y las características de gobernanza de la Zona de Preservación Ecológica Chicamole que protege al Bosque Mesófilo de Montaña. En dicho trabajo se generó un mapa de los actores sociales para identificar su esquema de organización; además, se aplicaron entrevistas semiestructuradas a las instituciones gubernamentales y a pobladores locales para analizar el decreto. Los resultados mostraron diferencias en la percepción, y también algunas coincidencias respecto al efecto de la conservación a partir de la legislación. Se observó que la presencia de normas comunitarias bien definidas señaladas en el decreto y que buscaban atender el uso de los recursos (sobre todo leña y agua), favorecieron la conservación del bosque. Este estudio de caso mostró cómo una pequeña área es importante en el contexto del sistema de ANP en México y los investigadores lograron identificar los principales retos, entre los cuales se incluyeron, el incremento de la interacción entre los sectores, lograr su reconocimiento local y fortalecer la organización social y el aprovechamiento sostenible de los recursos mediante la inclusión de actores. El estudio puso de manifiesto como las percepciones pueden señalar si las acciones aplicadas dentro de un ANP contribuyen a satisfacer no solo necesidades del espacio físico sino también las de la población.

## 9. MATERIALES Y MÉTODOS.

La presente investigación se abordó con enfoques cuantitativo y cualitativo. Por un lado, la naturaleza de los datos recolectados y su análisis fue numérico, en este caso nos referimos a las propiedades de los suelos. Por otra parte, se generaron datos cualitativos, los cuales fueron palabras, historias, relatos que refirieron los principales actores sociales y correspondieron con su percepción del estado del suelo, los recursos naturales y los servicios ecosistémicos dentro del parque. La razón para utilizar ambos enfoques de investigación fue el reconocer la naturaleza compleja del problema que abordamos. La calidad del suelo y la provisión de los servicios ecosistémicos que proporcionan no deben ser abordados solo con métodos cuantitativos o cualitativos por separado.

Esta investigación tiene un alcance descriptivo ya que caracteriza el objeto de estudio dando una visión general de tipo aproximado del suelo señalando sus características y propiedades dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Así como un alcance correlacional, ya que buscamos conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular, en nuestro caso indicadores de la calidad de suelo (Hernández-Sampieri *et al.*, 2014). Este trabajo es un acercamiento científico al problema de la Calidad del suelo y la sustentabilidad del ecosistema que se refleja en las funciones del suelo, así como en la percepción ambiental de los actores sociales involucrados.

### 9.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se determinaron aspectos importantes para la descripción de la zona de estudio con la ayuda del sistema de información geográfica ArcGis ver. 10.2.2.

Los elementos determinados fueron:

- Ubicación geográfica del PNIP (CONANP, 2012).
- Tipo de vegetación dentro del Parque (INEGI, 2017).
- Se generó el modelo digital de elevación (MDE) para la zona de estudio. Para lo cual se emplearon las siguientes cartas topográficas de INEGI escala 1:50 000 serie III:

Cuadro 6. Cartas topográficas utilizadas para elaborar el MDE.

Nombre	
E14B31	Chalco de Díaz Covarrubias (Edo. México)
E14B32	San Martín Texmelucan (Puebla)
E14B41	Ameca de Juárez (Edo. De México)
E14B42	Huejotzingo (Puebla)
E14B51	Cuatla (Morelos)
E14B52	Atlixco (Puebla)

#### CAMBIO DE USO DE SUELO.

Se utilizó el conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 de la serie I (INEGI, 1992) y la serie VI (INEGI, 2017) del conjunto Nacional de datos de INEGI para realizar un análisis de los cambios producidos a la cobertura vegetal (deforestación, degradación, revegetación, etc.), donde se consideraron principalmente los cambios ocasionados por las actividades antrópicas (Palacio-Prieto *et al.*, 2004). Para lo cual se utilizó la sobreposición geométrica de ambas cartas de uso de suelo y vegetación. Se calculó la tasa de cambio por categoría por medio de la siguiente fórmula:

$$C = \left( \frac{(T2)}{T1} \times \frac{1}{n - 1} \right) \times 100$$

donde:

C = Tasa de cambio

T1 = Año de inicio (con el que se quiere comparar)

T2 = Año actual o más reciente

n = Número de años entre T1 y T2

Finalmente, se obtuvo el mapa de cambio de vegetación del año 1992 al año 2017 utilizando ArcGIS, en el cual se trazó el polígono correspondiente al área del parque.

*DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DENTRO DEL PARQUE NACIONAL.*

En muchas ocasiones, los datos climáticos no están disponibles donde son necesarios, y para resolver este problema se han desarrollado diversos métodos estadísticos para predecir los valores en zonas sin estaciones climatológicas y más recientemente también se han desarrollado métodos geostatísticos. Aunado a la versatilidad de los sistemas de información geográfica y la inclusión de la mayoría de los principales métodos de interpolación en los programas informáticos comunes se ha facilitado en las últimas décadas el proceso de producción y comparación de los mapas climáticos (Vicente-Serrano *et al.*, 2003). En la actualidad el PNIP no cuenta con estaciones meteorológicas para el monitoreo de las condiciones climáticas, por lo que en este trabajo utilizamos la información de estaciones aledañas para elaborar mapas de la distribución de temperatura y precipitación a lo largo del PNIP, en el cuadro 7 se muestran las estaciones climatológicas utilizadas (El Kenawy *et al.*, 2010; CONAGUA-SMN, 2018). Utilizando la base de datos de la Comisión Nacional del Agua se obtuvieron los valores medios anuales de temperaturas y precipitaciones de 12 estaciones meteorológicas ubicadas alrededor del Parque.

Cuadro 7. Estaciones utilizadas para los cálculos climatológicos. CONAGUA-SMN, 2018.

ID Estación	Nombre de la Estación	Elevación (msnm)	UTM WGS84	
			X	Y
15082	Río Frío, Ixtapalucan	3000	535009.74	2139588.91
21213	San Martinito, Tlahuapan	2600	545517.18	2137767.77
21096	Santa Rita Tlahuapan, DGE	2740	543766.13	2137763.47
15018	Col. Ávila Camacho	2900	524511.18	2135883.13
29039	Esc. Agrop. Nanacamilpa	2700	547277.02	2134083.61
15106	San Rafael, Tlalmanalco	2530	526280.97	2122976.19
15007	Amecameca de Juárez	2479	524538.38	2115596.96
15080	Atlautla, Repetidora de T. V.	3750	538565.10	2113776.87
15015	Amecameca de Juárez (SMN)	2470	524540.85	2113752.82

15103	San Pedro Nexapa, Amecameca	2650	528053.12	2110069.56
21193	San Pedro Benito Juárez E-1	2200	547386.08	2091666.89
17045	Huecauasco E-7, Ocuituco	2197	533345.74	2091636.65

Se obtuvieron los valores medios mensuales de las temperaturas y precipitaciones de estaciones climatológicas que rodean el Parque durante el periodo comprendido entre 1986 y 2016. De cada estación climatológica se obtuvo su nombre, ubicación geográfica en coordenadas UTM y altitud. La información obtenida de las estaciones se integró en el sistema de información geográfica ArcGis 10.2.2. Posteriormente se utilizó el método de interpolación Kriging ordinario para obtener la información de las condiciones de temperatura y humedad dentro del Parque; para lo cual se trazaron las isotermas e isoyetas correspondientes.

#### *EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL*

El contenido de humedad del suelo es un parámetro costoso de medir por métodos directos pero que es importante determinar (Botey-Fullat & Moreno-García, 2015) y su estimación es una herramienta útil para la caracterización edafológica. Es posible calcularlo usando información climática de un largo periodo de tiempo y establecer una caracterización del balance hídrico de una localidad o región (Dourado-Neto *et al.*, 2010), de esta forma también es posible determinar el régimen de humedad del suelo (Staff, 1999).

El término “régimen de humedad del suelo” se refiere a la presencia o ausencia de agua subterránea o agua retenida a una tensión de menos de 1500 kPa en el suelo o en horizontes específicos durante el año; y es una propiedad importante de los suelos porque determina los procesos que ocurren en él. Con los valores obtenidos de las estaciones climatológicas se realizaron los cálculos y climogramas complementarios para conocer los regímenes de humedad y temperatura del suelo.

Para la obtención de la evapotranspiración potencial se utilizó el método de Thornthwaite (DGE,

1972) en el cual se considera que la humedad del suelo y la cobertura vegetal se encuentran en condiciones óptimas. La información de la temperatura media mensual se obtuvo de los años 1970 a 2000 con una precisión de 30 segundos (~1 km<sup>2</sup>) a 10 minutos (~340 km<sup>2</sup>) (Fick & Hijmans, 2017). Los archivos ráster se descargaron del sitio <http://www.worldclim.org/current>. El cálculo de la evapotranspiración potencial se realizó utilizando las siguientes ecuaciones:

1. Cálculo del índice térmico mensual. Se emplearon las temperaturas medias mensuales de enero a diciembre.

$$i_n = \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1.514}$$

En donde  $i_n$  corresponde al índice de calor mensual y  $T_m$  es la temperatura media mensual.

2. Índice de calor anual (I)

$$I = \sum_{n=1}^{n=12} i_n$$

En donde I corresponde al índice de calor anual,  $\Sigma$  corresponde a la sumatoria de los valores del índice térmico de todos los meses del año.

3. Exponente (a) corresponde a la constante propuesta por Thornthwaite.

$$a = 0.6751 * 10^{-6} * I^3 * -0.771 * 10^{-4} * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239$$

4. Evapotranspiración no corregida para cada mes.

$$ETo' = 1.6 * \left(\frac{10 * t}{I}\right)^a$$

En donde Eto corresponde a la evapotranspiración potencial mensual sin corregir en cm; t es la temperatura media mensual en °C, I es el índice de calor mensual y a, corresponde al exponente.

## 5. Evapotranspiración corregida.

$$ET_o = ET_o' * \frac{N}{12} * \frac{d}{30}$$

En donde  $ET_o$  es la evapotranspiración potencial mensual corregida (mm/mes),  $ET_o'$  es la evapotranspiración potencial mensual sin corregir,  $N$  es la duración máxima diaria media de las horas de fuerte insolación obtenidas de cuadro por latitud, en nuestro caso norte y  $d$  corresponde al número de días del mes.

Finalmente se sumaron los valores de evapotranspiración potencial mensuales para obtener el valor anual.

### *DISEÑO DE MUESTREO DE SUELOS.*

Se realizó la identificación de sitios de muestreo de cada subzona del ANP a partir de imágenes de percepción remota, tecnología de geoposicionamiento satelital (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG); los cuales facilitan situar los puntos de observación en posiciones representativas, al permitir identificar unidades morfológicas que están relacionadas con las unidades de suelos (Porta *et al.*, 1994). El muestreo se realizó conforme al procedimiento descrito a continuación:

Se muestrearon 4 sitios dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, cada uno se encuentra dentro de una subzona de ordenamiento del parque: subzona de preservación, subzona en recuperación y la zona de influencia (Figura 7).

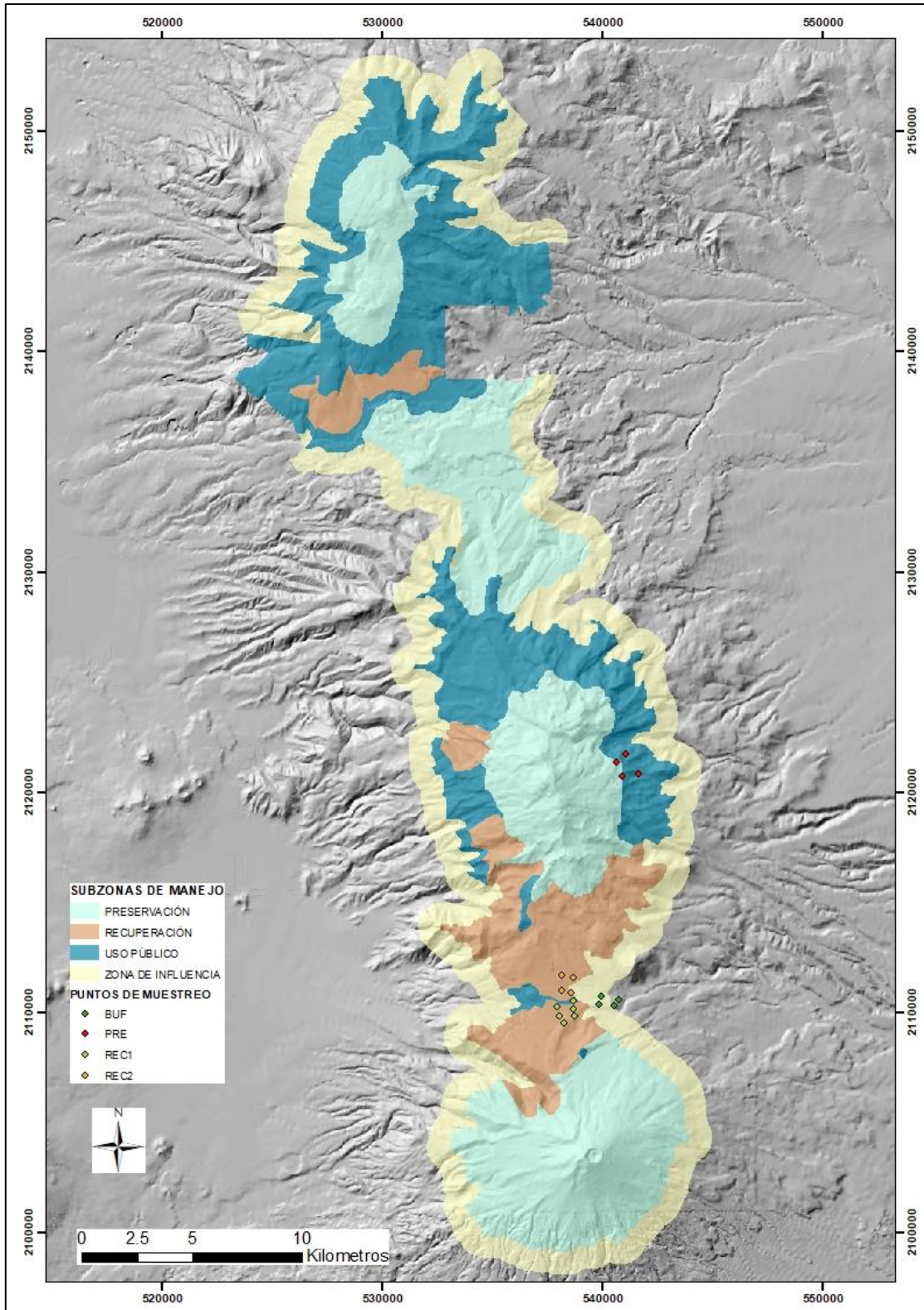


Figura 7. Mapa de sitios de muestreo dentro de las zonas estudiadas.

A continuación, se detalla la metodología de muestreo:

El patrón de muestreo dentro de cada sitio se definió en cuadrículas de  $4 \times 4$  puntos y la distancia entre cada punto fue de 250 m. Se recolectó la biomasa del mantillo dentro del cuadro de manera manual hasta alcanzar el horizonte superficial del suelo (Figuras 8 y 9).



Figura 8. Muestreo de mantillo (Fotografía propia)

Para la extracción de las muestras se utilizó una barrena y se procedió de la siguiente forma:

- Se enterró el barreno haciéndolo girar y se penetró el suelo como si fuera un tornillo, hasta los 25 cm y se extrajo la muestra. Se tomó muestra en cada esquina del marco de madera utilizado como referencia para la extracción del mantillo y adicionalmente se tomó una muestra en el centro.
- Se preparó una muestra compuesta con las 5 extracciones de suelo.
- La muestra se depositó en bolsas de plástico debidamente etiquetadas, indicando el número de muestra, fecha y ubicación.
- Se extrajo en cada punto de muestreo un cilindro de metal de  $100\text{g}/\text{cm}^3$  para llevar a cabo la prueba de densidad aparente.



Figura 9. Muestreo de suelo (Fotografía propia)

*PROSPECCIÓN EDÁFICA Y MUESTREO DE SUELOS PARA ANÁLISIS EN LABORATORIO Y SELECCIÓN DE SUELOS DE REFERENCIA.*

Las muestras de suelo provinieron del horizonte A de pedones de Andisoles previamente seleccionados mediante el uso del método inductivo de prospección edáfica denominado cartografía libre o razonada (Porta *et al.*, 1994), georreferenciando los puntos relevantes de las regiones en estudio y los sitios de muestreo durante los recorridos de campo. La calidad del suelo se evaluó midiendo un grupo mínimo de datos de propiedades del suelo para estimar la capacidad del suelo de realizar funciones básicas.

*DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y DE LAS DENOMINADAS COMO ÁNDICAS.*

Las muestras obtenidas fueron analizadas en los laboratorios de suelos del DICA-ICUAP, siguiendo los criterios, parámetros y procedimientos descritos en la Norma Oficial Mexicana NOM 021 (SEMARNAT, 2002), el manual de calidad y salud del suelo del departamento de agricultura de los Estados Unidos de América (USDA *et al.*, 1999) y metodologías establecidas para las propiedades ándicas de los suelos por la Soil Taxonomy (Staff, 1999). Para la clasificación de los

suelos se eligió la clasificación de la Soil Taxonomy ya que esta requiere el edafoclima a través del régimen de humedad del suelo (Alcalá-de Jesús *et al.*, 2001)

Los ensayos que se realizaron para evaluar la Calidad del Suelo fueron:

- Materia orgánica del suelo por Walkley y Black y carbono orgánico del suelo
- Nitrógeno total
- Relación Carbono-Nitrógeno
- pH del suelo en agua 1:2 y en KCl, así como delta pH ( $\Delta\text{pH}$ )
- Densidad aparente por el método del cilindro
- Capacidad de Intercambio catiónico y bases intercambiables por extracción con acetato de amonio y cloruro de sodio
- Saturación en bases
- Índice melánico

Cada una de las muestras fueron analizadas por duplicado y los valores medios fueron utilizados para los cálculos posteriores.

## 9.2 CONSTRUCCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD O SALUD DEL SUELO

Se utilizó el enfoque propuesto por Rinot (Rinot *et al.*, 2019) que consiste de los siguientes elementos:

1.1 Selección de atributos del suelo. Se seleccionaron los atributos más relevantes para describir el estado de la calidad del suelo, este paso fue crucial para la construcción del índice de calidad.

Los atributos debieron poseer ciertas características: a) Representar propiedades físicas y químicas del suelo, y procesos que ocurren en el sistema complejo del suelo; b) sensibilidad a las variaciones debidas al manejo, uso de la tierra, cambios en el clima, etc.; y c) disponibilidad y manejabilidad, mediciones precisas y eficaces; d) deben reflejar la

conexión entre las funciones del suelo y las metas de manejo, como productividad o servicios ambientales, prevención de la erosión, prevención de la contaminación del agua y el aire, conservación de la biodiversidad, etc. La selección de atributos se realizó con base en las propiedades inherentes del tipo de suelo estudiado, los Andisoles.

1.2 Para la construcción del índice de Calidad de suelo (CS) se realizó como primer paso la prueba de ANOVA para determinar si existían diferencias significativas entre los suelos de las subzonas de manejo del Parque Nacional para cada una de las variables estudiadas y se buscó disminuir el número de variables para obtener un conjunto de datos mínimo (CMD). El ANOVA permitió excluir atributos que no cambiaron significativamente bajo diferentes manejos.

1.3 Los indicadores que mostraron diferencia significativa en el ANOVA fueron sometidos a un análisis de componentes principales (ACP), el cual funcionó como una herramienta flexible que identificó los atributos más relevantes bajo distintas condiciones de manejo y permitió identificar las variables que fueron incluidas para el cálculo del ICS.

1.4 En el ACP se retuvieron las componentes con eigenvalores mayores a 1. Las variables altamente ponderadas dentro de cada una de las componentes fueron sometidas a un análisis de correlación de Pearson. Las variables altamente correlacionadas con aquellas mayormente ponderadas dentro del ACP fueron descartadas, lo anterior con la finalidad de reducir aún más el número de variables y conformar lo que se denomina el conjunto mínimo de datos (CMD). Esta forma de reducir el número de variables para el cálculo del ICS ha sido descrito y utilizado ampliamente en trabajos sobre calidad de suelo (Andrews *et al.*, 2002; Mukherjee & Lal, 2014; Yu *et al.*, 2018a). Todos los cálculos estadísticos fueron realizados con el software estadístico Minitab 19.

1.5 Una vez obtenidos los indicadores más sensibles que conformaron el CMD mediante el uso de ACP, se procedió a la estandarización de los valores para el cálculo del ICS. La

estandarización es la transformación de los datos que corresponden a diferentes atributos del suelo con la finalidad de poder ser comparados entre sí. Los valores medidos de determinados atributos fueron convertidos a datos numéricos o categóricos sin unidades. La estandarización representa la peor y mejor condición de la calidad del suelo (Prieto *et al.*, 2012), y para ello se emplearon los criterios "más es mejor", "menos es mejor", y "óptimo"; el criterio "óptimo" se refiere a aquellas propiedades que hasta un determinado nivel influyen positivamente, y más allá de este nivel son perjudiciales (Mukherjee & Lal, 2014). Los valores de cada indicador se obtuvieron a partir de los datos máximos y mínimos de cada variable estudiada. Las funciones lineales para obtener los valores de cada indicador se muestran en las ecuaciones 1 y 2.

$$\text{Más es mejor: } S_L = \frac{X}{X_{max}} \quad (1)$$

$$\text{Menos es mejor: } S_L = \frac{X_{min}}{X} \quad (2)$$

Donde  $S_L$  es la puntuación lineal que varía de 0 a 1,  $X$  es el valor de las propiedades del suelo,  $X_{max}$  y  $X_{min}$  son los valores máximos y mínimos de cada indicador de suelo respectivamente (Yu *et al.*, 2018b).

También se utilizó la curva sigmoidea (no lineal) para estandarizar los indicadores del CMD:

$$NL(Y) = \frac{a}{\{1 + (\frac{X}{X_0})^b\}} \quad (3)$$

donde  $NL(Y)$  es la puntuación no lineal de cada indicador que va de 0 a 1,  $a$  es el valor máximo (definido como  $a = 1$  en este estudio) alcanzado por la función,  $X$  es el valor del indicador seleccionado,  $X_0$  es el valor medio de cada indicador correspondiente a los suelos de las zonas de estudio,  $b$  es la pendiente de la ecuación, establecida como -2.5 para las funciones "más es mejor" y +2.5 o "menos es mejor" (Yu *et al.*, 2018b).

1.1 Integración. Para determinar la contribución relativa de cada uno de los atributos para la calificación final, el peso relativo de cada función del suelo puede ser igual o diferente (Yu *et al.*, 2018b). A continuación se integraron todos los valores de los indicadores en un ICS (Andrews *et al.*, 2004). Los valores estandarizados se integraron en dos ecuaciones diferentes:

$$SQI_W = \sum_{i_1}^n W_i S_i \quad (4)$$

$$SQI_A = \sum_{i_1}^n \frac{S_i}{n} \quad (5)$$

Donde  $ICS_W$  es el ICS ponderado y  $ICS_A$  es el ICS aditivo,  $\sum_{i_1}^n$  es la suma de los datos de 1 a n, n es el número total de indicadores,  $W_i$  es el factor de ponderación para la propiedad del suelo derivado del análisis factorial, y  $S_i$  es una puntuación lineal (L-ICS) o no lineal (NL-ICS). Finalmente, la ecuación se normalizó para producir un ICS máximo de 1. Se asumió que los valores de ICS más altos significaban una mejor función del suelo (Andrews *et al.*, 2002; Yu *et al.*, 2018b). Por último, los ICS calculados se compararon mediante un ANOVA para detectar la capacidad de diferenciar entre las distintas zonas de estudio y se calculó una matriz de relación para determinar si existía correlación entre los índices de calidad de suelo y si resultaría indistinto utilizar un índice u otro. También como complemento al ANOVA se realizó un análisis de la mínima diferencia para determinar que zonas de manejo del estudio eran similares o diferentes entre sí.

#### CONTRIBUCIÓN DEL SUELO A LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL PINP

Las funciones del suelo se encuentran estrechamente relacionadas a la calidad de suelo, enfatizando la multifuncionalidad de los suelos y sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Greiner *et al.*, 2017). La capacidad del suelo para proporcionar servicios ambientales está determinadas por sus funciones, y cada función del suelo individual contribuye a la provisión de servicios ambientales (Bouma, 2014).

En este estudio se consideraron y evaluaron tres funciones del suelo, los cuales son la base de la provisión potencial de los servicios ecosistémicos, los cuales fueron evaluados con un nivel diferente de aproximación (Wu *et al.*, 2013; Calzolari *et al.*, 2016; Greiner *et al.*, 2017; Drobniak *et al.*, 2018), se utilizó la información obtenida de los análisis del suelo de las distintas subzonas de manejo del PNIP. Las funciones consideradas fueron:

- 1) Hábitat para los organismos del suelo (BIO).
- 2) Filtración y amortiguación (BUF).
- 3) Almacén de carbono (AC).

$$X'i = (Xi - Xmin)/(Xmax - Xmin)$$

En donde: X'i es el valor estandarizado, y Xi es el valor inicial. Xmin denota el mínimo y Xmax el valor máximo.

El cuadro 8 muestra la contribución del suelo a los servicios ambientales, así como los indicadores utilizados para estimar las funciones del suelo que fueron evaluadas en este trabajo.

Cuadro 8. Contribución de los suelos a los servicios ecosistémicos Tomado de Calzolari *et al.*, 2016.

Categoría de SE (MEA, 2005)	Contribución del suelo a los SE (Dominati <i>et al.</i> , 2010)	Función del suelo (CEC, 2006)	Indicador o dato de entrada
Soporte	Hábitat para los organismos del suelo	Sumidero de biodiversidad (BIO)	Uso del suelo Densidad aparente Carbono orgánico
Regulación	Retención y liberación de nutrientes y contaminantes	Almacenamiento, filtrado y transformación de nutrientes, sustancias y agua (BUF)	Orgánico C pH (0-30) CIC Profundidad media de las aguas subterráneas poco profundas
Regulación	Secuestro de C	Sumidero de C (AC)	Carbono orgánico Densidad aparente

## 1. *Hábitat para los organismos del suelo (BIO).*

La función BIO fue utilizada en este trabajo como indicador del potencial del suelo para preservar la biodiversidad expresado por la fórmula:

$$\mathbf{BIO = (LogCOS - DA) + CBS}$$

En donde COS corresponde al contenido de carbono orgánico del suelo, DA corresponde a la densidad aparente y CBS (calidad biológica del suelo basado en la comunidad de artrópodos) corresponde al valor ligado al uso del suelo; alta = 1 para pastizales permanentes, áreas de turba y bosques; media = 0.5 para cultivos donde se practica la rotación con pastizales y para huertos sin labrar; baja = 0.25 para otros usos de la tierra (Calzolari *et al.*, 2016; Menta *et al.*, 2018).

La información del uso del suelo se obtuvo del plan de manejo del PNIP (SEMARNAT-CONANP, 2013) y del mapa de uso del suelo serie VI de INEGI (INEGI, 2017). Considerando sólo las propiedades inherentes del suelo, es probable que los suelos ricos en materia orgánica y no compactados sean potencialmente capaces de albergar una reserva de biodiversidad relativamente más alta (Gardi *et al.*, 2013).

## 2. *Filtración y amortiguamiento (BUF).*

Esta función es usada como un indicador de la capacidad de atenuación natural de los suelos. Los Andisoles son suelos por naturaleza ácidos, sin embargo, el incremento de la acidez por factores externos podría incrementar la liberación de Al que resulta tóxico para el ecosistema y los organismos vivos. Se tiene información de que la adición de Al suprime la respiración del suelo, la nitrificación y la captación microbiana de  $\text{NH}_4^+$  de la hojarasca de los pinos (Kraal *et al.*, 2009).

Para la evaluación de la función de filtración y amortiguamiento se consideraron: la capacidad de intercambio catiónico del suelo, CIC ( $<10 \text{ cmol kg}^{-1}$  o  $>10 \text{ cmol kg}^{-1}$ ), el pH ( $<6.5$  o  $>6.5$ ) de la capa superficial (25 cm) y el contenido de fragmentos ( $<30\%$  o  $>30\%$  en los primeros 100 cm).

Para ajustar los valores de la función final se consideró que, si el pH era  $<4.5$  el índice de capacidad de atenuación natural se redujo en 0.25 ya que en este pH se vuelve considerable la liberación de

Al (Kunito *et al.*, 2016). El índice de capacidad de atenuación natural se redujo en 0.25 en el caso de los suelos de baja CEC y en 0.5 en el caso de los suelos de alta CEC y en caso del contenido de fragmentos en los primeros 100 cm si era >35% la atenuación se redujo 0.25 en caso de ser <35% no hubo reducción. Debido a que el nivel freático se encuentra por debajo de los 100 cm la fórmula utilizada fue la siguiente (Calzolari *et al.*, 2016):

$$\text{BUF} = \text{Log CIC (pH, sk)} - 1 * (\text{profundidad del suelo (cm)}/100)$$

En donde CIC es el valor de capacidad de intercambio catiónico, pH indica el valor de pH en agua, sk el contenido (%) de fragmentos rocosos y su respectiva reducción a la atenuación natural del suelo.

### 3. Reserva de carbono

Dentro de los servicios ecosistémicos de regulación están involucrados tanto el ciclo hidrológico como los ciclos biogeoquímicos; entre estos últimos se incluye el ciclo de carbono. El almacenamiento de carbono y su liberación por los ecosistemas forestales, ya sea a causa de la forestación, la reforestación o la deforestación, están considerados en el Artículo 3.3 del Protocolo de Kyoto (FAO, 2002). El suelo es considerado como un sumidero de carbono y evalúa la cantidad almacenada. Los datos ingresados para calcular la función del suelo fueron: materia orgánica del suelo, profundidad, densidad aparente y pedregosidad (FAO, 2017).

$$\text{Reserva de Carbono (AC)} = p * \text{DA} * \text{C} * \text{FCpd}$$

En donde p es la profundidad del horizonte (m), DA es la densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>), C total es el contenido de carbono y FC es el factor de corrección de pedregosidad ((1-% piedras)/100).

Los resultados para cada una de las funciones evaluadas por zona de estudio fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) para analizar el efecto de la zonificación del parque para cada

una de las funciones del suelo evaluadas. También se realizó la prueba de la mínima diferencia de Fisher para determinar qué zonas fueron diferentes entre sí.

### 9.3 PERCEPCIÓN AMBIENTAL

#### *IDENTIFICACIÓN DE LOS ACTORES SOCIALES*

Los actores sociales tienen un sistema de valores que condiciona su interacción con el mundo, lo cual debe considerarse al describir y formular alternativas de manejo de los sistemas sociales-ecológicos (Ungar & Strand, 2005). Los informantes clave o actores principales fueron elegidos por ser personas relevantes en las zonas de estudio, ya sea por su implicación en las actividades que se desarrollan, el tiempo que han vivido dentro o cerca del parque, por su conocimiento de la realidad o capacidad mayor de decisión o influencia en la vida de la comunidad (Revilla, 2016). Para la aplicación del instrumento se buscó la mayor diversidad posible en la selección de los informantes. Los actores sociales principales son:

- Participantes del programa fábrica de agua
- Recolectores
- Pastores
- Campesinos
- Guarda Parques
- Investigadores
- Divulgadores científicos

Los entrevistados firmaron documentos de consentimiento para garantizar su anonimato y el derecho a ser informados sobre el uso de la información personal recolectada.

#### *BENEFICIOS QUE EL SUELO TRAE A LA COMUNIDAD.*

El conocimiento de los locales es un recurso valioso que puede contribuir a la investigación científica de la calidad del suelo (Gruver & Weil, 2007). Uno de los instrumentos utilizados para

recolectar datos de la realidad es el cuestionario. Se aplicó un cuestionario oral a través de una entrevista semiestructurada personal y se registraron las respuestas por el entrevistador (Corral, 2010). Además, se aplicó un cuestionario cuyo objetivo fue obtener información que relacionara la percepción de las personas sobre la salud del suelo.

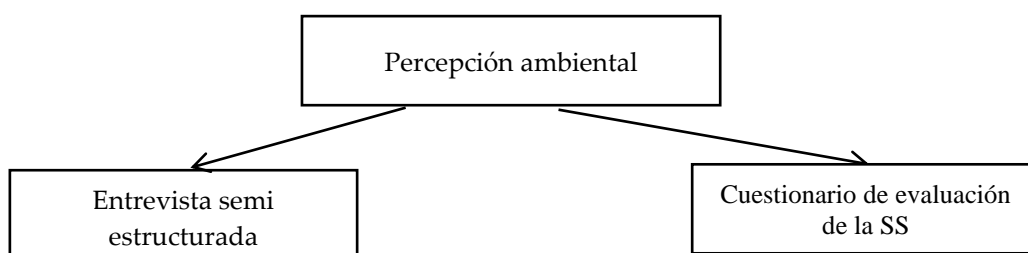


Figura 10. Instrumentos de medición utilizados para evaluar la percepción ambiental de los actores principales.

#### ENTREVISTA SEMIESTRUCTURADA

El instrumento estuvo conformado por 20 preguntas, las preguntas indagaron aspectos sobre: conocimiento de la ubicación geográfica y límites, actividades que desempeñan los actores sociales dentro del parque, las funciones del parque a nivel ambiental, problemáticas ambientales, modificaciones del paisaje, servicios ambientales, amenazas y bienestar humano. El objetivo de las preguntas fue identificar eficacia y amenazas que enfrenta el Parque Nacional en su capacidad para funcionar como un instrumento de conservación del suelo, de los ecosistemas y la biodiversidad. La variable medida fue del tipo cualitativa, lo cual pretendió abordar la percepción ante los servicios ambientales que proporciona el Parque Nacional. En el Anexo 1 se muestran las preguntas utilizadas para evaluar la percepción social en cuanto al estado del Parque Nacional.

#### SISTEMA DE PUNTUACIÓN PARA LA SALUD DEL SUELO

El significado de calidad de suelo se ha trasladado más allá de la productividad del suelo para abarcar la calidad ambiental, la seguridad alimentaria, la salud animal y humana (Parr *et al.*, 1992; Doran & Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997). Los agricultores también ven los defectos de la antigua definición que limita la calidad del suelo para rendir el potencial y los niveles de nutrientes. La

salud del suelo, un término más integrador que algunos agricultores prefieren a la calidad del suelo, es reconocida y evaluada por los agricultores utilizando las propiedades indicadoras y los sistemas de objetivos que no son de suelo (Harris & Bezdicek, 1994). Los agricultores utilizan principalmente medios cualitativos o sensoriales además de los datos cuantitativos para determinar la calidad del suelo (Roming *et al.*, 1995). Las herramientas o índices desarrollados para medir la calidad del suelo, ya sea para investigación, la explotación agrícola o los fines reglamentarios, deben integrar tanto los aspectos sensoriales como los cuantitativos (Granatstein & Bezdicek, 1992).

Los enfoques descriptivos e integradores utilizados por los agricultores para caracterizar la salud del suelo proporcionan un mecanismo para la evaluación de campo y la vigilancia de la calidad del suelo por los científicos y los agricultores. Un ejemplo de enfoque descriptivo desarrollado para la evaluación integral de la salud del suelo fue desarrollado por la Universidad de Wisconsin. El cual es un sistema de puntuación que se centra en 4 factores ambientales importantes, el ecosistema del suelo, la producción de los cultivos, la protección ambiental y la salud humana y animal. El sistema es una herramienta de campo para monitorear y mejorar la salud del suelo basado en la experiencia del trabajo de campo, así como del conocimiento que se adquiere al trabajar con el suelo y al relacionarse con el ecosistema. Para el fin de conocer la percepción de los actores sociales involucrados en cuanto al estado del suelo dentro del Parque Nacional se utilizó el sistema de puntuación de la Universidad de Wisconsin (Sarantonio *et al.*, 1996). En el anexo 2 se muestran el sistema de puntuación que fue modificado para posteriormente ser aplicado a los distintos actores sociales que participaron en el estudio.

El sistema de puntuación de salud del suelo se aplicó a 14 personas involucradas en el manejo y cuidado del PNIP y las respuestas reflejaron su conocimiento sobre el estado general del suelo. Las preguntas se dividieron en 4 secciones, en las cuales se indagó sobre las propiedades del suelo, las plantas y árboles, los animales y el agua.

En cada una de las evaluaciones se contaron el número de variables que estuvieron dentro de cada categoría, saludable, deficiente o no saludable. El número obtenido para cada categoría se dividió

entre el número total de preguntas contestadas (25) y se multiplicó por 100% para obtener el porcentaje dentro de cada categoría. Las categorías corresponden a los siguientes valores:

Cuadro 9. Categorías para la evaluación de la salud del suelo.

	Número	%
Saludable		
Puntuación de 3 a 4		
Deficiente		
1.5 a 2.5		
No saludable		
0 a 1		
Total		100

Las evaluaciones fueron examinadas para conocer la distribución de las propiedades de los indicadores dentro de tres categorías de salud. Lo ideal sería que todas las propiedades puntuaran en la categoría saludable. Aquellas propiedades que fueron deficientes o no saludables fueron consideradas de acción urgente y monitoreo para determinar causas e incrementar o mejorar la condición. En este estudio se consideró cada una de las propiedades evaluadas como igual de importantes, ya que los bosques y los suelos forestales desempeñan un papel amplio, complejo e interactivo en el medio ambiente y estos se encuentran intrínsecamente ligados, con un enorme impacto mutuo con el medio ambiente en general (FAO, 2015).

## 10. RESULTADOS

## 10.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El PNIP se encuentra ubicado en la parte central del Eje Volcánico Transmexicano, ocupa parte de la Sierra Nevada en su porción sur y la Sierra de Río Frío en la parte norte. El parque se localiza entre las coordenadas geográficas 18° 59' 45" y 19° 25' 45" de latitud norte y 98° 38' 58" y 98° 52' 58" de longitud oeste. El parque se encuentra en los municipios Texcoco, Ixtapaluca, Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo en el Estado de México; en los municipios de Tlahuapan, San Salvador El Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco, en el estado de Puebla; y en el municipio de Tetela del Volcán en el estado de Morelos (Hernández-García & Granados-Sánchez, 2006) (Figura 11). La posición geográfica de este complejo divide dos de las cuencas más importantes del país, la cuenca de México y la cuenca de Puebla-Tlaxcala. Sus formaciones geológicas, (colinas, conos volcánicos y laderas) son de origen volcánico con predominio de rocas basálticas y andesíticas. La altitud varía entre los 2589 m sobre el nivel del mar y los 5452 m (Hernández-García & Granados-Sánchez, 2006).

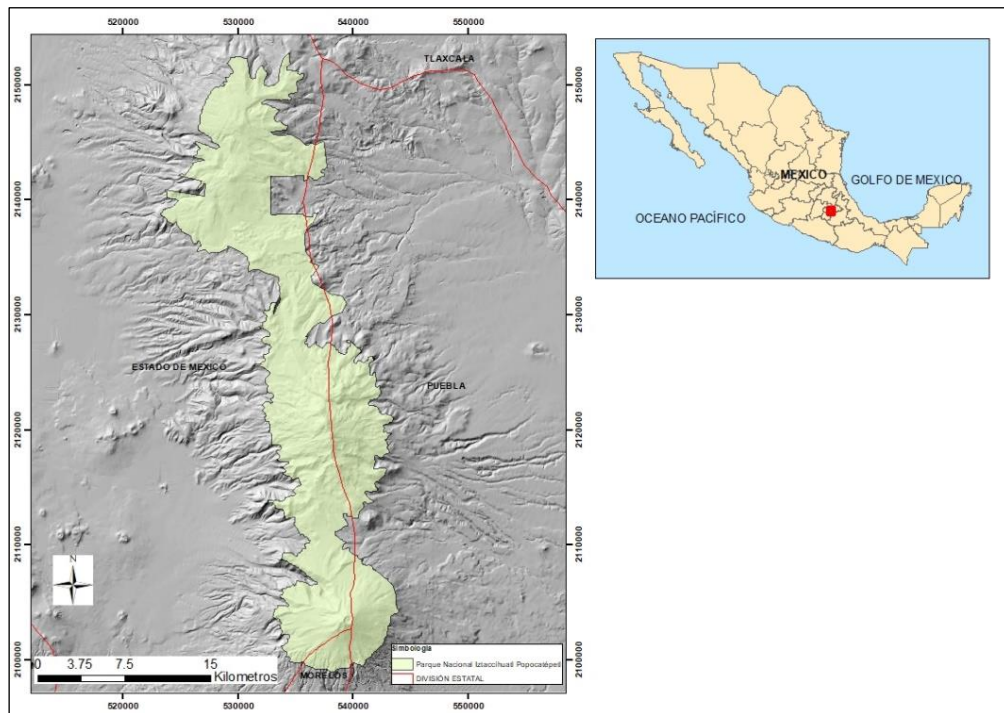


Figura 11. Mapa de ubicación del PNIP (SEMARNAT, 2013).

## VEGETACIÓN Y CAMBIO DE USO DE SUELO

Uno de los principales problemas ambientales de México es la deforestación la cual ha alcanzado cifras considerables, observándose esta devastación incluso en áreas naturales protegidas (CCMSS, 2008). La vigilancia de los cambios en la cobertura vegetal es una herramienta valiosa para la detección de riesgos de forma oportuna. En la figura 12 se muestra el tipo de vegetación presente en el parque de acuerdo con INEGI para los años 1992 y 2017 (Series I y VI). Se observa que en las zonas más altas prevalece el pastizal alpino y el bosque de pino principalmente en las zonas que rodean los volcanes. En las partes más bajas podemos encontrar bosque de pino, encino y oyamel, comparando los mapas se pueden apreciar algunas modificaciones en la cobertura vegetal.

La figura 13 muestra el mapa de tipo de cambio de uso de suelo del año 1992 al año 2017. De acuerdo con el mapa obtenido del cambio de uso de suelo, 274 km<sup>2</sup> de superficie se encuentran conservados, lo cual refiere al área en donde la cobertura vegetal se ha mantenido. El área deforestada de 10 km<sup>2</sup> correspondió a la cantidad de suelo que cambió de bosque a zonas de cultivo, a pastizales inducidos o cultivados o incluso a uso urbano. El área que cambió por actividad productiva, en donde anteriormente existía alguna cobertura de origen antrópico (pastizal inducido o cultivado), pero ahora tiene otra actividad fue de 5 km<sup>2</sup>. El área reforestada en donde anteriormente se realizaba alguna actividad agropecuaria y actualmente es ocupada por bosque o pastizal fue de 6 km<sup>2</sup>. El área sin cambio en donde el uso del suelo correspondía a pastizal inducido o cultivado, cultivos y otros usos que no ha cambiado correspondió a 64 km<sup>2</sup>. El área en transición fue de 38 km<sup>2</sup> y se refiere a aquella en donde antes hubo alguna actividad agropecuaria y actualmente es ocupada por vegetación secundaria de bosque de pino o de encino (Cuadro 10).

Cuadro 10. Superficie de cambio del año 1992 al 2017.

Tipo de cambio (Palacio-Prieto <i>et al.</i> , 2004)	Km <sup>2</sup>
Conservada	274
Deforestada	10
Por actividad productiva	5
Reforestación	6
Sin cambio	64
Transición	38
TOTAL	397

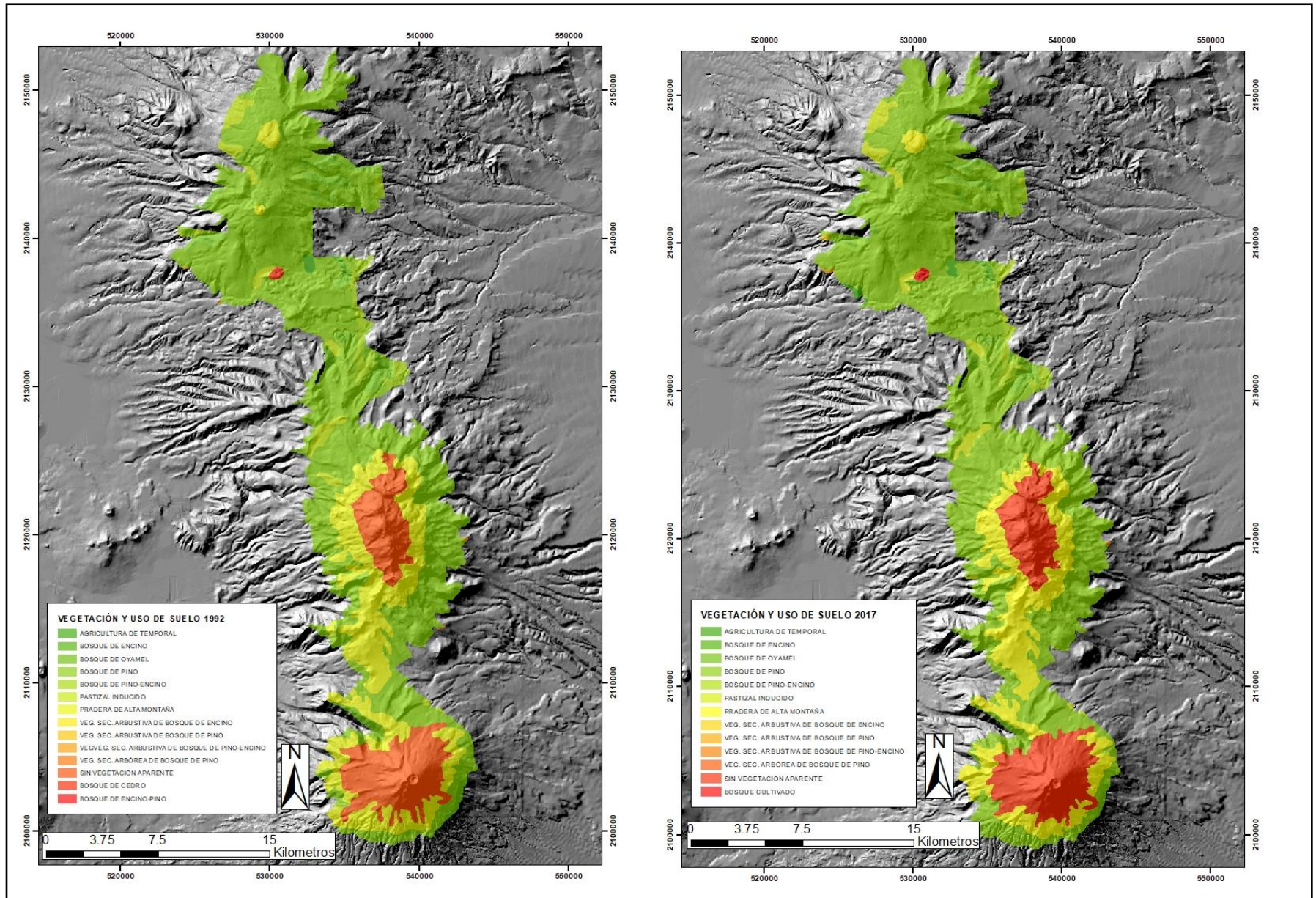


Figura 12. Mapas de vegetación dentro del PNIP (1992-2017). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del Suelo y vegetación. 60  
Escala 1: 250 000. Series I y VI.

Por lo observado en el análisis del cambio de uso de suelo podemos señalar que las zonas que sufrieron deforestación podrían mostrar cambios negativos en las propiedades del suelo.

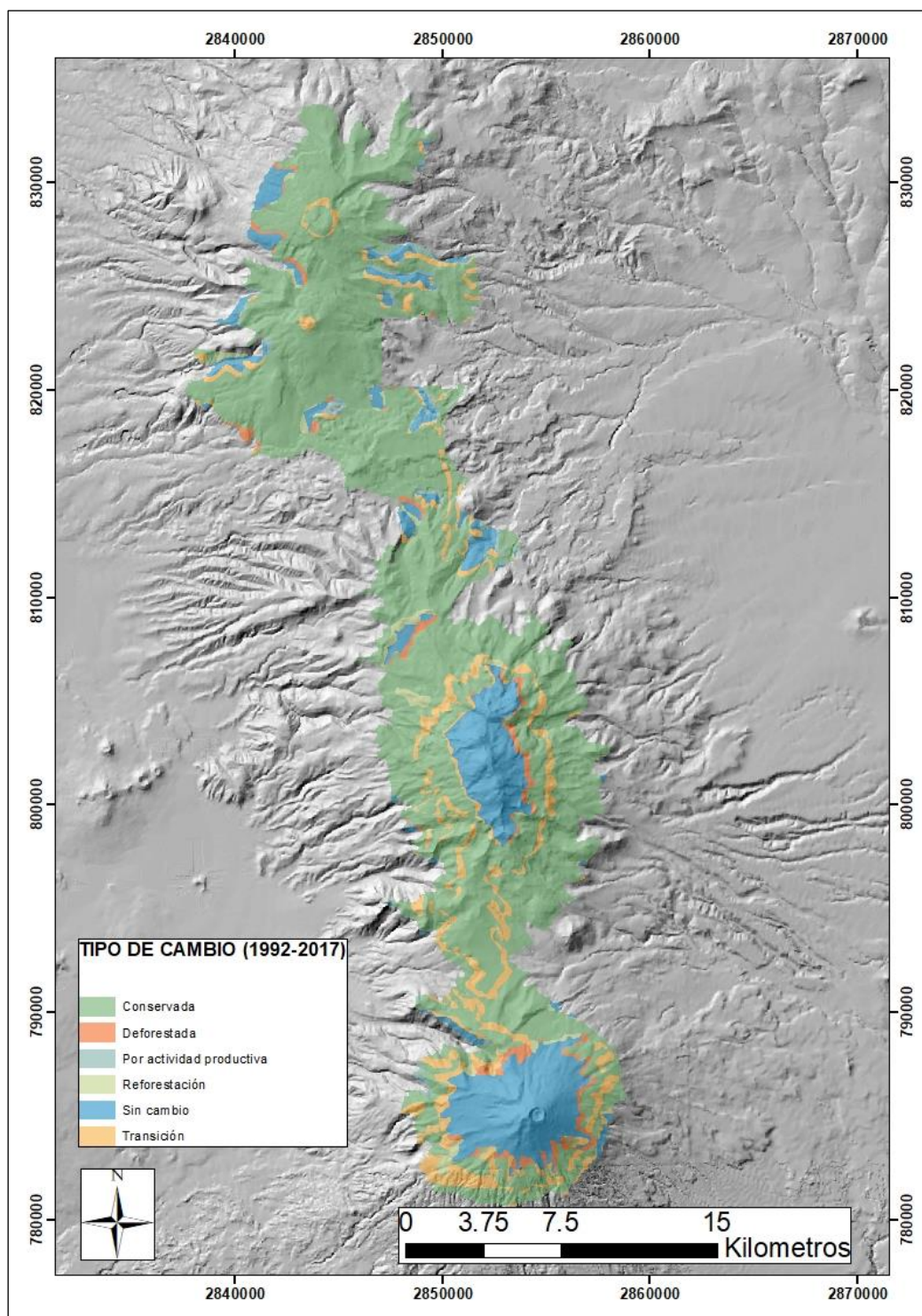


Figura 13. Mapa de cambio de uso de suelo (1992-2017). Calculado a partir del conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación a escala 1:250 000.

*DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN MEDIA EN LA ZONA DE ESTUDIO.*

El análisis climatológico dentro del área de estudio indicó que la temperatura y la elevación están altamente correlacionadas ( $r^2=0.7744$ ), conforme aumenta la elevación la temperatura va disminuyendo. La determinación de la distribución de la temperatura se realizó en el SIG ArcMap 10.2.2, para lo cual se emplearon la ecuación de la recta expresada en la figura 14 y el MDE (modelo digital de elevación) de la zona de estudio, el cálculo se llevó a cabo en la calculadora ráster del programa. Podemos observar, que las temperaturas dentro de la zona de estudio van de los 12°C en las zonas bajas y va descendiendo hasta temperaturas por debajo de los 0°C en las zonas más altas, las cuales corresponden con los picos de ambos estratovolcanes (Figura 15). Como se muestra en el cuadro 11, la temperatura media anual del PNIP fue de 8.1°C.

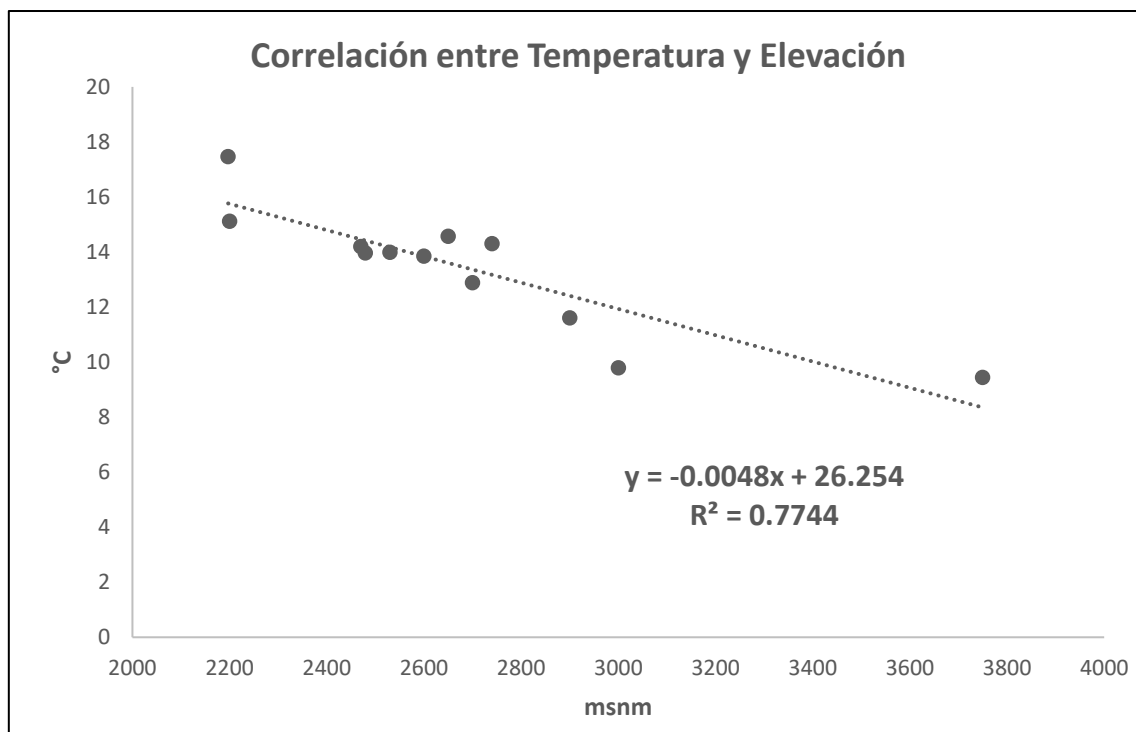


Figura 14. Correlación entre la temperatura y las elevaciones dentro del PNIP.

Cuadro 11. Temperatura media en el PNIP, con datos de CONAGUA-SMN, 2018.

Clases Temperatura °C	Temperatura Media °C	Superficie (km <sup>2</sup> )	W (Peso)	W*Temperatura Media (°C)
menor 0	0	273.9	0.0	0.0
0-2	1	2508150.0	0.0	0.0
2-4	3	11746951.3	0.0	0.1
4-6	5	33657604.0	0.1	0.4
6-8	7	104333553.1	0.3	1.8
8-10	9	168246297.9	0.4	3.8
mayor 10	10	77702763.9	0.2	2.0
Sumatoria		398195594.2	1.0	8.1

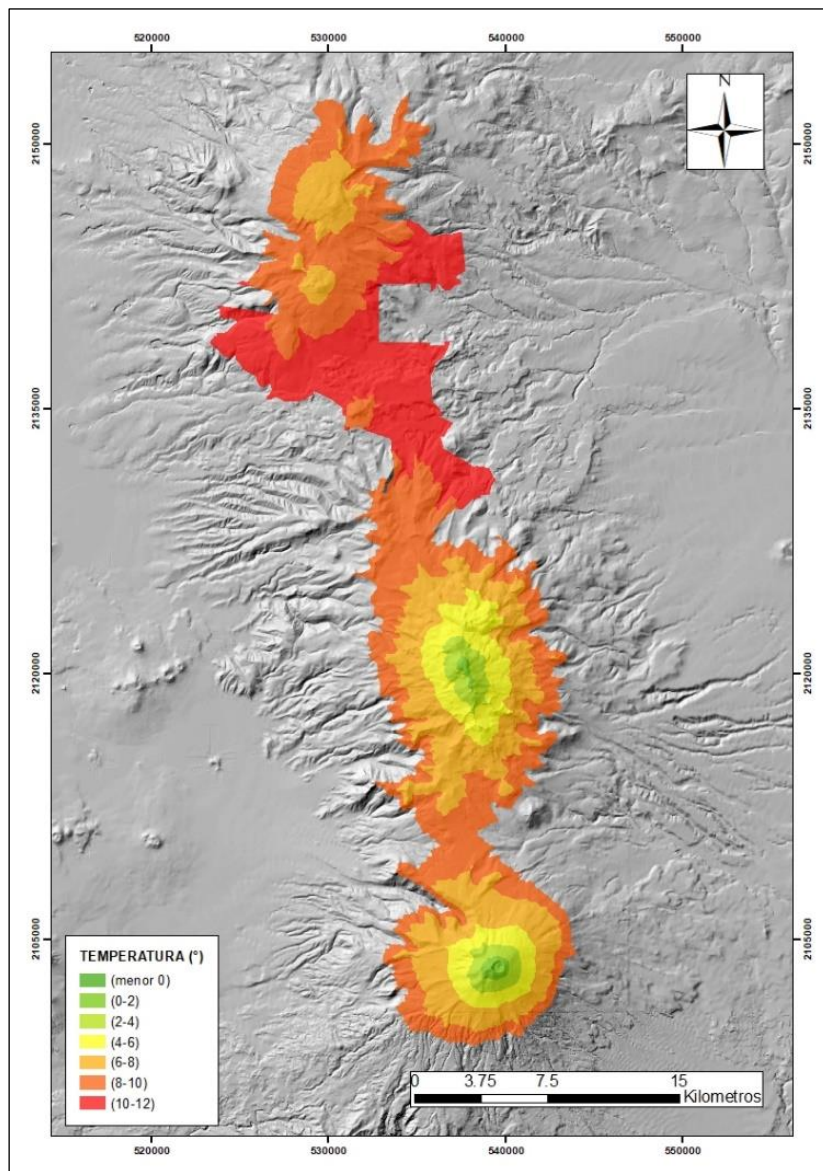


Figura 15. Mapa de Isothermas del PNIP.

Para obtener el mapa de precipitación se utilizó el método de Interpolación Kriging ordinario con un modelo de variograma esférico y un tamaño de celda de 20 m. La figura 16 muestra el mapa con los valores de precipitación anual, así como la distribución de acuerdo a la altura y superficie; en el cuadro 12 se pueden observar los datos de precipitación y su distribución a lo largo de la superficie de estudio; la precipitación anual fue de 913 mm.

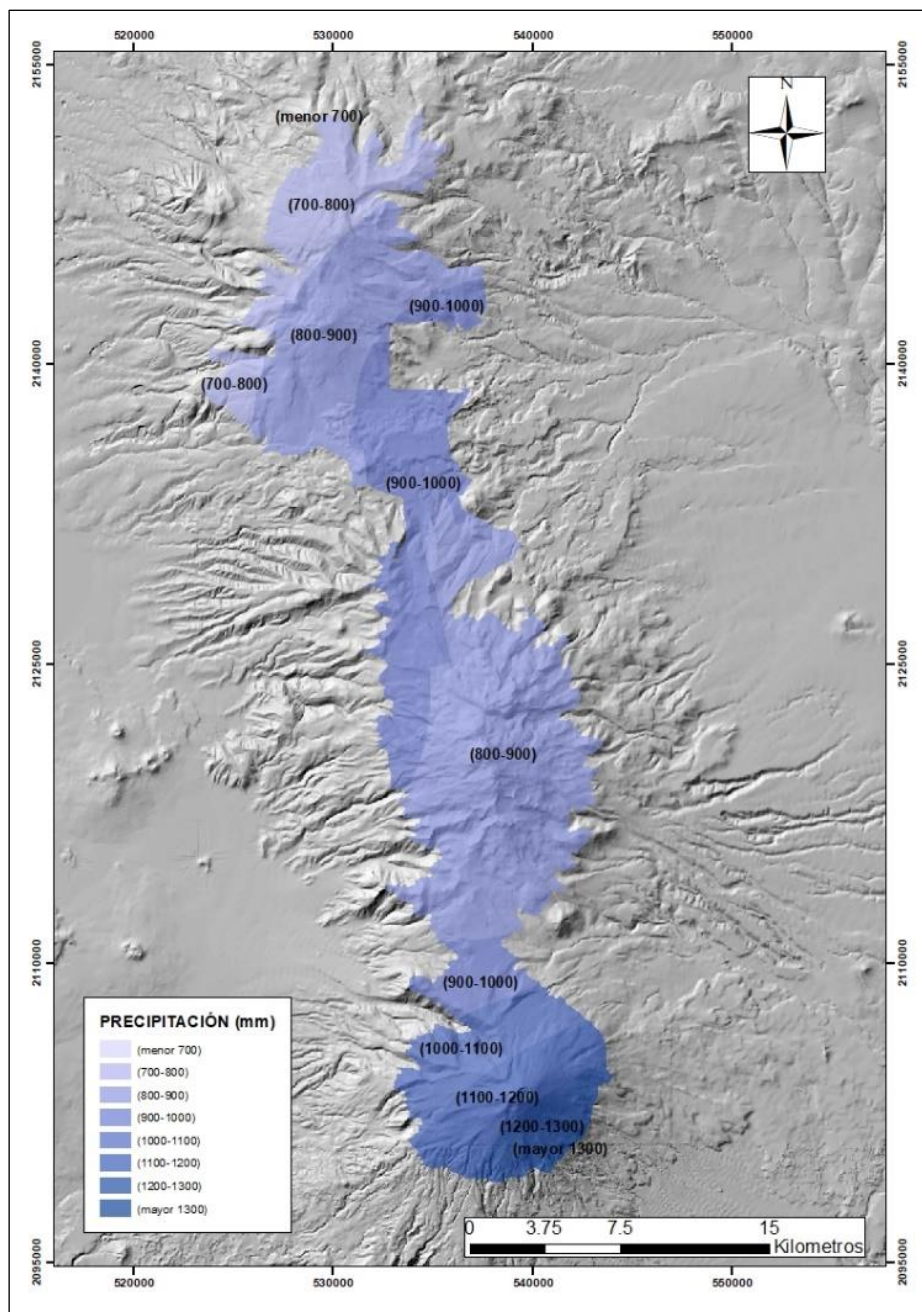


Figura 16. Mapa de precipitaciones dentro del PNIP.

Cuadro 12. Precipitación anual en el PNIP, con datos de CONAGUA-SMN, 2018.

<b>Clases (mm)</b>	<b>Precipitación (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Precipitación media (mm)</b>	<b>W (Peso)</b>	<b>W* Precipitación media (mm)</b>
(menor 700)	0.00	700	2.00914E-06	0.00
(700-800)	45.83	750	0.115098851	86.32
(800-900)	194.36	850	0.48813343	414.91
(900-1000)	84.07	950	0.211141511	200.58
(1000-1100)	27.40	1050	0.068822301	72.26
(1100-1200)	28.68	1150	0.072037163	82.84
(1200-1300)	16.09	1250	0.040420452	50.53
(mayor 1300)	1.73	1300	0.004344284	5.65

*DETERMINACIÓN DE LOS REGÍMENES DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DE LOS SUELOS.*

El principal factor formador del suelo que determina el régimen de humedad del suelo es el clima. De acuerdo con los criterios de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff - NRCS/USDA, 2014), el término régimen representa la sucesión normal de los estados de humedad y sequía a lo largo del tiempo, expresando el porcentaje de variación de la humedad del suelo. La "Soil Taxonomy" define cinco clases de régimen de humedad y cinco clases de regímenes de temperatura del suelo. Los regímenes de humedad del suelo son: acuico (L. aqua, agua), údico (L. udus, húmedo); ústico (L. ustus, quemado; implica sequedad), xeric (Gr. xeros, seco), arídico y tórrico (L. aridus, y L. torridus, caliente). Los regímenes de temperatura del suelo son: cryico (Gr. kryos, frialdad; significa suelos muy fríos,  $0\text{ }^{\circ}\text{C} < x < 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  en verano es muy frío), frígido ( $0\text{ }^{\circ}\text{C} < x < 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  más cálido en verano que un régimen cryico), méxico ( $8\text{ }^{\circ}\text{C} < x < 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  la diferencia entre las temperaturas medias del suelo en el verano y el invierno es mayor que  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), térmico ( $15\text{ }^{\circ}\text{C} < x < 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  la diferencia entre las temperaturas medias del suelo en el verano y el invierno es mayor de  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), hipertérmico ( $x \geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  la diferencia entre las temperaturas medias de verano e invierno es mayor que  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

En 1992 la CONABIO (Maples-Vermeersch, 1992) reportó que los tipos de regímenes de humedad presentes en el parque son ácuico, údico y ústico. El régimen de humedad del suelo clasificado como ácuico fue reportado principalmente en la zona del volcán Iztaccíhuatl por arriba de los 3400

msnm; el régimen údico en la zona media norte del volcán Popocatepetl hasta la parte norte del PNIP y el régimen ústico se encontró en la zona más al norte del parque en una pequeña área y en la parte media sur del volcán Popocatepetl (Figura 17). Sin embargo; destaca que el régimen ácuico indica un exceso de agua en el suelo durante todo el año creando un medio reductor en ausencia de oxígeno, sin embargo, el relieve de la zona impide que el nivel de agua se estanque en la superficie debido a las pendientes presentes, las cuales evitan la saturación del suelo y, por lo tanto, podemos señalar que es impreciso asegurar que el suelo se encuentre en este estado de reducción y libre de oxígeno incluso durante pocos días del año.

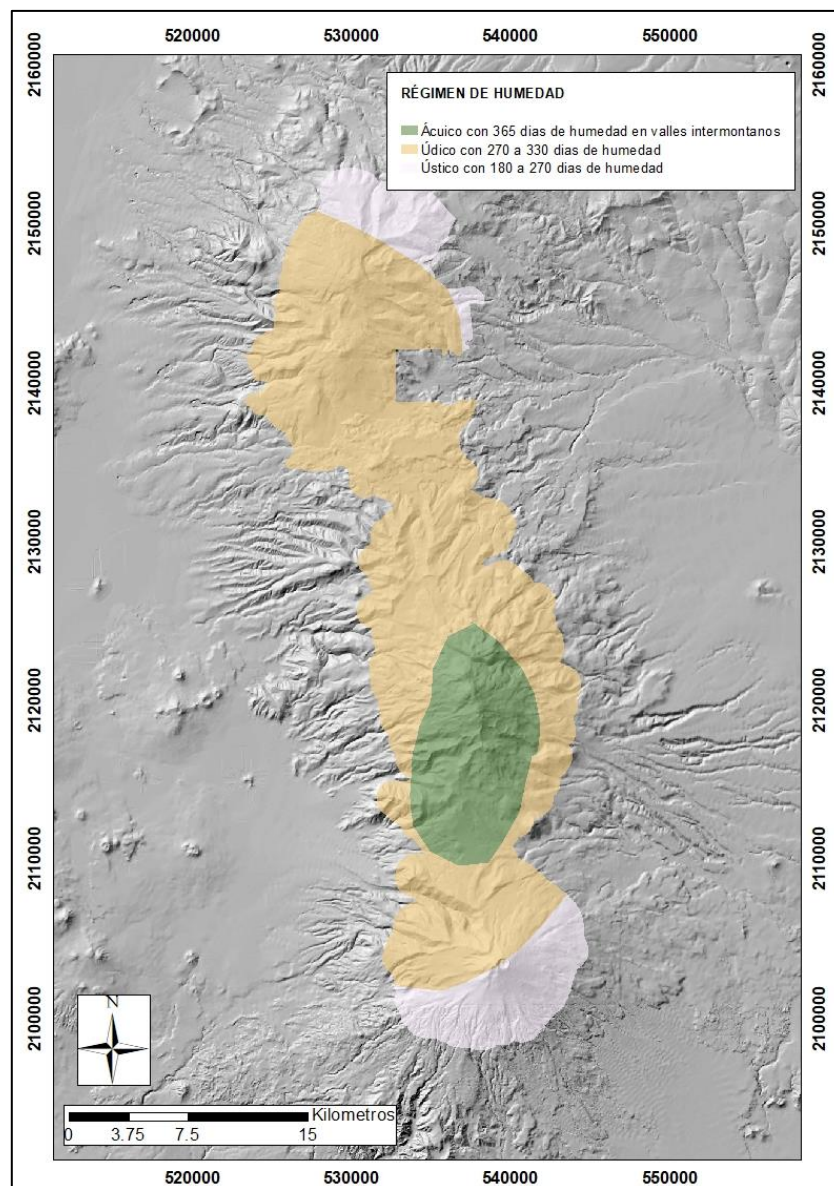


Figura 17. Regímenes de humedad. Consultado en CONABIO, 2008 (Maples-Vermeersch, 1992).

La figura 18 muestra el mapa de evapotranspiración potencial del parque elaborado a partir de la información de estaciones meteorológicas cercanas. En la cual se puede apreciar que la evapotranspiración disminuye conforme aumenta la altitud. El valor más elevado de evapotranspiración fue de 409 mm. Sin embargo, podemos observar que la evapotranspiración es menor que la precipitación, por lo tanto, no se observa deficiencia de agua considerable y buena parte del agua es almacenada o aprovechada por las plantas.

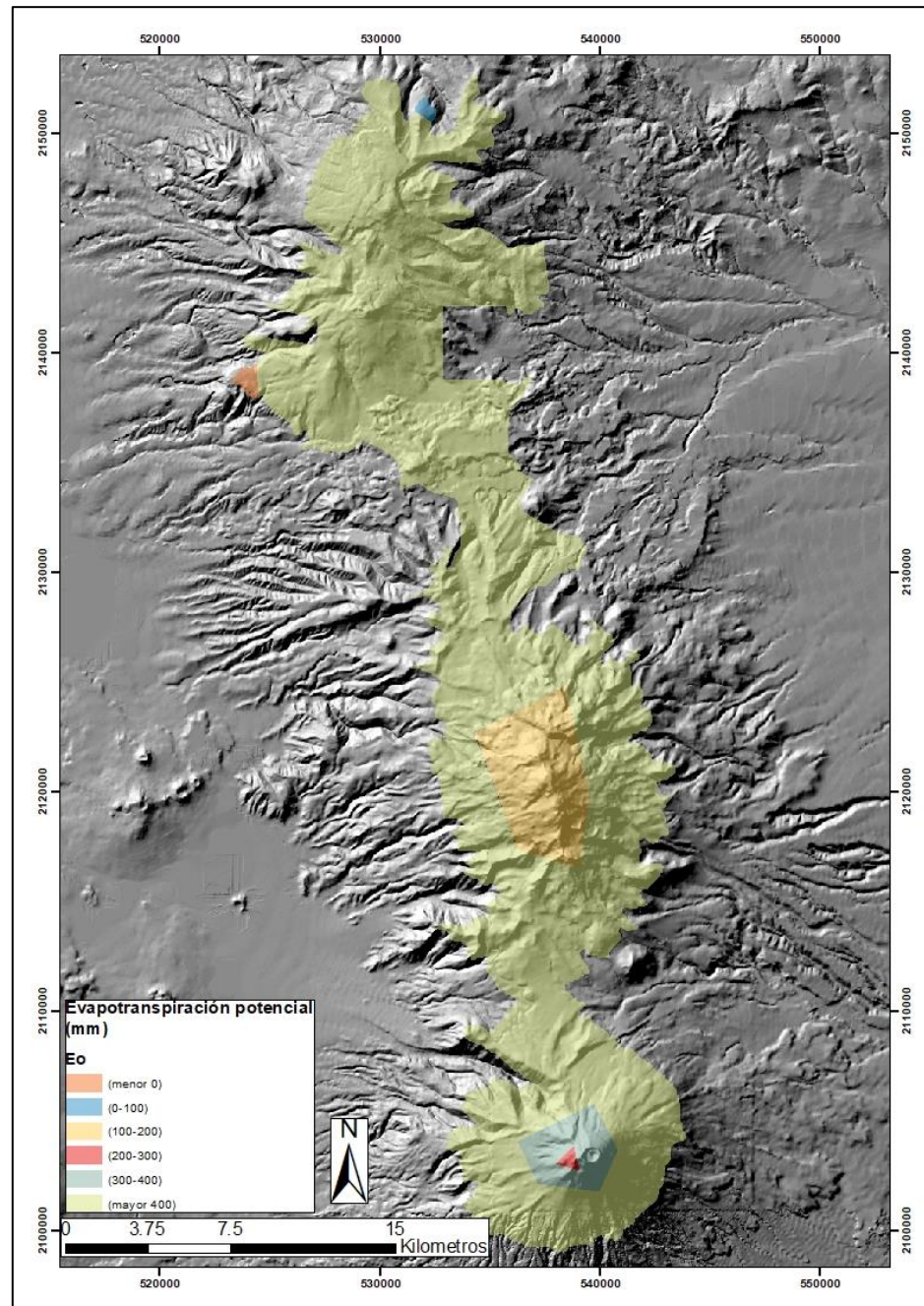


Figura 18. Mapa de Evapotranspiración anual del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Posteriormente se graficaron los climogramas complementarios para determinar el balance hídrico del suelo en la zona de estudio, el cual se calculó con datos de la evapotranspiración potencial mediante el segundo sistema del Dr. C. W. Thornthwaite (DGE, 1972). En todas las estaciones climáticas se observó que durante los meses de enero a abril el suelo presentó deficiencia de humedad de 5 cm; posteriormente durante los meses de mayo a octubre, se detectó la temporada de lluvias en la cual se acumulan 10 cm de humedad en el suelo principalmente en los meses de junio, julio y agosto (meses de verano) y se observó un incremento de la precipitación. Durante los meses de octubre y noviembre se registró un aprovechamiento de agua de 5 cm lo cual proviene de la acumulación de agua en el suelo de los meses de lluvia. En cada estación la precipitación no fue mayor que la evapotranspiración durante el invierno por lo que se observó deficiencia de humedad durante estos meses (diciembre, enero y febrero). En los meses de verano se observó demasía de agua en el suelo lo cual podría indicar un incremento de riesgo por erosión hídrica sobre todo en aquellas zonas desprovistas de vegetación (Figura 19).

Los regímenes de humedad de los suelos en las estaciones meteorológicas que rodean el PNIP se clasificaron conforme lo establecido por la "Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff - NRCS/USDA, 2014) con los datos de los climogramas complementarios. El régimen de humedad presente en las estaciones climatológicas cercanas al parque fue ústico. El régimen de humedad ústico (L. ustus, quemado; que implica sequedad) es un régimen de humedad intermedio entre el régimen árido y el régimen údico. Se refiere a que la humedad es limitada pero que está presente en un momento en el que las condiciones son adecuadas para el crecimiento de las plantas. De acuerdo con la clasificación de "Soil Taxonomy" el régimen de temperatura se encontró entre isotérmico e isomésico. El régimen isotérmico se refiere a que la temperatura media anual del suelo es de 15 °C o mayor pero menor de 22 °C, el régimen isomésico indica que la temperatura media anual del suelo es de 8 °C o mayor pero menor de 15 °C.

En el cuadro 13 se muestran los tipos de climas, regímenes de humedad y temperatura del suelo por estación meteorológica estudiada.

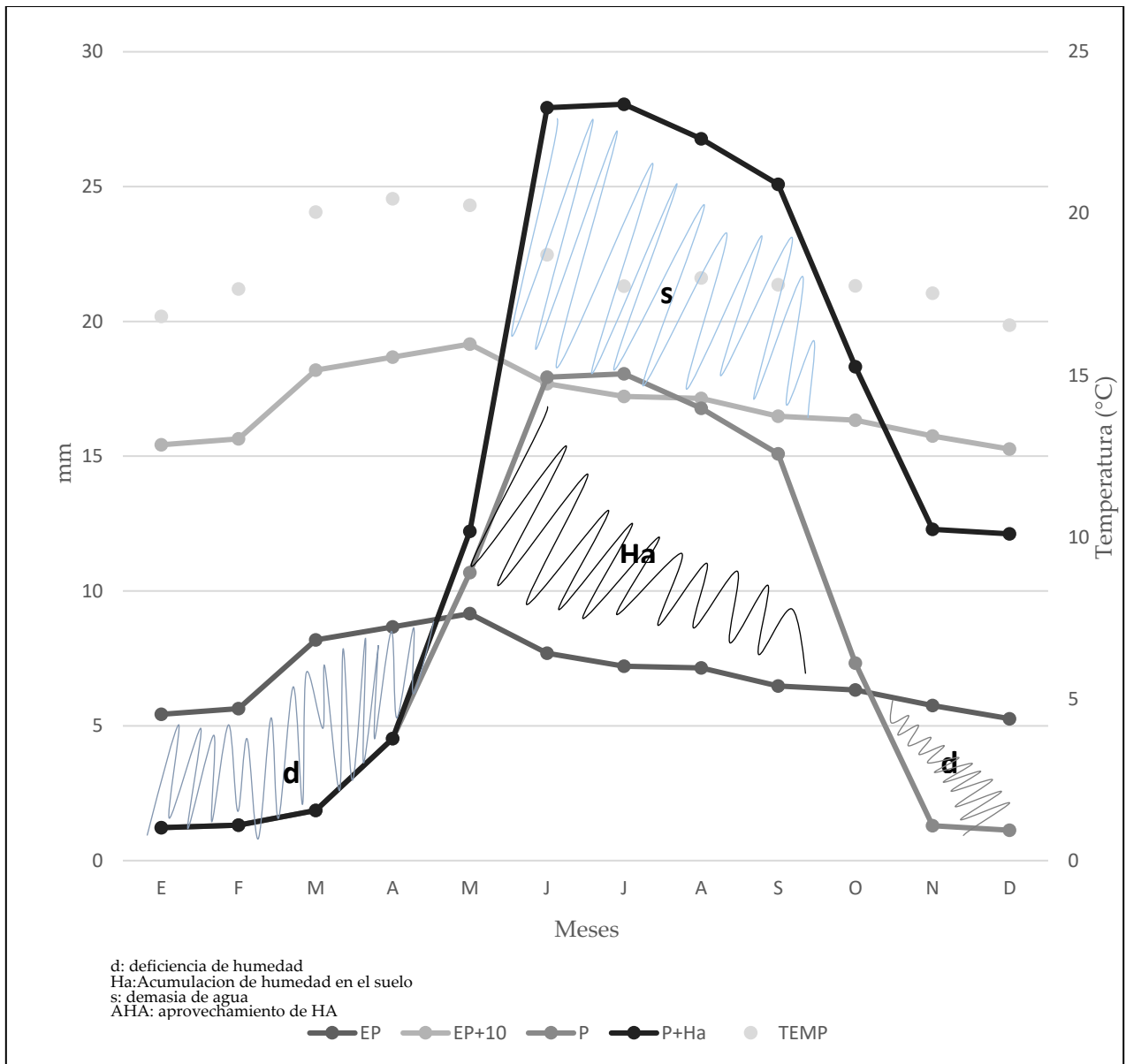


Figura 19. Climograma complementario de la estación climatológica Río Frío Ixtapaluca.

Cuadro 13. Fórmulas del clima calculada y régimen de humedad de suelo por estación meteorológica (DGE, 1972).

Régimen de humedad del suelo	Fórmula del Clima Calculada	del Régimen Humedad suelo	de Régimen de Temperatura del suelo
Río Frío, Ixtapaluca	S'2rB1c'2	Ústico	Isotérmico
San Martinito, Tlahuapan	B2rB1'b'1	Ústico	Isoméxico
Santa Rita Tlahuapan, DGE	B1rB'1b'1	Ústico	Isoméxico

Col. Ávila Camacho	B1rB'1b'1	Ústico	Isomésico
Esc. Agrop. Nanacamilpa	C2rB'2b'1	Ústico	Isomésico
San Rafael, Tlalmanalco	B2rB'1c'2	Ústico	Isomésico
Amecameca de Juárez	B1rB'1b'1	Ústico	Isomésico
Atlautla, Repetidora de T. V.	B3rB'1b'4	Ústico	Isomésico
Amecameca de Juárez (SMN)	B4rB'1b'1	Ústico	Isomésico
San Pedro Nexapa, Amecameca	B1rB'1c'2	Ústico	Isomésico
San Pedro Benito Juárez E-1	ArB'2b'1	Ústico	Isotérmico
Huecauasco E-7, Ocuituco	B2rB'2c'2	Ústico	Isotérmico

De acuerdo con el Atlas Nacional de México (Maples-Vermeersch, 1992) en algunas zonas dentro del parque en donde la vegetación es pino-encino, el régimen de humedad asociado a la vegetación es ústico con menos días de humedad, de 270 a 330 días y en zonas con bosque de pino y oyamel el régimen de humedad es ústico con 330 a 365 días de humedad; lo anterior se puede inferir debido a los requerimientos de humedad de la vegetación. En las zonas del parque en donde la altura es superior a 3500 msnm y hasta los 4500 msnm encontramos pastizales de alta montaña y también el régimen de humedad es considerado como ústico. El régimen de humedad es considerado un elemento importante para el almacén de C, ya que se ha observado en estudios de secuencias bioclimáticas que en suelos bajo condiciones xéricas se muestran contenidos menores de C con respecto a los desarrollados bajo regímenes údicos o ústicos (Galicía *et al.*, 2016).

#### *TIPOS DE SUELOS DOMINANTES EN EL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL*

De acuerdo con la carta edafológica a escala 1: 250 000 (INEGI, 2014) los principales órdenes de suelo encontrados en el Parque Nacional son: Cambisol eútrico, Andosol mólico, Litosol, Regosol dístico y Feozem. Los tipos de suelo identificados por INEGI se muestran en el cuadro 14 y la figura 20.

Cuadro 14. Unidades de suelo dentro del PNIP (INEGI, 2014).

Clave	NOM_S UE1	NOM_S UB1	NOM_S UE2	NOM_S UB2	NOM_S UE3	NOM_ SUB3	CT	Fase física
Re+To+T m/1	Regosol	eútrico	Andosol	ótrico	Andosol	mólico	Grues a	-
Rd+I+Tm /1/L	Regosol	dítrico	Litosol	-	Andosol	mólico	Grues a	Lítica
Hh+Be+ Vp/2/D	Feozem	háplico	Cambiso l	eútrico	Vertisol	pélico	Media	Dúric a
Be+Tm+I /2	Cambiso l	eútrico	Andosol	mólico	Litosol	-	Media	-

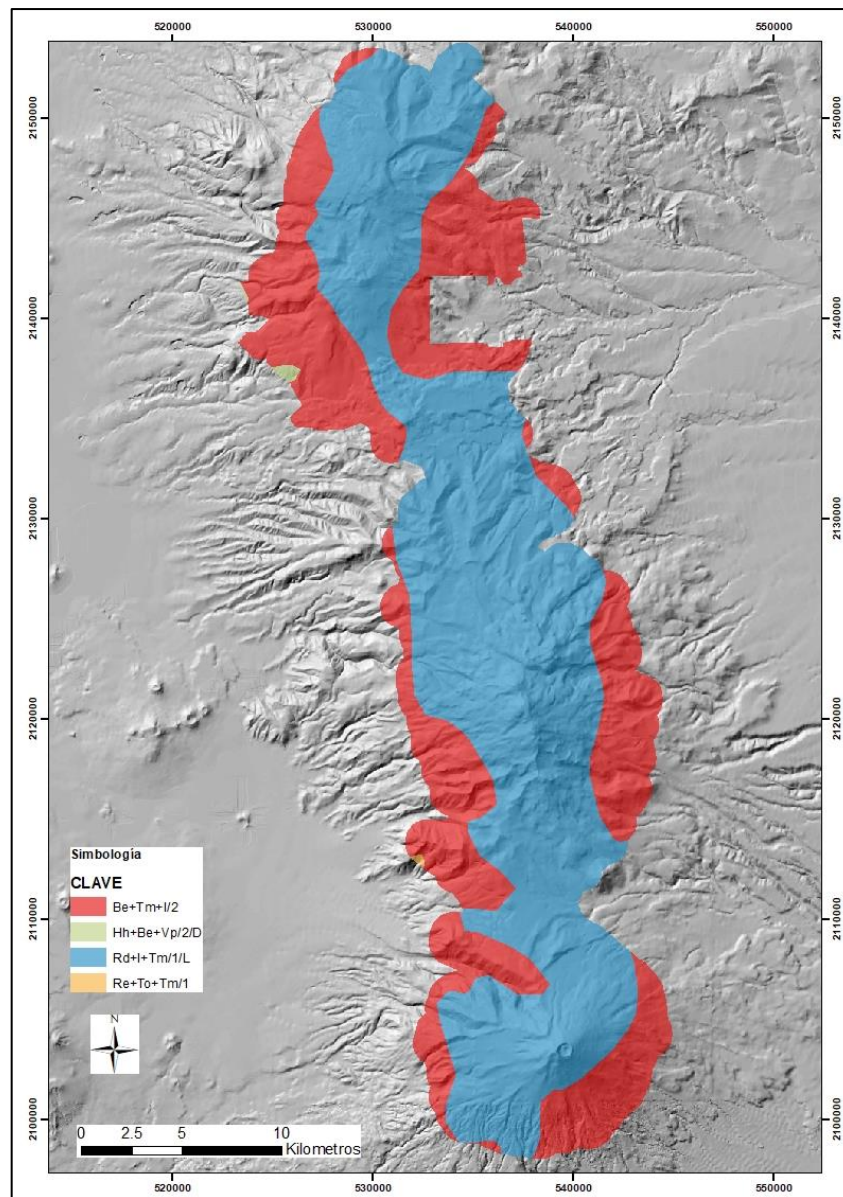


Figura 20. Distribución de las unidades de suelo dentro del PNIP de acuerdo con INEGI, 2014.

Los mapas a escala 1:100 000 del proyecto México de la Fundación Alemana para la Investigación Científica indican que los suelos de la Sierra Nevada son (Werner *et al.*, 1978):

- Andisoles vítricos de cenizas andesíticas recientes a mediana edad en alturas frías y secas entre los 3800 y 4200 m; arena levemente migajosa a arena limosa; arena levemente migajosa a arena limosa.
- Andisoles vítricos de cenizas andesíticas recientes a media altura de laderas frías y húmedas entre 3100 y 3800 m; arena levemente migajosa a arena limosa.
- Andisoles vítricos de cenizas andesíticas en las partes bajas de laderas cálidas y secas entre 2700 y 3100 m; arena levemente migajosa a arena limosa.

Para la digitalización de los tipos de suelos se trazaron los polígonos de la zona de estudio a partir de los mapas de la Cuenca Alta de Puebla - Tlaxcala y sus alrededores (Werner *et al.*, 1978); así como los polígonos correspondientes a la zona que abarca el Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl (SEMARNAT-CONANP, 2013) (Ver figura 21).

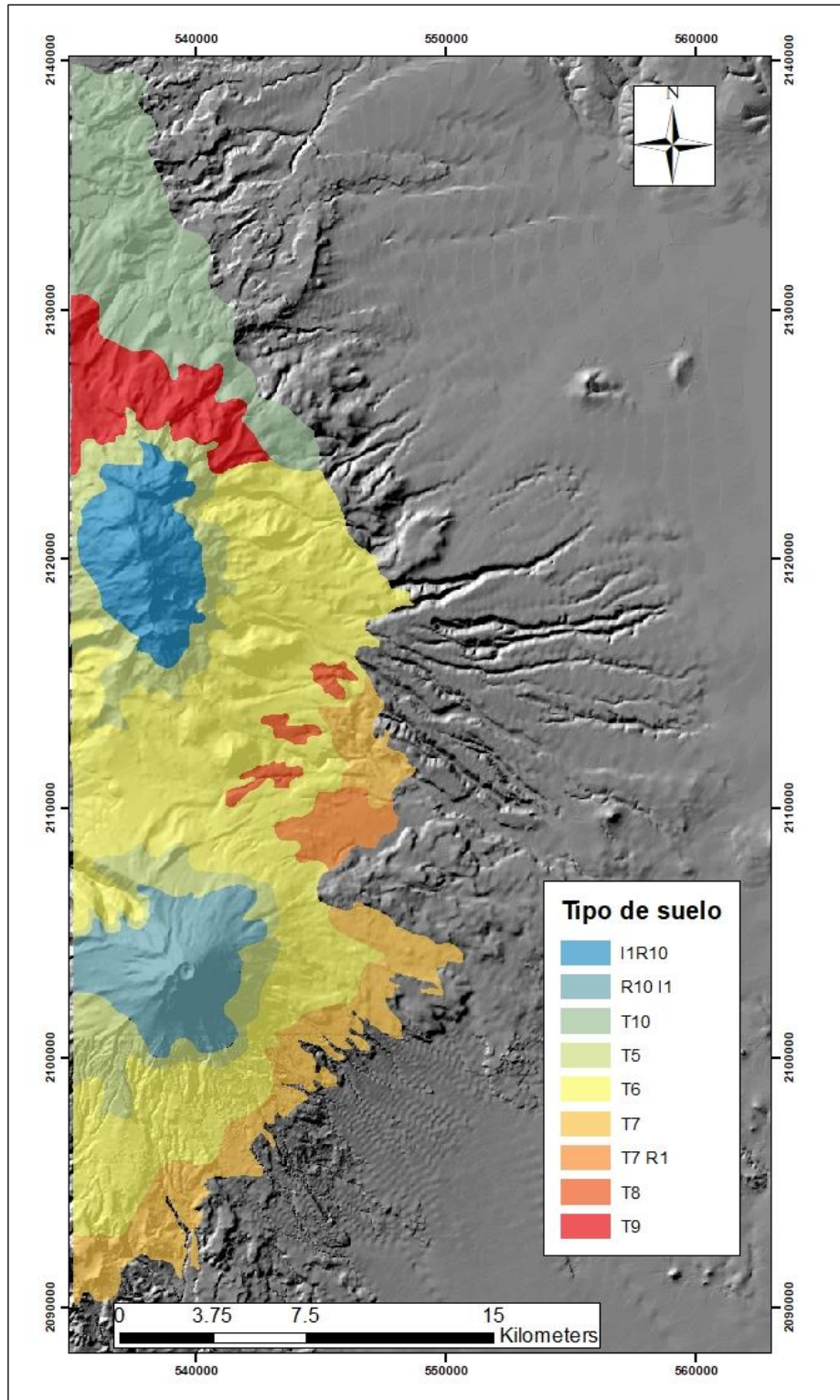


Figura 21. Mapa de tipos de suelos (Werner et al., 1978). I1 R10: Lithosols-Dystric Regosols, R10 I1: Dystric Regosols-Lithosols, T10: Humic Andosols (2800-3600m), T5: Vitric Andosols (3800-4200m), T6: Vitric Andosols (3100-3600m), T7: Vitric Andosols (2700-3100m), T7 R1: Vitric Andosols-Eutric Regosols (2700-3100m), T8: Vitric Andosols (debajo de 2700 m), T9: Humic Andosols (3400-3800m).

## 10.2 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE SUELOS

Con la información recopilada de las cartas topográficas que componen el área del parque se elaboró el MDE en el programa ArcGis y se seleccionaron los sitios de muestreo por cartografía libre y razonada considerando el ordenamiento ecológico del Parque Nacional (subzonas de manejo), orden de suelo, uso de suelo y tipo de vegetación, regímenes de humedad de suelo y la topografía. Fueron diseñadas cuatro rejillas de muestreo de 16 puntos cada una (4 x 4), en sitios representativos, las coordenadas UTM fueron registradas en el dispositivo GPS para su localización y muestreo posterior en campo.

Las figuras 22 a, b, c y d muestran los tipos de vegetación de los sitios de muestreo; de acuerdo con los cuales se observa que la vegetación consta de bosque de pino y pastizal en sitios de a 3400 a 3600 msnm.

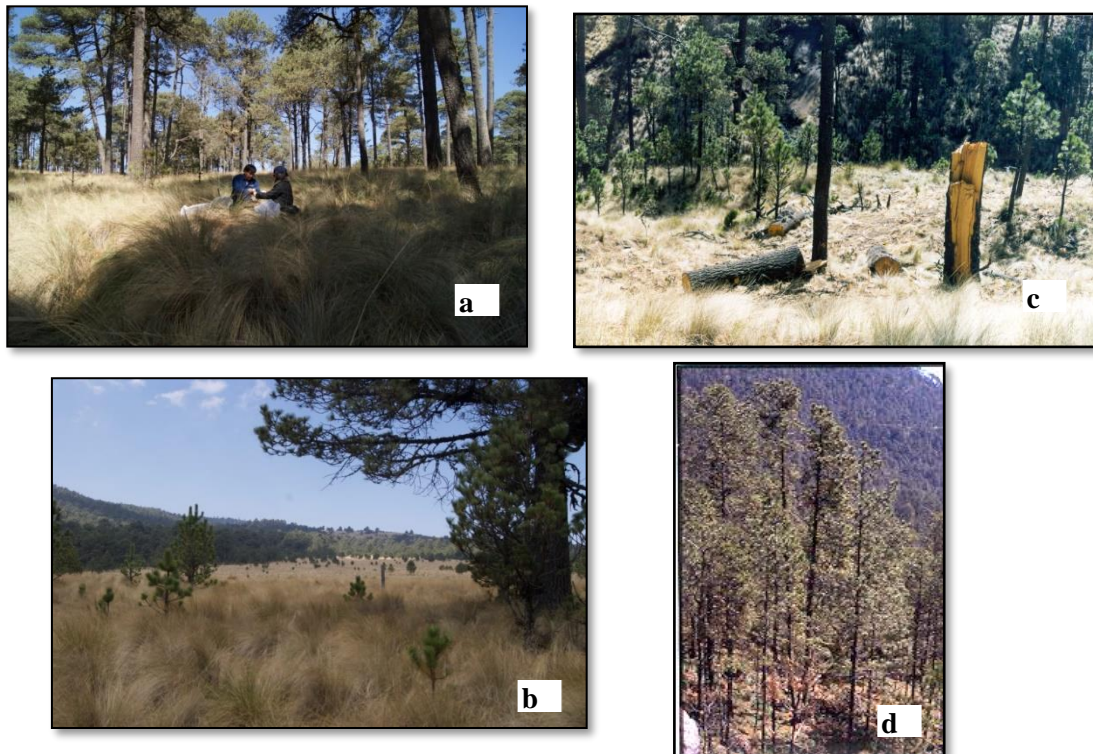


Figura 22. a) Subzona de recuperación en bosque de pino y pastizal (3610-3741 msn), b) Subzona de Recuperación con pastizal y reforestación de pino (3608-3660 msnm), c) Zona de influencia en bosque de pino (~3300 msnm), d) Subzona de preservación en bosque de pino (~3600 msnm). (Fotografías propias).

## RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE SUELO

El cuadro 15 muestra los sitios de muestreo, su ubicación; así como la vegetación predominante en cada uno de ellos.

Cuadro 15. Coordenadas de los sitios de muestreo y vegetación.

CLAVE	COORDENADAS UTM		Altitud msnm	Área del polígono muestreado (m <sup>2</sup> )	Vegetación
	X	Y			
REC1	538495	2110467	3638	490820	Bosque de pino y pastizal
REC1	538333	2110419	3649		Bosque de pino y pastizal
REC1	538246	2110664	3658		Bosque de pino y pastizal
REC1	538187	2109895	3674		Bosque de pino y pastizal
REC1	538259	2109628	3741		Bosque de pino y pastizal
REC1	538157	2110161	3659		Bosque de pino y pastizal
REC2	538632	2110693	3640	333802	Bosque de pino y pastizal
REC2	538356	2110949	3610		Bosque de pino y pastizal
REC2	538550	2110882	3618		Bosque de pino y pastizal
REC2	538767	2110828	3608		Pastizal
BUF	539922	2110685	3390	301620	Pastizal
BUF	540731	2110560	3345		Pastizal
BUF	539922	2110685	3390		Pastizal
BUF	540731	2110560	3345		Bosque de pino y pastizal
PRE	542227	2121174	3475	575541	Bosque de pino y pastizal
PRE	541501	2121682	3610		Bosque de pino y pastizal
PRE	541262	2121368	3685		Bosque de pino y pastizal
PRE	541262	2121368	3685		Bosque de pino y pastizal

REC1: sitios dentro de la subzona de recuperación en bosque de pino y pastizal; REC2: sitios dentro de la subzona de recuperación en pastizal con reforestación de pino; BUF: sitios en la zona de influencia y PRE: sitios en la subzona de preservación en bosque de pino.

El cuadro 16 muestra la estadística descriptiva de las distintas propiedades estudiadas en cada uno de los sitios de muestreo.

Cuadro 16. Valores medios y desviaciones estándar de los parámetros evaluados en los suelos del PNIP por subzona de manejo. Los números entre paréntesis indican el número de puntos de muestreo. N=18

CLAVE	D.A g/cm <sup>3</sup>	COLOR/ HUMEDO	COLOR/ SECO	pH en H <sub>2</sub> O	pH en KCl	ΔpH	% N total	CIC Cmol (+) Kg <sup>-1</sup>	IONES INTERCAMBIABLES (cmol +/kg <sup>-1</sup> )				%V	% Retención de Fosfatos	% M.O.	% COS	Índice Melánico	Relación C/N
									Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>						
REC1	0.65	10YR3/1	10YR2/1	4.40	3.30	-1.10	0.18	10.60	1.58	0.31	0.30	0.33	23.80	69.00	3.80	2.20	1.90	12.00
REC1	0.72	10YR3/1	10YR2/1	5.40	4.30	-1.10	0.11	12.00	1.37	0.20	0.33	0.22	17.70	74.00	4.70	2.70	1.72	25.00
REC1	0.79	7.5YR3/1	7.5YR2.5/1	5.10	4.40	-0.70	0.08	12.10	0.66	0.13	0.30	0.14	10.20	74.00	3.60	2.10	1.75	26.00
REC1	0.70	10YR3/1	10YR2/1	5.20	4.30	-0.90	0.12	14.60	1.42	0.15	0.37	0.14	14.20	78.00	3.10	1.80	1.72	15.00
REC1	0.66	10YR3/1	10YR2/2	5.50	4.00	-1.40	0.18	20.20	1.88	0.30	0.29	0.21	13.30	65.00	5.20	3.00	1.88	17.00
REC1	0.72	7.5YR3/1	7.5YR2.5/1	5.53	4.10	-1.45	0.16	18.68	1.61	0.21	0.21	0.16	12.40	68.75	3.35	1.98	1.70	12.75
REC2	0.80	7.5YR3/1	7.5YR2.5/1	5.70	4.70	-1.00	0.18	27.60	2.25	0.12	0.29	0.28	9.60	72.00	3.80	2.20	1.67	12.00
REC2	0.75	7.5YR3/1	7.5YR2.5/1	5.80	4.60	-1.20	0.20	29.90	2.81	0.18	0.25	0.35	11.20	66.00	3.40	2.00	1.69	10.00
REC2	0.78	10YR3/1	10YR2/1	5.30	4.10	-1.20	0.13	21.60	3.28	0.33	0.30	0.39	18.50	72.00	3.70	2.20	1.78	17.00
REC2	0.84	10YR3/1	10YR2/1	5.20	4.10	-1.10	0.16	28.50	2.62	0.31	0.27	0.36	11.50	73.00	4.90	2.80	1.75	17.00
BUF	0.80	10 YR 3/1	10 YR 2/1	5.00	4.70	-0.30	0.25	13.70	0.80	0.55	0.60	0.35	14.70	57.00	5.80	5.00	1.03	18.00
BUF	0.80	10 YR 3/1	10 YR 2/1	5.50	4.50	-1.00	0.35	12.30	0.90	0.10	0.60	0.08	13.70	73.00	5.10	3.20	1.40	9.00
BUF	0.80	10 YR 3/1	10 YR 2/1	5.00	4.70	-0.30	0.25	13.70	0.80	0.55	0.60	0.35	14.70	57.00	5.80	5.00	1.03	18.00
BUF	0.80	10 YR 3/1	10 YR 2/1	5.50	4.50	-1.00	0.35	12.30	0.90	0.10	0.60	0.08	13.70	73.00	5.10	3.20	1.40	9.00
PRE	0.90	10YR 3/2	7.5 YR 2.5/1	4.00	4.50	0.50	0.35	30.10	0.50	0.20	0.60	0.03	4.10	29.00	6.70	4.10	1.64	12.00
PRE	0.90	10YR 3/1	10YR 2/1	4.40	3.70	-0.70	0.43	23.90	0.50	0.40	0.50	0.05	5.70	53.00	7.80	3.40	0.57	10.00
PRE	0.90	10YR 3/1	10YR 2/1	4.50	4.00	-0.50	0.43	23.00	0.40	0.11	0.80	0.05	6.00	44.00	6.30	3.70	0.63	10.00
PRE	0.90	10YR 3/1	10YR 2/1	4.30	4.07	-0.23	0.40	25.67	0.40	0.24	0.63	0.04	5.27	42.00	6.93	3.73	0.95	10.67
Min	0.65			4.00	3.30	-1.45	0.08	10.60	0.40	0.10	0.21	0.03	4.10	29.00	3.10	1.80	0.57	9.00
Max	0.90			5.80	4.70	0.50	0.43	30.10	3.28	0.55	0.80	0.39	23.80	78.00	7.80	5.00	1.90	26.00
Media	0.79			5.06	4.23	-0.78	0.24	19.56	1.42	0.26	0.44	0.20	12.41	62.34	5.00	3.06	1.43	14.77
DE	0.08			0.57	0.42	0.56	0.12	7.14	0.95	0.15	0.19	0.13	5.62	15.02	1.49	1.05	0.45	5.50

### *Densidad aparente*

La densidad aparente (DA) es una de las características físicas más importantes de estos suelos, es útil en la interpretación del espacio poroso; disponibilidad de agua, de aire y de nutrientes; así como para interpretar la retención de agua del suelo. Sin embargo, valores bajos de densidad aparente los vuelven susceptibles a la erosión hídrica y eólica cuando la cobertura vegetal es removida o alterada (McDaniel *et al.*, 2012).

Los valores de densidad aparente reportados en la zona de los Volcanes de acuerdo con Hidalgo *et al.*, (1986) fueron de 0.72 a 1.22 g/cm<sup>3</sup>; Cruz-Flores & Etchevers-Barr en 2011 reportaron valores medios de DA de 0.82 g/cm<sup>3</sup> y Cruz-Flores *et al.*, 2020 reportaron valores entre 0.86 y 1.33 g/cm<sup>3</sup>.

Los suelos muestreados en este estudio presentaron densidad aparente menor de 0.9 g/cm<sup>3</sup>, la cual es una de las propiedades ándicas que señala "Soil Taxonomy" (2014). Los sitios con valores de densidad aparente más altos se encontraron en la subzona de preservación y la zona de influencia (0.80 - 0.90 g/cm<sup>3</sup>). Se considera que los valores más bajos de densidad aparente son más adecuados para la evaluación de la calidad del suelo como para la evaluación de las funciones ambientales.

### *COLOR DEL SUELO, ÍNDICE MELÁNICO*

El prefijo "Ando" de Andisol es la palabra japonesa que significa "tierra negra", utilizada para describir el bajo croma de los suelos de ceniza volcánica ricos en materia orgánica de Japón. En Japón, donde la ceniza es generalmente alta en sílice y baja en hierro, la materia orgánica proporciona un color casi negro al suelo. En los Andisoles desarrollados a partir de cenizas de bajo contenido en sílice y alto contenido en hierro y magnesio, el óxido de hierro enmascara el color negro de la materia orgánica para producir un suelo de color marrón oscuro (Uehara & Gillman, 1981). Los horizontes superficiales de Andisoles también muestran una variedad de colores de suelo dependiendo del contenido de materia orgánica del suelo. Se ha observado en Japón y Alaska que la vegetación influye en los ecosistemas de pastos y bosques ya que contribuyen significativamente a la formación de Andisoles melánicos y fúlvicos, respectivamente (Shoji *et al.*, 1988, 1990). Los suelos aquí estudiados en su capa superficial se observaron muy oscuros y correspondieron con los colores de epipedones melánicos, que comúnmente presentan matices de

7.5 YR o 10 YR y valor y croma de 2/2 o más oscuro, atribuibles a la abundancia de ácido húmico de tipo A (Shoji, 1988).

Los valores observados en este estudio coincidieron con los observados en la capa superficial del horizonte A de Andisoles en Lembang, West Java, tanto en bosque de pino como en suelo cultivado en donde los colores fueron 7.5YR 3/2 y 10YR 3/2 (Hati *et al.*, 2021). En México dentro de la zona de Cofre de Perote con una vegetación asociada de zacatonal (*Muhlenbergia macroura*) los valores de color para el horizonte A1 que corresponden a los primeros 40 cm el color fue 10 YR 3/2. De acuerdo con los colores observados se puede inferir que los suelos del Parque Nacional poseen altos contenidos de sílice y abundan los ácidos húmicos tipo A. El estudio del color del suelo es importante ya que los Andisoles negros tienen una gran capacidad de almacenamiento de agua y de carbono y desempeñan un papel destacado en la regulación del drenaje (Dubroeuq *et al.*, 2002).

De acuerdo con la prueba del índice melánico los suelos de bosque en el área de preservación, el de la subzona de amortiguamiento y la zona de recuperación con pastizal tuvieron valores menores o muy cercanos a 1.7, indicando que domina la formación de ácidos húmicos tipo A, los cuales son estructuras que muestran mayor grado de humificación, a diferencia de los ácidos húmicos que se forman debajo del ecosistema forestal de la zona de recuperación, los cuales tuvieron un índice melánico mayor de 1.7, es decir, un menor grado de humificación, lo que forma ácidos húmicos tipo P o B (Ver figuras 23 a, b). Es importante considerar la presencia de tipos específicos de ácidos húmicos ya que puede ser usado como un indicador de calidad, que proporciona información no solo sobre la complejidad de estos sino también sobre la actividad microbológica presente. La producción de ácidos húmicos más condensados en pastizales se asocia con la actividad de las micorrizas, y la descomposición de las hojas de pino es asociada con la presencia de hongos que descomponen de manera más lenta las ligninas (Honna *et al.*, 1988). Esto nos proporciona información sobre la baja supervivencia de pinos plantados en años recientes en el área de pastos, que además de factores como la altura y el viento evitan que se desarrollen adecuadamente los pequeños especímenes de pino, en cuyo caso la propagación del pasto sería una estrategia más adecuada para la recuperación de la zona.

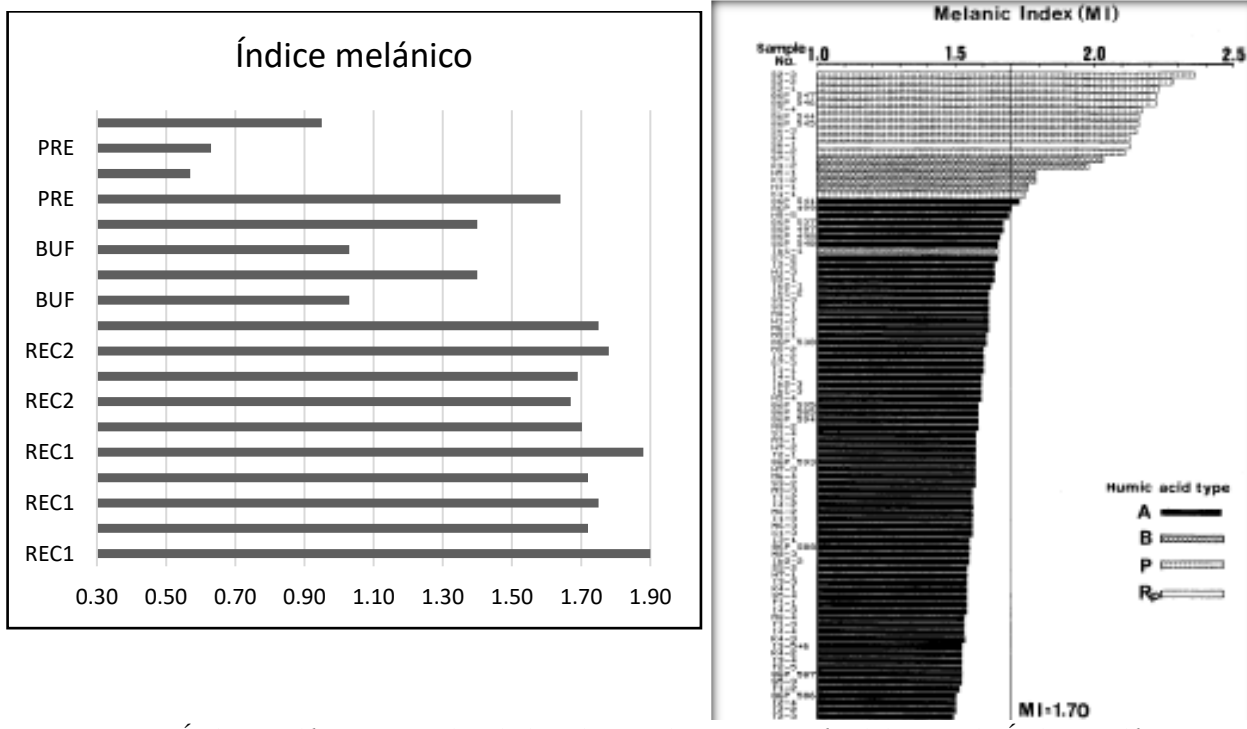


Figura 23 a) Índice melánico en suelos de la subzona de recuperación del PNIP. b) Índice melánico en suelos alrededor del mundo por Honna, 1988.

#### CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

La elevada superficie específica de los coloides inorgánicos presentes en los Andisoles permite al suelo secuestrar grandes cantidades de materia orgánica (Hillel, 2004). Los Andisoles, a pesar de su escasa abundancia son los suelos con la mayor capacidad de almacenar carbono debido a sus características mineralógicas (Galicia *et al.*, 2016). De acuerdo con los valores de materia orgánica del suelo, las zonas de recuperación tuvieron porcentajes considerados como bajos para suelos volcánicos y las zonas de influencia y preservación manifestaron contenidos medios de materia orgánica de acuerdo con la norma mexicana (SEMARNAT, 2002). El cuadro 17 presenta los contenidos de carbono del suelo por hectárea en las muestras de las zonas estudiadas, los suelos presentaron una importante acumulación de COS, lo que indica que poseen un alto potencial para secuestrar C. Las zonas que presentaron mayor contenido de carbono fueron la zona de preservación, seguida de la zona de influencia y las zonas con menor contenido fueron las de recuperación.

Cuadro 17. Valores de carbono orgánico del suelo en las zonas estudiadas.

CLAVE	Carbono orgánico del suelo (%)	Materia orgánica (%)	Carbono Orgánico del Suelo Toneladas de C*ha <sup>-1</sup>
REC1	2.30	3.96	36.3
REC2	2.30	3.95	41.2
BUF	4.10	5.45	73.8
PRE	3.73	6.93	75.6

REC1: sitios dentro de la subzona de recuperación en bosque de pino y pastizal; REC2: sitios dentro de la subzona de recuperación en pastizal con reforestación de pino; BUF: sitios en la zona de influencia y PRE: sitios en la subzona de preservación en bosque de pino.

Se ha observado que las reservas de C del suelo en Islandia después de una reforestación fueron en promedio de 23.6 ton/ha en la capa superior y de 16.9 ton/ha en la capa inferior (Ritter, 2007), lo cual es significativamente menor a lo observado en las zonas de recuperación que han sido sometidas procesos similares de reforestación en nuestros sitios de estudio.

De acuerdo con la clasificación de suelos FAO-UNESCO y unidades de suelos de la WRB se considera que 11.4 kg/m<sup>2</sup> es una media de contenido de carbono orgánico en los primeros 30 cm de suelo para Andosoles (FAO, 2002) y conforme con valores de Soil Taxonomy los Andisoles tienen un contenido medio de carbono de 310 toneladas por hectárea (Eswaran *et al.*, 1993). Los resultados obtenidos permitieron detectar que en todas las zonas existieron valores por debajo de ambos parámetros internacionales. Contenidos más altos de carbono orgánico es un indicador de mejor condición del suelo, se considera que mientras mayor sea la concentración de carbono la calidad del suelo es mejor.

#### NITRÓGENO TOTAL Y RELACIÓN C/N EDÁFICA DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS

El nitrógeno en el suelo se encuentra estrechamente ligado al C, nuestros resultados mostraron que las zonas con mayor contenido de NT fueron la zona de preservación, seguido del bosque de la zona de influencia y por último ambas zonas de recuperación. En los suelos agrícolas la relación C/N edáfica suele oscilar entre 10 y 12 e incrementa hasta 18 en los suelos forestales ácidos; esta relación se usa para calificar la fracción húmica del suelo. Se sabe que las fracciones más humificadas tienen relaciones más bajas (cerca de 10) al ser más ricas en N, mientras que la

relación C/N de las fracciones menos humificadas se encuentra entre 15 y 17 (Gallardo, 2017). En el caso de los suelos muestreados en la zona de recuperación del Parque, aquellos que presentan humificación más intensa los encontramos en el área de pastos con resultados entre 10 y 13; para el caso del bosque de pino los resultados fueron entre 12 y 26, lo cual indica que el pasto favorece la formación de ácidos húmicos más complejos y estables a diferencia del bosque que contiene más compuestos de menor peso molecular y menor complejidad. Sin embargo, no se observó diferencia significativa en la relación C/N entre las cuatro zonas estudiadas, los valores medios se encontraron entre 10.67 y 16.22. En Andisoles de la región de los Andes en Colombia la relación C/N se observó entre 10.8 y 12.5 en donde los valores más altos se observaron en el pastizal, sin embargo; la diferencia fue muy pequeña como para ser considerada significativa (Hoyos & Comerford, 2005). La relación C/N fue considerado como un indicador bajo el criterio menos es mejor, ya que lo deseable fue encontrar fracciones más humificadas con mayor contenido de N.

#### *PH DEL SUELO*

Los Andisoles suelen tener valores de pH de moderadamente ácidos a muy ácidos (McDaniel *et al.*, 2012). Los valores de pH suelo-agua fueron ácidos, encontrándose entre 4.0 y 5.8. En el caso en donde la vegetación estuvo asociada al pastizal dentro de la zona de recuperación el pH fue de 5.2 a 5.7, en la zona de recuperación en donde había bosque de pino el pH se encontró entre 4.4 y 5.4. En la zona de preservación con bosque de pino el pH fue de 4 a 4.5 y en la zona de influencia se encontraron valores de 5 a 5.5. La reacción del suelo indica la posible movilidad de los elementos presentes, así como la disponibilidad de nutrientes (Porta *et al.*, 1994), por lo cual a valores más bajos de pH podría existir un riesgo de contaminación debido a la liberación de Al (Takahashi & Dahlgren, 2016) del complejo de intercambio del suelo. La relación suelo-KCl (1:2) muestra que los suelos tuvieron pH ácidos entre 3.3 y 4.7. El  $\Delta$ pH del suelo es la diferencia de los valores de pH (KCl) y pH (H<sub>2</sub>O), y puede indicar la presencia de minerales de carga variable y niveles aproximados de aluminio KCl-extraíble de suelos pobres en humus (Uehara & Gillman, 1981), por lo tanto, los suelos analizados presentan características de minerales de carga variable.

### *IONES INTERCAMBIABLES, CIC Y % SATURACIÓN EN BASES*

Se encontró que en todos los sitios estudiados el contenido de iones intercambiables ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Ca}^{+2}$ ) fue bajo. El contenido de  $\text{Ca}^{+2}$  fue entre bajo y muy bajo ( $0.40\text{-}3.28 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$ ), el  $\text{K}^+$  fue entre bajo y muy bajo ( $0.03 - 0.39 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$ ), el  $\text{Mg}^{+2}$  se encontró muy bajo ( $0.10 - 0.55 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$ ) y el  $\text{Na}^+$  estuvo entre  $0.21$  y  $0.80 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$ . El contenido de bases observado se ha visto en otros Andisoles destinados al uso forestal en México (Meza-Pérez & Geissert-Kientz, 2006). La capacidad de intercambio catiónico fue de baja a alta; en la subzona de influencia ( $13 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$ ) y la zona de recuperación en bosque de pino ( $14.70 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$ ) se encontraron los valores más bajos, en la zona de preservación ( $25.67 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$ ) y la zona de recuperación con pastizal ( $26.90 \text{ cmol (+) Kg}^{-1}$ ) se encontraron los valores más altos, los valores obtenidos fueron muy similares se encontraron en Andisoles de la meseta Tarasca en Michoacán (Alcalá-de Jesús *et al.*, 2001). El porcentaje de saturación en bases dentro de todas las zonas fue bajo ( $5.26\%$  y  $14.31\%$ ). Se ha observado que el contenido de bases intercambiables es bajo en Andisoles de regiones templadas en Japón, además se ha registrado baja saturación en bases ( $<50\%$ ) en Andisoles de Hawai (Wada, 1985), lo cual coincide con lo observado en este trabajo. El bajo contenido de bases en este tipo de suelos se explica por el hecho de que su carga negativa es más pequeña con el decremento del pH, es decir, los sitios de intercambio catiónico muestran una muy alta selectividad por protones (Valera, 1993).

### *CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE SUELO (ICS)*

El cuadro 18 muestra los valores medios y desviación estándar de los indicadores físicos y químicos dentro de cada una de las áreas estudiadas. Además, se muestran los resultados del análisis de varianza que señalan que indicadores variaron significativamente entre las zonas de estudio; se incluyen también los resultados de la prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher. Como puede verse, los indicadores que mostraron diferencias significativas fueron la densidad aparente, pH en agua,  $\Delta\text{pH}$ , el carbono orgánico del suelo, el nitrógeno total, la retención de fósforo, el índice melánico,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , CIC y el porcentaje de saturación de bases. Estos indicadores fueron luego

analizados por el análisis de componentes principales (ACP) para así reducir la redundancia en el cálculo de ICS.

Cuadro 18. Propiedades del suelo utilizadas para el cálculo del índice de calidad y para el cálculo de las funciones del suelo.

Indicadores	Unidades	Área de recuperación con bosque de pino REC1	Área de recuperación con pastizal y reforestación de pino REC2	Área de influencia bosque de pino manejado BUF	Área de preservación bosque de pino PRE	ANOVA	
						F	P
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	0.71c ± 0.06	0.79b ± 0.038	0.80b ± 0.00	0.90a ± 0.00	25.22	<0.01
pH H <sub>2</sub> O		5.20a ± 0.38	5.50a ± 0.29	5.25a ± 0.35	4.3b ± 0.55	10.11	<0.01
pH KCl		4.07ab ± 0.33	4.38ab ± 0.32	4.60a ± 0.14	4.07b ± 0.40	2.78	0.080
ΔpH		-1.108b ± 0.66	-1.13b ± 0.09	-0.65ab ± 0.49	-0.232a ± 0.41	6.29	<0.01
Carbono orgánico del suelo (COS)	%	2.30b ± 0.40	2.30b ± 0.35	4.10a ± 1.27	3.73a ± 0.35	11.34	<0.01
Nitrógeno total	%	0.14c ± 0.03	0.17c ± 0.03	0.30b ± 0.07	0.40a ± 0.05	37.74	<0.01
Relación C:N		17.96a ± 5.59	14.00an ± 3.56	13.50ab ± 6.36	10.67b ± 1.15	2.05	0.153
Retención de fosfatos (RF)	%	71.46a ± 6.84	70.75a ± 3.20	65.00a ± 11.31	42.00b ± 12.12	16.52	<0.01
Índice melánico (IM)		1.78a ± 0.08	1.72a ± 0.05	1.21b ± 0.26	0.95b ± 0.60	11.20	<0.01
Ca <sup>+2</sup>	cmol(+)/kg	1.48b ± 0.44	2.74a ± 0.43	0.85bc ± 0.07	0.47c ± 0.06	30.31	<0.01
Na <sup>+</sup>	cmol(+)/kg	0.30b ± 0.08	0.28b ± 0.02	0.60a ± 0.00	0.63a ± 0.15	35.55	<0.01
K <sup>+</sup>	cmol(+)/kg	0.20b ± 0.06	0.34a ± 0.05	0.21ab ± 0.19	0.04c ± 0.01	8.13	<0.01
Mg <sup>+2</sup>	cmol(+)/kg	0.22a ± 0.06	0.23a ± 0.10	0.32a ± 0.32	0.24a ± 0.15	0.446	0.724
Capacidad de	cmol(+)/kg	14.70b ± 5.56	26.90a ± 3.66	13.00b ± 0.99	25.67a ± 3.86	21.27	<0.01

intercambio catiónico (CIC)							
Saturación de bases (V)	%	15.27a ± 4.72	12.70a ± 3.96	14.20a	±	5.27b ± 1.02	7.39 <0.01
				0.70			

Los valores con las mismas letras minúsculas dentro de las filas (área de estudio) no son significativamente diferentes  $P < 0.05$ . REC1: sitios dentro de la subzona de recuperación en bosque de pino y pastizal; REC2: sitios dentro de la subzona de recuperación en pastizal con reforestación de pino; BUF: sitios en la zona de influencia y PRE: sitios en la subzona de preservación en bosque de pino.

Los indicadores que mostraron mayor correlación en el análisis de componentes principales (Cuadro 19) fueron considerados para el índice de calidad de suelo (ICS) (Mukherjee & Lal, 2014).

Cuadro 19. Análisis de componentes principales.

<b>Indicadores</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>
Densidad aparente	<b>0.32</b>	-0.25	-0.02
pH H <sub>2</sub> O	-0.28	-0.04	0.16
$\Delta$ pH	<b>0.32</b>	0.02	-0.28
Carbono orgánico del suelo	0.28	0.23	-0.45
Nitrógeno total	<b>0.33</b>	0.00	0.13
Retención de fosfatos	<b>-0.33</b>	0.16	0.22
Índice melánico	<b>-0.31</b>	-0.11	0.01
Ca <sup>+2</sup>	<b>-0.30</b>	-0.36	-0.26
Na <sup>+</sup>	<b>0.33</b>	0.24	-0.03
K <sup>+</sup>	-0.24	-0.03	<b>-0.69</b>
Capacidad de intercambio catiónico	0.10	<b>-0.70</b>	-0.12
Saturación de bases	<b>0.30</b>	0.30	0.42
Eigenvalor	7.03	1.81	1.14
Varianza (%)	59	15	10
Varianza acumulada (%)	59	74	83

De los resultados obtenidos por la ACP, las tres primeras componentes principales (CP) tuvieron eigenvalores  $> 1.0$  y explicaron  $> 83\%$  de la varianza. La primera CP explicó el 59% de la varianza total, y los indicadores con el valor más alto dentro del componente fueron el nitrógeno total, el Na<sup>+</sup>, el índice melánico, el carbono orgánico del suelo, la retención de fosfatos, la saturación de bases,  $\Delta$ pH y la densidad aparente. De los indicadores de CP1, sólo se seleccionó el nitrógeno total para su inclusión en el ICS debido a que estuvo altamente correlacionado con el resto de los

indicadores (Figura 24) y tuvo mayor ponderación dentro de la componente principal. La segunda CP explicó el 15% de la varianza y el indicador con el valor más alto fue la CIC. La tercera CP explicó el 10% de la varianza y el indicador con mayor valor fue el K<sup>+</sup>. Entonces, los indicadores para conformar el CMD y calcular los distintos ICS fueron el nitrógeno total (NT), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el K<sup>+</sup> (Potasio intercambiable).

Todos los indicadores del CMD se transformaron utilizando funciones lineales y no lineales, tras la normalización de los datos, se integraron en distintos índices de calidad para cada sitio de muestreo. Los valores de ponderación para el cálculo de los índices fueron asignados por la variación dentro de la CP, para lo cual se consideró como la unidad el total acumulado de las 3 primeras CP y se dividieron entre el porcentaje de variación correspondiente de cada componente. En el cuadro 20 se muestran los criterios utilizados en las ecuaciones para estandarizar los valores de los indicadores de CS en puntuaciones para integrarlas en ICS.

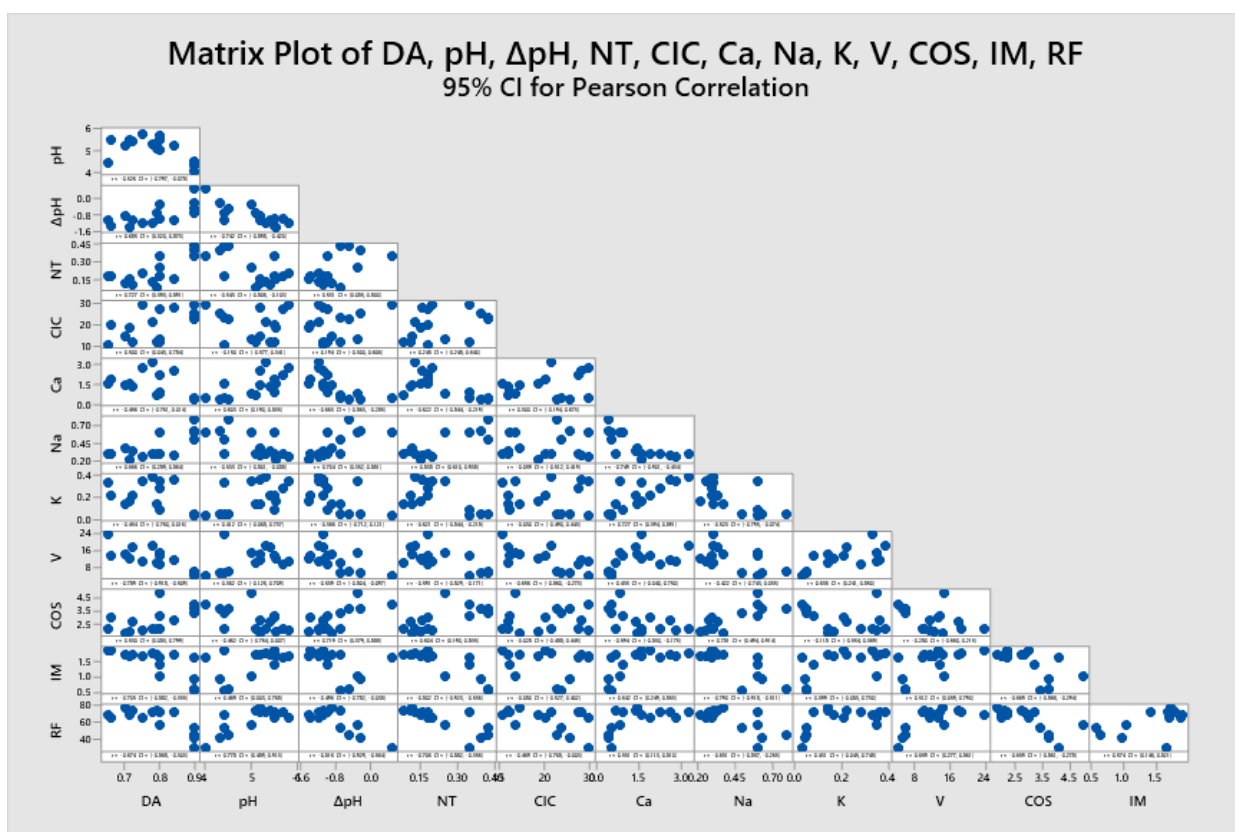


Figura 24. Matriz de correlación de las propiedades del suelo altamente ponderadas en el ACP.

Cuadro 20. Indicadores seleccionados para conformar el ICS, curva de funciones de puntuación y parámetros de pesos no lineales y lineales para los indicadores en el CMD.

Indicadores	Curva de puntuación	de Lineal		No-lineal	Pendiente (b)	Ponderación
		Xmax	Xmin	Mean (Xm)		
Nitrógeno total	Más es mejor	0.43		0.22	-2.5	0.71
Capacidad de intercambio catiónico	Más es mejor	30.1		19.71	-2.5	0.19
K <sup>+</sup>	Menos es mejor		0.03	0.20	2.5	0.12

Las expresiones finales para calcular los ICS fueron dadas por las siguientes ecuaciones:

$$L - \text{ICS}_W \text{ or } NL - \text{ICS}_W = (0.71 \times S_{\text{TN}}) + (0.19 \times S_{\text{CEC}}) + (0.12 \times S_K) \quad (6)$$

$$L - \text{ICS}_A \text{ or } NL - \text{ICS}_A = (S_{\text{TN}} + S_{\text{CEC}} + S_K)/3 \quad (7)$$

Donde L-ICS y NL-ICS indican el ICS lineal o no lineal, A muestra la ICS aditiva y W el ICS ponderado, y S es el valor estandarizado de cada indicador. El indicador NT tuvo el mayor peso en el cálculo de los ICS, seguido por la CIC y finalmente por el K<sup>+</sup>. Como era de esperar, los valores de los ICS fueron significativamente más altos en el área de preservación con bosque que en el área de recuperación con ambos tipos de vegetación y el área de amortiguamiento. Todos los ICS fueron significativamente diferentes  $P < 0.001$  entre las diferentes áreas.

La figura 25 y el cuadro 21 muestran los valores de ICS obtenidos en cada zona estudiada, además se muestra que los valores fueron significativamente diferentes entre las regiones de estudio ( $P < 0.05$ ). Los valores de los ICS fueron considerablemente más altos en la zona de preservación, lo que se debe al mayor grado de protección de la zona. Los valores más bajos de ICS se observaron en ambas zonas de recuperación y la subzona de influencia. En el pasado las zonas de recuperación han sufrido actividades que contribuyeron a su degradación, como la tala ilegal, la extracción de suelo y plantas para su venta, el pastoreo de ganado, entre otras. Lo anterior indica que la zona de preservación tiene los valores más altos de ICS, por lo tanto, una mejor función y proceso del suelo.

Los valores más altos de F (ANOVA) indicaron una mejor capacidad para diferenciar los valores de ICS calculados. Los resultados mostraron que los índices de puntuación lineal ponderada y aditiva (F 51.22 y 52.66 respectivamente) presentaban mejor la función del suelo que los índices de puntuación no lineal obtenidos. En los casos en que se utilizó la función de puntuación no lineal, se observaron valores más bajos que los evaluados por la función de puntuación lineal.

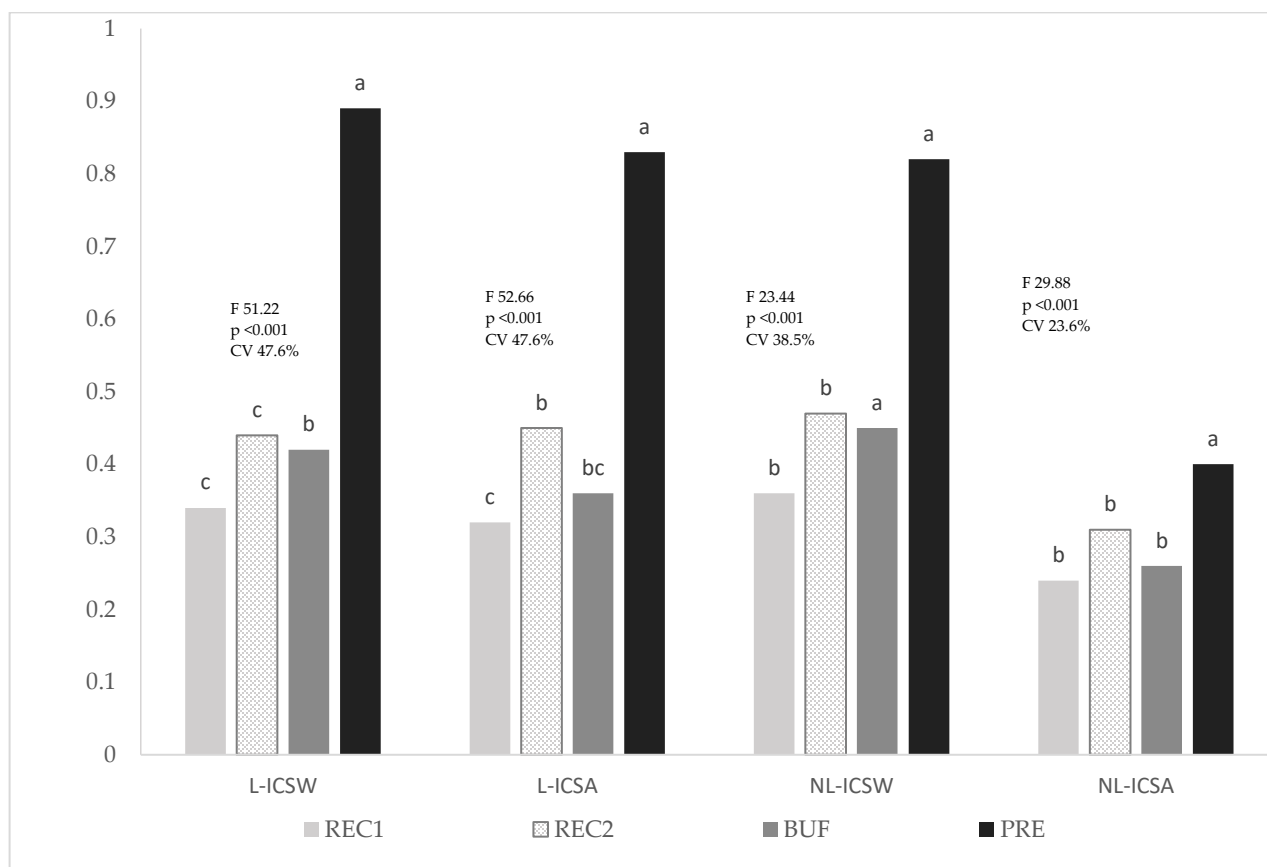


Figura 25. Comparación de los valores de calidad del suelo calculado para las diferentes zonas de manejo. L-ICS-W: ICS lineal ponderado; L-ICS-A: ICS lineal aditivo; NL-ICS-W: ICS no lineal ponderado y NL-ICS-A: ICS no lineal aditivo. REC1: sitios dentro de la subzona de recuperación en bosque de pino y pastizal; REC2: sitios dentro de la subzona de recuperación en pastizal con reforestación de pino; BUF: sitios en la zona de influencia y PRE: sitios en la subzona de preservación en bosque de pino. Elaboración propia.

Cuadro 21. Valores de ICS calculados por medio del ACP.

	L-ICS-W	L-ICS-A	NL-ICS-W	NL-ICS-A
REC1	0.34c	0.32c	0.36b	0.24c
REC2	0.44b	0.45b	0.47b	0.31b
BUF	0.42bc	0.36bc	0.45b	0.26c
PRE	0.89a	0.83a	0.82a	0.40a
F value	51.22	52.66	23.44	29.88

P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
---	--------	--------	--------	--------

Comparación de los valores de calidad del suelo calculado para las diferentes zonas de manejo. L-ICS-W: ICS lineal ponderado; L-ICS-A: ICS lineal aditivo; NL-ICS-W: ICS no lineal ponderado y NL-ICS-A: ICS no lineal aditivo. REC1: sitios dentro de la subzona de recuperación en bosque de pino y pastizal; REC2: sitios dentro de la subzona de recuperación en pastizal con reforestación de pino; BUF: sitios en la zona de influencia y PRE: sitios en la subzona de preservación en bosque de pino.

Los cuatro tipos diferentes de ICS calculados estuvieron significativamente correlacionados entre sí, lo que indica que cualquiera de ellos puede ser utilizado para evaluar la CS (Figura 26). Sin embargo, es recomendable utilizar aquellos índices que mostraron mayor capacidad para diferenciar entre las zonas estudiadas, como fueron los índices lineal ponderado y aditivo que mostraron mejor capacidad para detectar sutilezas dentro de las variaciones en la calidad del suelo de las distintas subzonas de manejo dentro del parque.

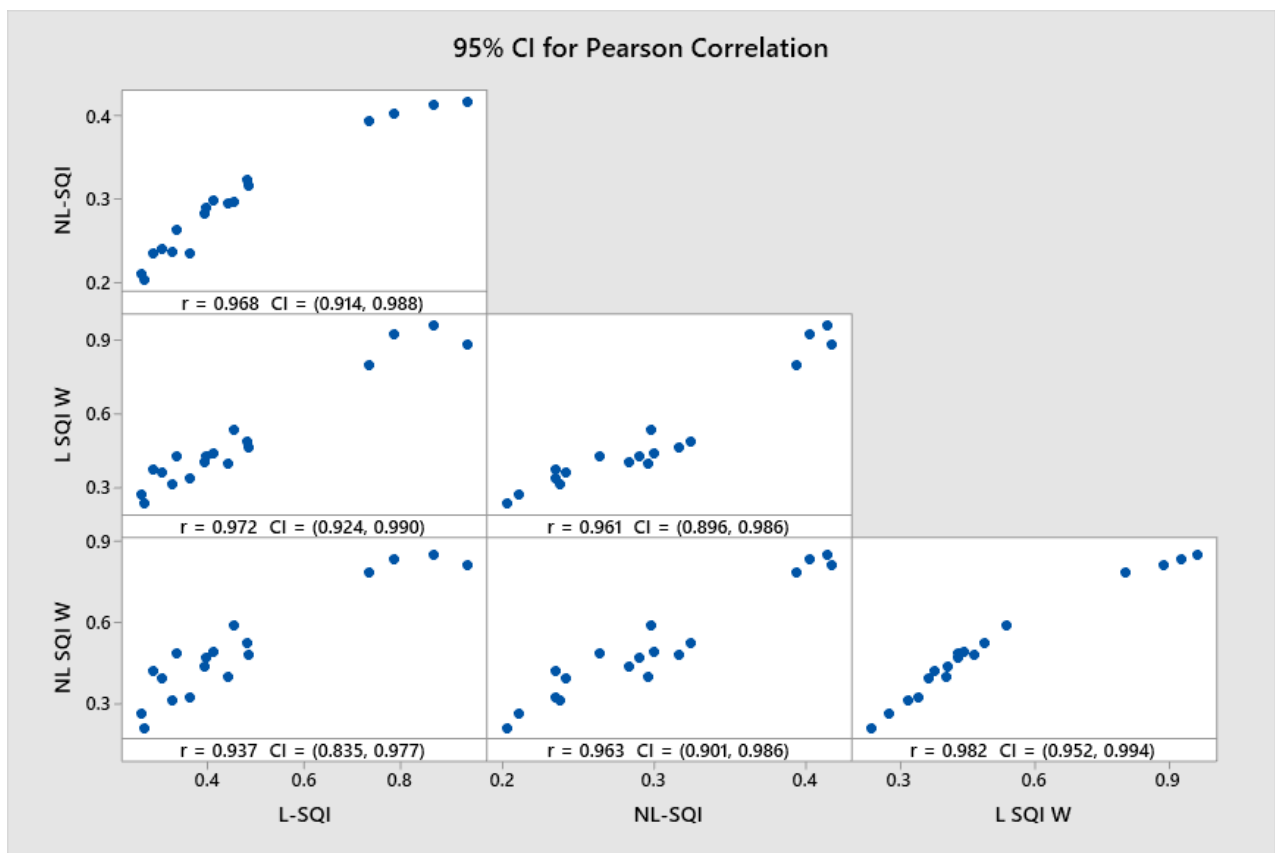


Figura 26. Matriz de correlación para los diferentes ICS calculados.

## FUNCIONES DEL SUELO

Las funciones del suelo y la calidad de este son compuestos estrechamente relacionados. Sin embargo, en este estudio la calidad del suelo estuvo más enfocada a evaluar sus propiedades conforme a su calidad inherente y para evaluar sus funciones estas se estudiaron a través de ecuaciones propuestas en un marco de evaluación para distintos tipos de suelos. La figura 27 muestra los valores de cada una de las funciones del suelo evaluadas por zona de manejo estudiada. Los resultados mostraron que la calidad del suelo y la capacidad de proporcionar ciertas funciones fueron mejores en la zona de preservación.

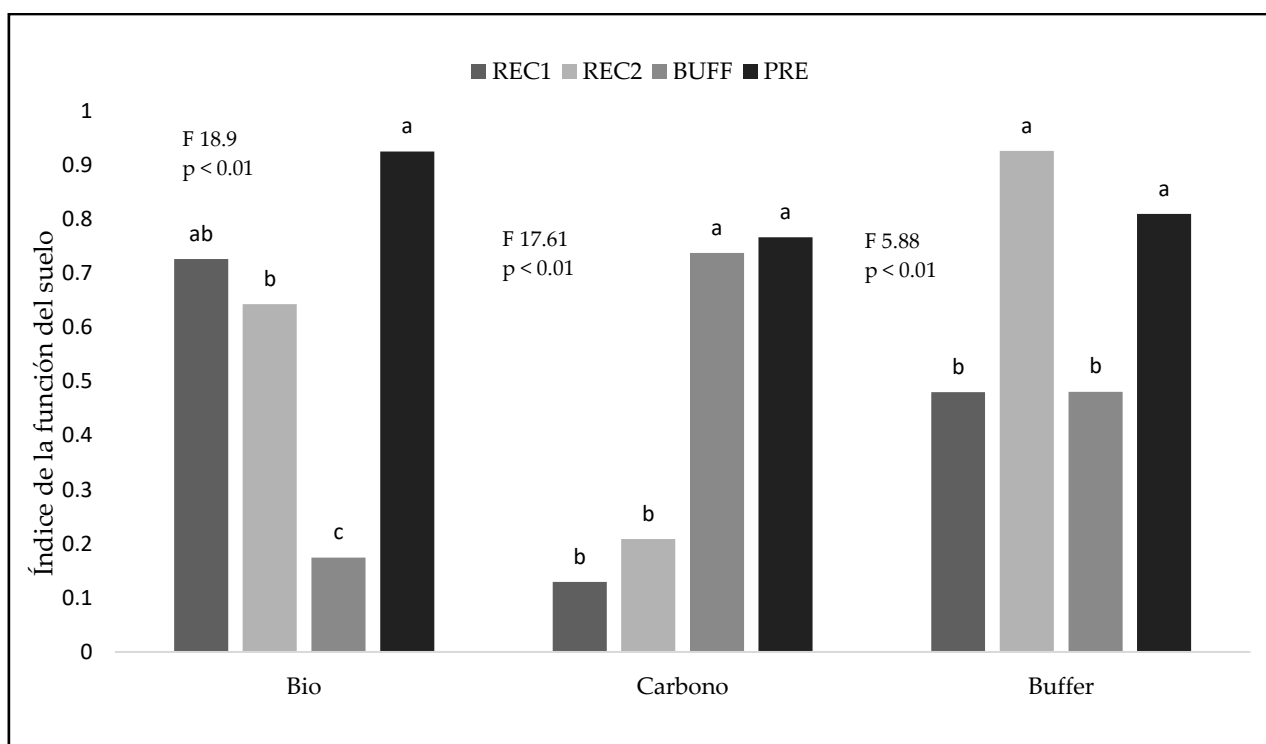


Figura 27. Funciones del suelo evaluadas por zona de manejo. Las letras muestran los resultados de la comparación de medias por medio de la diferencia mínima significativa de Fisher. REC1: sitios dentro de la subzona de recuperación en bosque de pino y pastizal; REC2: sitios dentro de la subzona de recuperación en pastizal con reforestación de pino; BUF: sitios en la zona de influencia y PRE: sitios en la subzona de preservación en bosque de pino.

Los suelos son considerados como uno de los principales reservorios globales para la biodiversidad, más del 40% de los organismos que habitan los ecosistemas terrestres poseen ciclos de vida relacionados con los suelos de forma directa (FAO *et al.*, 2021). De acuerdo con los valores

obtenidos de la función hábitat para organismos del suelo (Bio) encontramos que la zona de preservación tuvo el valor más alto (0.92), seguido de ambas zonas de recuperación tanto de bosque de pino como en el pastizal (0.73 y 0.64), y por último la zona de influencia presentó el valor más bajo (0.17). El cálculo de la función Bio permitió conocer que el sitio más adecuado para llevar a cabo esta función fue la ubicada dentro de la subzona de preservación lo cual se debe a que posee un mayor contenido de carbono y al uso de suelo que se relaciona en este caso con la escasa actividad humana de la zona. En cambio, el sitio dentro de la zona de influencia, aunque tuvo una considerable cantidad de carbono orgánico el uso del suelo disminuyó el valor del cálculo de la función. La función BIO es un indicador del potencial del suelo para preservar la biodiversidad del mismo y por lo tanto los suelos ricos en materia orgánica y no compactados son potencialmente capaces de albergar una reserva de biodiversidad relativamente mayor (Calzolari *et al.*, 2016).

El suelo actúa como filtro para proteger la calidad del agua, el aire y otros recursos (NRCS, 2011). Esta función es de filtración y amortiguamiento (BUF) la cual es un indicador de la capacidad de atenuación natural de los suelos (Calzolari *et al.*, 2016). La zona de recuperación en el área de pastizal obtuvo el valor más elevado (0.93), seguido de la zona de preservación (0.81) y los valores más bajos los tuvieron el sitio de recuperación en el bosque y la subzona de influencia (0.48 y 0.48). Ninguna de las zonas estudiadas tuvo valores medios de pH menores a 4.5 por lo que no hubo reducción en la capacidad de proveer la función y la capa freática se encontró por debajo de los 100 cm. El indicador que condicionó la función BUF fue la CIC, en los sitios con valores más elevados de CIC la función se redujo, aunque la función se haya reducido los datos no indican que no lleve a cabo la función; simplemente es menor.

Los bosques del mundo contienen 861 GtC (mil millones de toneladas de carbono), del que 44% forman parte del suelo, 42% de la biomasa aérea, 8% de la madera muerta y 5% del mantillo (Pan *et al.*, 2011). Los bosques de México almacenan alrededor de 8 GtC, cantidad equivalente a las emisiones mundiales de CO<sup>2</sup> (Maser *et al.*, 1997). Con respecto a los resultados obtenidos de la función de almacén de carbono (AC), se observó que el área de preservación obtuvo el valor más alto (0.77), posteriormente le siguió la zona de influencia con un valor de 0.73 y finalmente ambas zonas de recuperación tuvieron los valores más bajos (0.13 y 0.21). Los resultados nos mostraron el

importante potencial de almacén o sumidero de carbono de los suelos ubicados dentro del Parque (Cuadro 22).

Cuadro 22. Contenido de Carbono orgánico del suelo por subzona de estudio.

<b>CLAVE</b>	<b>Carbono Orgánico del Suelo</b> <b>Toneladas de C*ha<sup>-1</sup></b>
REC1	36.3
REC2	41.2
BUF	73.8
PRE	75.6

Lo cual adquiere importancia ante el escenario del cambio climático, ya que entre las medidas de remoción de dióxido de carbono existentes y potenciales figuran la forestación y reforestación, la restauración de la tierra y el secuestro de carbono en el suelo (IPCC, 2019). Dichas medidas deben ser aplicadas para incrementar el contenido de carbono en los suelos del PNIP. El manejo de los bosques juega un papel fundamental en los esfuerzos de México para la mitigación del cambio climático, pues actualmente el sector uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUSS) representa el 4.9% de las emisiones de GEI del país y, a la vez, los ecosistemas forestales absorben a aproximadamente el 26% de las emisiones totales de GEI de todos los sectores.

Las ANP son considerados sitios de enorme importancia dados los múltiples beneficios que proporcionan, en el caso del PNIP sus características lo hacen un sitio de enorme riqueza e importancia para los habitantes cercanos, comuneros, turistas y académicos. Sin embargo, la relevancia de las ANP aumenta significativamente en el contexto de cambio climático, ya que funge como una barrera ante sus efectos, lo que las hace ser factor importante de disminución de riesgos de desastres (CONANP, 2019).

### 10.3 PERCEPCIÓN AMBIENTAL

En este estudio entrevistamos a 14 personas, el 29% de los participantes fueron mujeres y el otro 71% fueron hombres; las edades de los entrevistados fueron entre 21 y 64 años. Se entrevistó un grupo de personas que actualmente viven en el municipio de Amecameca (10 participantes) y que han vivido siempre en el mismo lugar, además otro grupo de participantes que no viven cerca del parque (4); 3 viven en la Cd. de México y 1 en la ciudad de Puebla. La ocupación de los entrevistados que viven en Amecameca fue: 8 de los entrevistados son comuneros dedicados principalmente a la conservación de la vegetación dentro del PNIP, ellos realizan actividades de silvicultura, reforestación de zonas degradadas, realizan cultivos en la zona de influencia, poseen ganado que utilizan para consumo personal y para venta local; 2 de los entrevistados se dedicaron a la venta de plantas, árboles y flores, además de la agricultura y la floricultura. Todos estos entrevistados dependen directamente de las actividades que realizan dentro del PNIP y sus alrededores. Otros cuatro entrevistados no dependen directamente del parque, tres personas son investigadores de universidades (BUAP, UAM y UNAM) y uno más es divulgador científico.



Figura 28. Fotografías algunas de las personas entrevistadas. Fotografías propias.

Una de las limitaciones dentro de este trabajo fue el escaso número de participantes entrevistados (n=14), lo cual no permitió explorar los datos a través de las dimensiones institucionales y sociodemográficas. Sin embargo, la aplicación de entrevistas a profundidad ayuda a obtener datos profundos y ricos que favorecen la comprensión de la complejidad de la realidad del estudio (Okumah *et al.*, 2020).

#### *CONOCIMIENTO DEL SITIO*

Los actores sociales indicaron conocer los sitios en donde comienza el parque; pero suelen confundir los límites que lo separa de la zona de influencia, aunado a esto manifiestan que no poseen mapas en donde estén claramente establecidos estos límites. De acuerdo con los datos solo el 7% identifica con claridad los límites del parque y el 93% suele confundirlos. Los comuneros expresaron que es necesario que las autoridades o las universidades realicen mapas donde se establezcan los límites de los bienes comunales que ellos vigilan ya que esto ha sido motivo de enfrentamientos con la autoridad durante muchos años; además, manifiestan que varios sitios considerados dentro del PNIP en realidad son bienes comunales.

Los participantes identificaron diversos tipos de plantas, hongos y árboles presentes en la zona, los cuales se muestran en la figura 29. En total se mencionaron 15 tipos de organismos entre plantas, hongos y árboles, no se observó variación considerable entre la vegetación identificada por los entrevistados. El tipo de vegetación más mencionado fueron el bosque de pino, el pastizal, el bosque de encino y los cultivos agrícolas. La vegetación referida es la más representativa del parque, sobre todo el bosque de pino y pastizal o zacatonal.

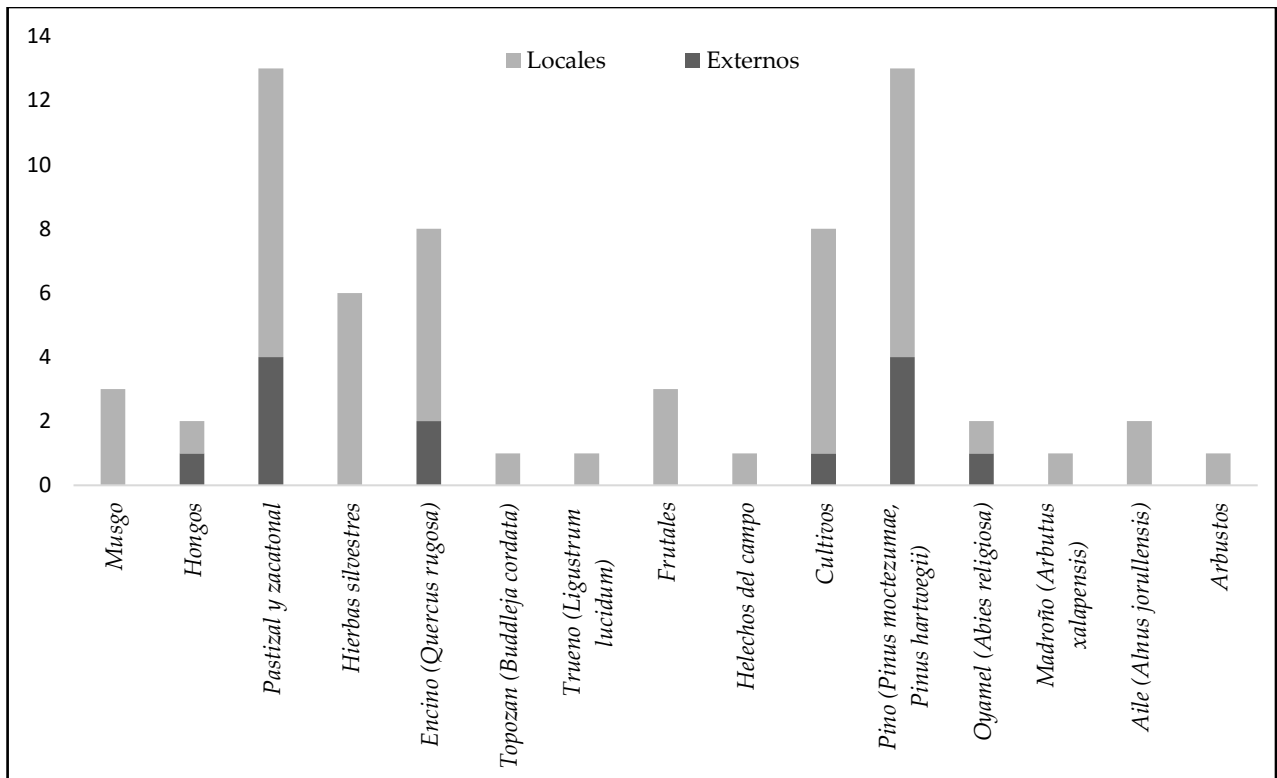


Figura 29. Tipo de plantas, hongos y árboles mencionada por los participantes.

Las personas entrevistadas que viven en Amecameca refirieron la presencia de distintos organismos principalmente organismos del suelo, así como aves y roedores; sin embargo, no conocen sus nombres. Por otro lado, las personas que no viven cerca de la zona pudieron identificar organismos del suelo y otros característicos del sitio. Las lombrices, cochinillas, hormigas, el zacatuche y las lagartijas de collar fueron los animales mayormente mencionados. En total se mencionaron 56 organismos diferentes, todos fueron mencionados por sus nombres comunes y posteriormente se buscaron dentro del programa de manejo para corroborar su presencia dentro del parque, una vez comprobado se localizó su nombre científico para facilitar su identificación, los organismos se muestran en la figura 30.

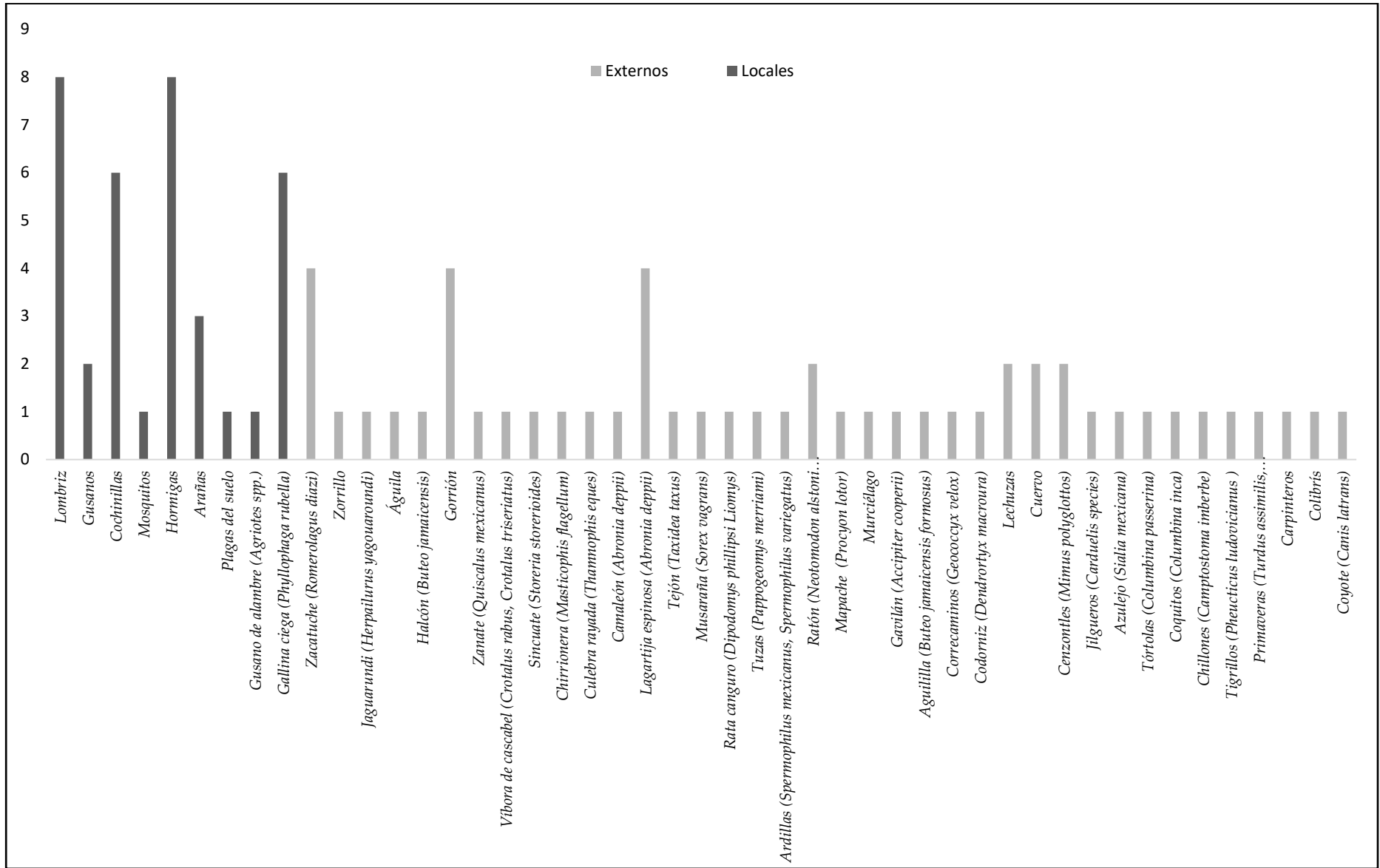


Figura 30. Animales mencionados por los entrevistados.

## BENEFICIOS QUE PERCIBEN DEL ECOSISTEMA

Es necesario un cambio de paradigma, que considere la conservación de la biodiversidad y los sitios de provisión de agua y captura de carbono como servicios importantes, que reconozca que sin un adecuado manejo las comunidades y poblaciones beneficiadas de los servicios ambientales se verán afectadas en la protección de sus medios de vida en el mediano y largo plazo (CONANP, 2019). Las respuestas de los entrevistados fueron organizadas y clasificadas dentro de cada una de las categorías de los servicios ecosistémicos propuesta por la evaluación de los ecosistemas del milenio en el año 2005 (Cuadro 23).

Cuadro 23. Clasificación de los servicios ecosistémicos (MEA, 2005).

Tipos de servicios ecosistémicos			
<b>Provisión</b>	<b>Regulación</b>	<b>Soporte</b>	<b>Cultural</b>
Alimento	Regulación del clima	Ciclo de nutrientes	Estética
Agua fresca	Regulación de inundaciones	Formación del suelo	Espiritual
Madera y fibras	Regulación de enfermedades	Producción primaria	Educativo
Combustible	Purificación del agua		Recreativo

Los servicios ambientales identificados se pudieron clasificar entre los servicios de provisión, regulación y cultural. De acuerdo con las respuestas de los entrevistados el medio natural que les rodea representa la vida, es para ellos el lugar más importante porque ahí se origina todo. El ecosistema es el lugar en donde crecen las plantas. Así mismo los participantes reconocieron los beneficios del PNIP como el lugar en donde se limpia el agua de lluvia, también en donde se limpia el aire que respiran. Para los habitantes del municipio de Amecameca el parque es el sitio que les da la mayoría de su alimento e ingresos económicos. Los beneficios económicos que perciben derivan de las actividades que realizan como son: la extracción de tierra para macetas, extracción de hongos y plantas comestibles tanto para uso personal como para venta local y cultivo de árboles para venta. Los comuneros aspiran poder ser beneficiados con los programas de pago por servicios ambientales, sin embargo, no cuentan con información para poder lograrlo. Para quienes no viven cerca de la zona el parque es una de las áreas naturales protegidas más importantes del país, la principal zona de montaña del territorio nacional que representa historia, naturaleza y belleza

escénica; así como, un sitio no solo para la conservación de la biodiversidad sino para la conservación de los servicios ecosistémicos incluidas sus funciones reguladoras, además de ser territorios bioculturales en donde es necesaria la planeación territorial con base en el diagnóstico ecológico, sociocultural y económico de las comunidades. El PNIP tiene una importancia estratégica pues es una importante reserva hidrológica y forestal que afecta a una gran población humana. Los principales beneficios mencionados fueron el agua y aire limpio, recreación, captura de carbono, hábitat para la biodiversidad, control de la erosión, inundaciones y deslaves, actividades recreativas relacionadas con el ecoturismo, educación e investigación. Algunos beneficios económicos que podrían obtenerse son: la generación de empleos para visitas guiadas e información, extracción de recursos forestales no maderables de forma controlada y la obtención de beneficios económicos debido a la venta de material didáctico acerca del parque.

Otro aspecto importante dentro de las entrevistas es la percepción sensorial, es decir lo que sienten las personas al estar en contacto con el entorno, los entrevistados mencionaron que el bosque les permite respirar mejor y les proporciona tranquilidad, además el olor que perciben cuando están en el bosque es muy diferente que cuando se encuentran en zonas agrícolas o urbanizadas; mencionaron que cuando el suelo no es fértil éste pierde su olor. Los entrevistados expusieron que perciben bienestar emocional y psicológico al estar en contacto con el medio natural del parque. La figura 31 muestra la frecuencia de las menciones en cuanto a los beneficios que perciben los entrevistados.

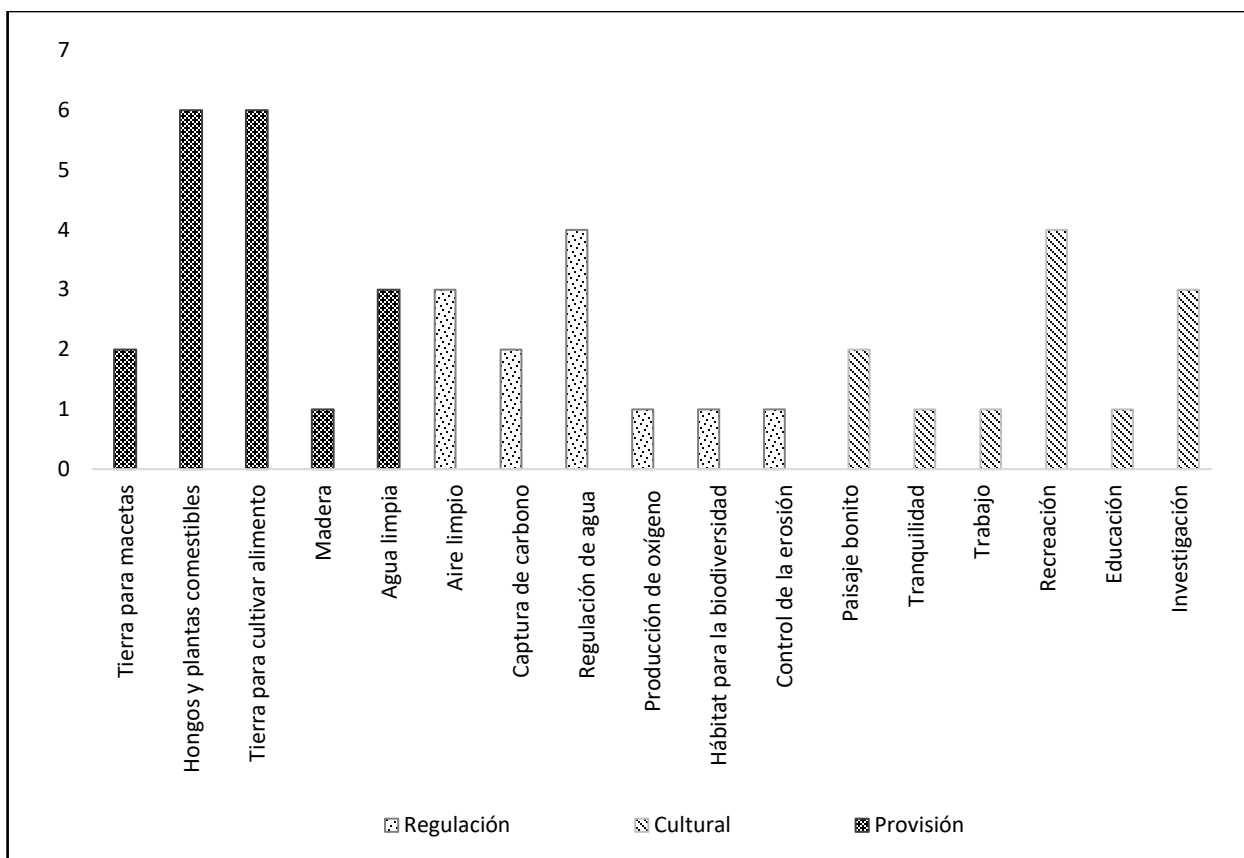


Figura 31. Frecuencia de los servicios ecosistémicos mencionados por los entrevistados.

La figura 32 muestra los beneficios que perciben del ecosistema dentro del parque los entrevistados y los vínculos que se establecen con los componentes del bienestar humano, así como el potencial de mediación que pueden diferir en distintos ecosistemas y regiones. De acuerdo con la figura los servicios de provisión poseen un potencial de mediación alto con la seguridad y el material básico para una buena vida, el potencial es medio con la salud y bajo con las buenas relaciones sociales. En cuanto a los servicios de regulación estos representan un potencial de mediación medio con la seguridad, el material básico para una buena vida y la salud y además los vínculos son de intensidad fuerte. Para los servicios culturales la intensidad de los vínculos con el bienestar humano es débil y medio; el potencial de mediación con la seguridad es medio, en cuanto al material básico para una buena vida es bajo al igual que para la salud y las buenas relaciones humanas (MEA, 2005). Lo anterior muestra un panorama sobre el impacto de los servicios que proveen los ecosistemas y los múltiples beneficios sobre el bienestar humano que se generan a partir de estos.

Potencial de mediación por factores socioeconómicos

Intensidad de los vínculos entre los servicios de los ecosistemas y el bienestar humano

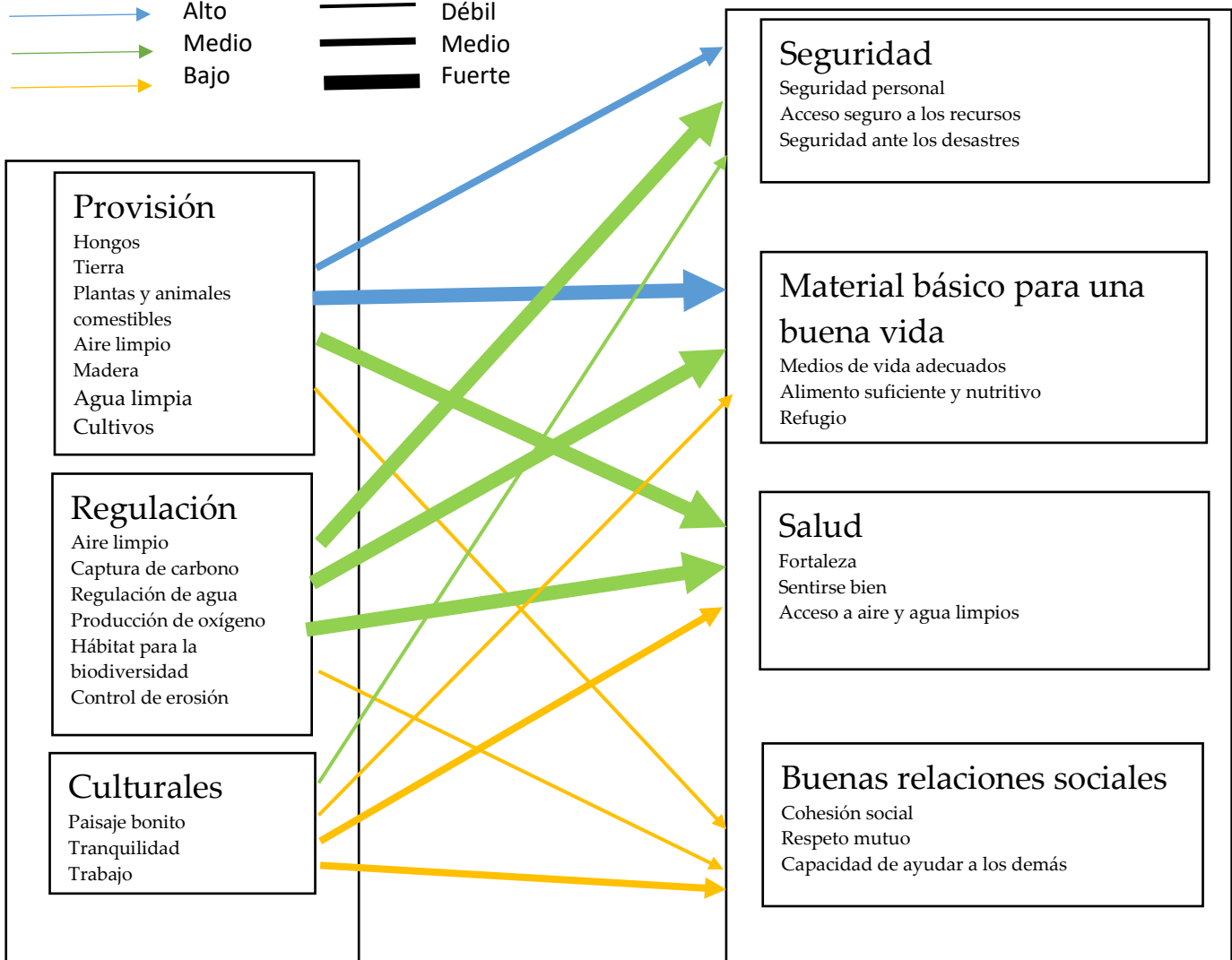


Figura 32. Servicios ecosistémicos detectados por los entrevistados y su relación con los componentes del bienestar.

### *PROBLEMAS QUE DETECTAN EN LA ZONA*

La mayoría de los entrevistados coincidieron que el PNIP se ha degradado mucho durante el tiempo, ellos manifestaron que durante sus vidas han podido ser testigos de los cambios negativos que se han presentado. Todos comentaron que el suelo se ha degradado y el bosque tiene menos vegetación y menos árboles; además las zonas de cultivo se han extendido; así como una considerable disminución de lluvias; todo esto provoca que el agua y el carbono se pierdan. En las respuestas también se expresó la preocupación por la actividad volcánica, la inseguridad debida a asaltos y secuestros, la tala clandestina; siendo la inseguridad la mayor preocupación.

Los entrevistados que no viven cerca del parque manifestaron que ha aumentado el número de asentamientos humanos cerca del parque, ha cambiado el uso de suelo, existe mucha tala clandestina, incendios forestales, extracción de tierra, plantas y la caza. Así como, falta de educación ambiental, mal uso de los recursos y aunque existe un programa de manejo este no se cumple puesto que se necesitan más recursos humanos para la vigilancia y supervisión. El futuro del parque resulta preocupante ante la inminente desaparición de los glaciares, así como la inseguridad por robo.

Los problemas o amenazas más mencionados fueron la pérdida de cobertura forestales y la degradación de los recursos dentro del parque, así como la inseguridad y la extracción de especies para consumo o venta. Lo anterior tuvo algunas coincidencias con un estudio realizado en 2017 (CONANP-GIZ, 2017), en donde se identificó como la principal amenaza que ocurre fuera del polígono del parque a la degradación y disminución de la cobertura forestal y las mayores amenazas dentro de los límites del parque fueron los incendios forestales, la ganadería extensiva y la extracción de productos forestales no maderables.

El estudio de las percepciones ambientales resulta útil para ayudar a determinar juicios, decisiones y conductas; los cuales conducen a acciones con consecuencias reales (Pidgeon, 1998), ya que es la percepción la que estimula a la conducción de las acciones (Calixto-Flores & Herrera-Reyes, 2010). Algunos autores (Fleishman *et al.*, 1999; Pereira *et al.*, 2018) consideran que incluir el conocimiento de la población apoya el conocimiento científico y favorece la toma de decisiones con respecto al manejo de las áreas protegidas y además, son las comunidades y la población las que poseen un papel importante en el funcionamiento adecuado de las áreas de conservación.

De acuerdo con la experiencia de los entrevistados existen medidas que pueden adoptarse o incrementarse para evitar la extensión de las áreas degradadas, ya que, a pesar de contar con un plan de manejo, el PNIP es explotado de manera inadecuada en distintas zonas. Las principales medidas mencionadas fueron divididas en 6 principales categorías; las relacionadas con el entorno natural, medidas de seguridad, las agrícolas, económicas, sociales y académicas (Cuadro 24).

Cuadro 24. Actividades que sugirieron los entrevistados para mejorar la condición del Parque.

Ecológicas	Seguridad	Agrícolas	Económicas	Sociales	Académicas
Plantar árboles en mayores áreas, así como supervisar su crecimiento y supervivencia.	Implementar medidas de vigilancia para disminuir los incendios.	Establecer de rotación de cultivos	Apoyos económicos para cruzadas de reforestación, vigilancia y para la apertura o rehabilitación de brechas corta fuego.	Programas de educación y concientización ambiental. Oportunidades para participar más activamente dentro de las actividades de educación ambiental.	Aumentar la investigación sobre los recursos naturales dentro del parque.
Limpieza de ríos e implantación de medidas para evitar su contaminación.	Incrementar la vigilancia para evitar asaltos y otros delitos.	Disminuir el uso de agroquímicos	Apoyo para la certificación internacional y poder participar en programas de venta de bonos de carbono y agua		

---

Limpiar las zonas que son utilizadas como basureros clandestinos.	las	Aumentar la vigilancia y atención por emergencias relacionadas con la actividad volcánica.	la	Implementar y prácticas agrícolas más amigables con el suelo como la labranza cero.
---	-----	--	----	---

---

Los comuneros reciben apoyo económico anual, sin embargo, afirman que la cantidad que perciben es insuficiente debido al número de hectáreas que deben vigilar. El resto de los participantes que no son comuneros confirman que les gustaría recibir algún tipo de apoyo económico para ayudar en las tareas de vigilancia y cuidado de las áreas del PNIP, así como de actividades de divulgación que resalten la importancia de la conservación del parque. El grupo de investigadores que fue entrevistado también menciona que es necesario que se incremente el apoyo para poder realizar investigación dentro del área. Lo mencionado por los actores sociales resulta sumamente importante en la actualidad ya que el presupuesto asignado a la conservación de las áreas naturales protegidas ha ido disminuyendo durante los últimos años (SEMARNAT, 2021) como lo indica la figura 33.

Pudimos determinar que existe conciencia y conocimiento de los beneficios directos e indirectos que proporciona el parque a la sociedad, lo que de acuerdo con algunos documentos podría hacer que cada vez más mexicanos apoyaran su conservación y que, por lo tanto, aumentara la inversión pública destinada a la protección del sitio (Bezaury-Creel, 2009), sin embargo, el panorama de la asignación del presupuesto manifiesta lo contrario. Teóricamente los programas federales de protección buscan aumentar la calidad de vida de las comunidades y al mismo tiempo compensar las restricciones impuestas para el aprovechamiento tradicional de los recursos; sin embargo, las acciones funcionan más como paliativos que acciones que realmente mejoren las condiciones sociales.

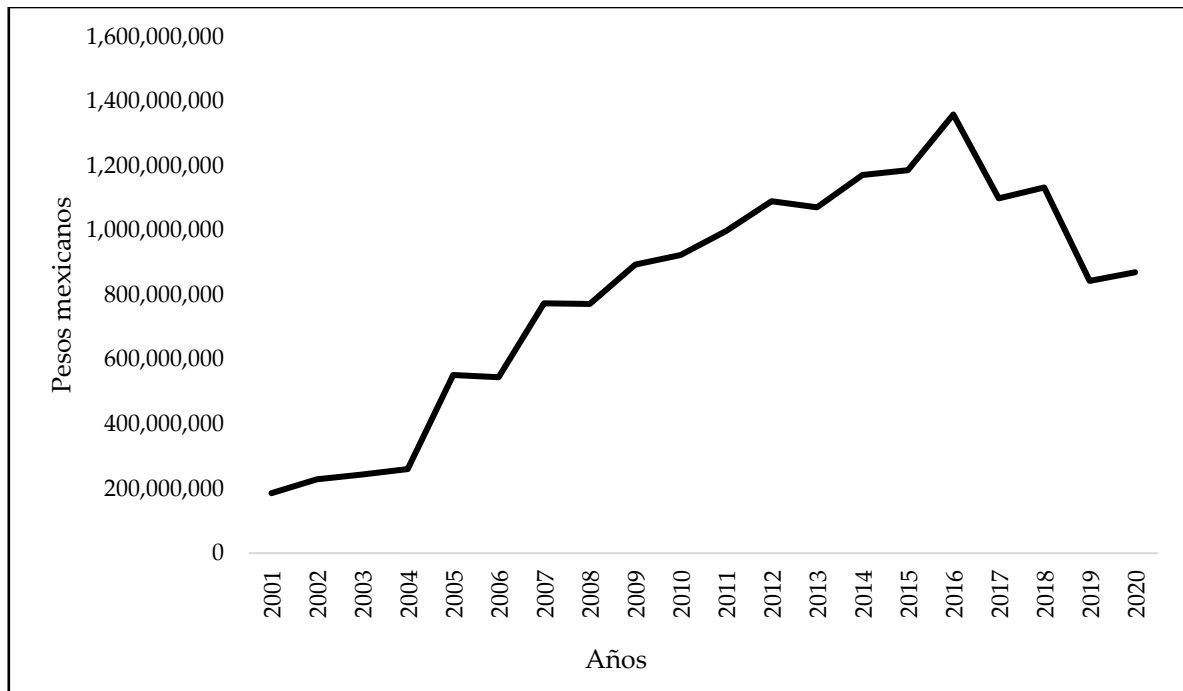


Figura 33. Historial del presupuesto asignado por SEMARNAT a la CONANP del año 2001 al 2020.

En un estudio del 2011, dentro de un área natural protegida en Baja California, se reveló que no existía mejora en las condiciones de vida de las comunidades del ANP e incluso sus condiciones se habían degradado, por lo que se propuso se integrara dentro de los programas de manejo una metodología que estudiara variables de bienestar social (Riemann *et al.*, 2011). En el caso del PNIP y de acuerdo con las respuestas de los entrevistados no se han realizado evaluaciones similares y dentro del programa de manejo del PNIP no existe una metodología dedicada al estudio del bienestar social derivado del manejo del parque.

En una encuesta realizada a nivel nacional, se apreció un bajo nivel de contacto de la población con sus áreas naturales protegidas, los resultados de la encuesta mostraron que la población que sí había tenido contacto directo con las áreas naturales protegidas (45% de los encuestados) manifestaron tener una buena percepción sobre las condiciones en las que se encuentran las áreas (Bezaury-Creel, 2009). Lo cual contrasta con lo que fue encontrado en esta investigación en donde las personas vinculadas al manejo de forma más directa y que se han encargado de su estudio muestran preocupación por el estado actual y futuro, ya que manifiestan que el Parque Nacional se ha degradado en el tiempo.

Otro estudio buscó valorar la economía de la recreación, se entrevistaron varios visitantes provenientes de la Cd. de México, el Estado de México y Puebla que visitaron el PNIP que llegaron a Paso de Cortés, dicho estudio tuvo como finalidad establecer los beneficios económicos a partir de las actividades recreativas que realizaron, además de conocer su percepción sobre el parque. En cuanto a la derrama económica que generaron los visitantes en el parque, se determinó que por vehículo (5.4 personas) se gastaron 262.55 pesos, este valor se multiplicó por 50 mil que fue el número aproximado de visitantes al año, el resultado sugirió que el servicio de recreación del PNIP generó alrededor de 9.2 millones de pesos al año. En cuanto a la percepción del medio ambiente dentro del PNIP, el 80% de los visitantes manifestaron que el parque contribuye a mantener el aire limpio, combate el cambio climático, a la recarga de los mantos acuíferos, a evitar la erosión, mantener la biodiversidad y mantener valores culturales. El 39% de los entrevistados coincidió en que el servicio más importante fue la conservación de la biodiversidad, se observó que los visitantes pudieron reconocer los beneficios que proporciona el parque sin embargo, al no estar en contacto directo o formar parte de las actividades cotidianas dentro del PNIP no manifestaron preocupación en cuanto al estado del mismo (CONANP-GIZ, 2017) a diferencia de las personas involucradas en su estudio, manejo, actividades diarias, quienes sí muestran preocupación por el estado del parque y el futuro de este.

Un fenómeno similar se registró en Noruega (Engen *et al.*, 2019), en donde al evaluarse la percepción de actores sociales involucrados en las ANP se determinó que las personas que pertenecían a organizaciones no gubernamentales y no tenían contacto tan directo con las zonas tuvieron una percepción más enfocada hacia la preservación de la naturaleza a pesar de las necesidades de las personas locales, en cambio quienes se encontraban más cerca y tenían actividades dentro de las ANP su enfoque fue hacia mejorar la relación hombre y naturaleza, es decir mejorar las actividades humanas y al mismo tiempo conservar la naturaleza.

Ya se ha observado que existe relación entre el conocimiento ecológico local y el conocimiento científico (Karlton *et al.*, 2013; Cebrián-Piqueras *et al.*, 2020), por lo que indagar entre personas cercanas al suelo sobre las propiedades de éste resulta igual de valioso que el conocimiento científico. El concepto de salud del suelo ha sido adoptado por quienes consideran que existe una estrecha relación entre la calidad del suelo y el bienestar humano (Burbano Orjuela, 2017; Steffan *et al.*, 2018).

De acuerdo con las respuestas de las personas que respondieron el cuestionario sobre la salud del suelo, algunos aspectos relacionados directamente con sus propiedades fueron señaladas como saludables, lo cual indica una buena condición del suelo; estas propiedades fueron la profundidad del suelo, aireación, el olor, la cubierta de la superficie, la corteza superficial, el tacto, la retención de agua, el color y la estructura del suelo. Aquellas propiedades consideradas deficientes fueron la presencia de insectos y lombrices, el control de la erosión, la compactación, la textura, la dureza, la descomposición, el drenaje y la infiltración. Pocos aspectos fueron mencionados como no saludables de acuerdo con los entrevistados, sin embargo, es importante prestar atención a los aspectos como la estructura del suelo, el color, la compactación, la cubierta de la superficie y la textura del suelo para tomar medidas adecuadas (Figura 34). Estos aspectos considerados deficientes se encuentran estrechamente relacionados con la pérdida de cobertura vegetal, por lo tanto, es importante tomar medidas para realizar programas eficientes de reforestación. Todos los entrevistados mencionaron que el suelo es bueno y adecuado para los servicios ambientales; sin embargo, los participantes indicaron que si la degradación continúa podría modificarse su capacidad para proporcionar sus beneficios como la filtración de agua y el secuestro de carbono. Estas observaciones hechas por los participantes resultan sumamente importantes, ya que los suelos son los principales proveedores de servicios ecosistémicos críticos, pero estos no suelen ser reconocidos y, en general no se comprenden bien, ni el vínculo entre el capital natural del suelo y los servicios ecosistémicos (Breure *et al.*, 2012).

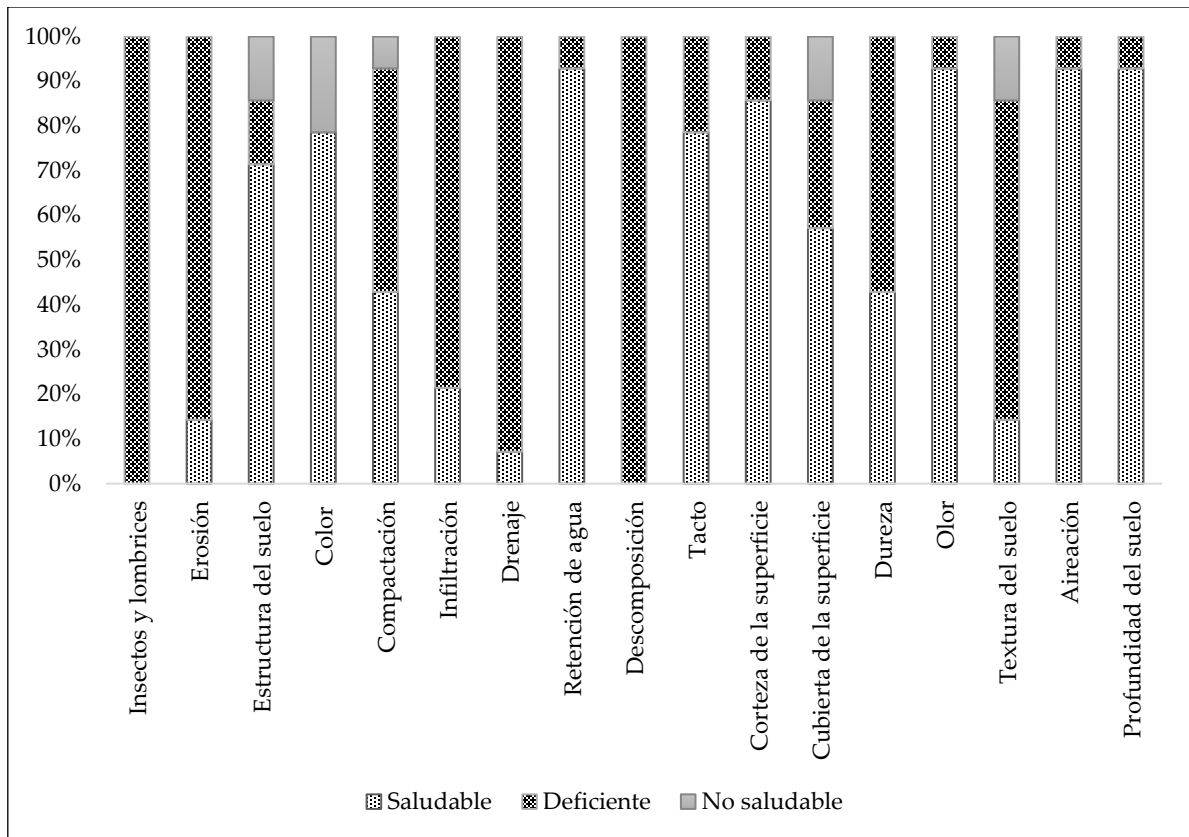


Figura 34. Frecuencia de respuestas de los entrevistados con respecto a la evaluación de las propiedades del suelo dentro del índice de salud del suelo.

La apariencia de los árboles fue considerada como saludable, los árboles que se observan en su mayoría se encuentran fuertes y altos, también se observó poca deficiencia de nutrientes y buena resistencia a la sequía; sin embargo, la resistencia a las plagas y enfermedades fue un factor considerado como deficiente ya que los entrevistados mencionaron que es evidente que existen muchas plagas que pueden afectar a los árboles. Durante años recientes se ha incrementado la incidencia en plagas y enfermedades forestales lo que representa un riesgo importante para asegurar la conservación de los ecosistemas forestales, la provisión de los servicios ambientales, y la productividad del sector forestal (CCMSS, 2016).

En cuanto al aspecto de la salud animal, se mostró que la presencia de animales es deficiente y los animales no se ven sanos; debido a que en años anteriores era más frecuente observar animales en mayor número. Lo anterior podría deberse a que se ha manifestado un importante cambio en el uso del suelo dentro del parque a pesar de ser un ANP, lo cual resulta preocupante considerando

que la pérdida de hábitats debida al cambio de uso del suelo es una de las principales amenazas para la biodiversidad en todo el mundo (Martinuzzi *et al.*, 2015).

En cuanto a la salud humana los entrevistados comentaron que existen muchos problemas de salud ya que la mayoría de los comuneros son personas ancianas y enfermas (Figura 35), por lo cual este criterio fue considerado como deficiente por la mayoría de los entrevistados. En el municipio de Amecameca solo el 13% de la población es considerada como no pobre y no vulnerable y el 87% restante se encuentra en estado de vulnerabilidad por carencias sociales (37.1%), vulnerable por ingreso (4.5%), en estado de pobreza moderada (37.3%) y en pobreza extrema (8.1%) (SEDESOL- CONEVAL, 2010). Las estadísticas indican que la pobreza está presente en el municipio y además de acuerdo con los entrevistados cercanos al ANP este es un aspecto que disminuye su salud.

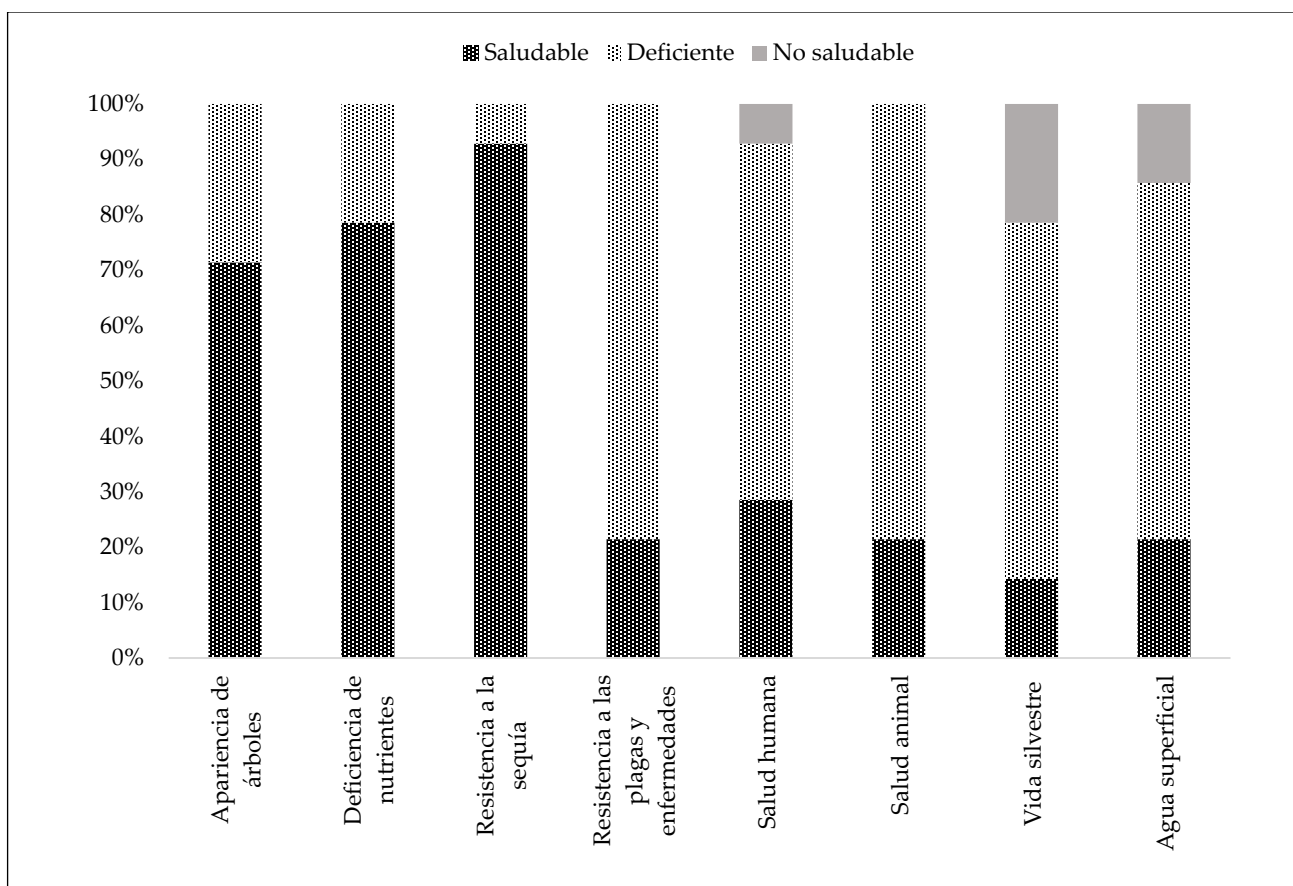


Figura 35. Frecuencia de respuestas de los entrevistados con respecto a la evaluación de las propiedades de vegetación, salud animal y agua dentro del índice de salud del suelo.

El cuadro 25 muestra la frecuencia de las calificaciones que asignaron los entrevistados sobre el cuestionario de salud del suelo con respecto a las propiedades indagadas que fueron calificadas como saludables, deficientes o no saludables, cada columna presenta las respuestas de cada uno de los entrevistados.

La figura 36 presenta los porcentajes correspondientes a la condición de la salud del suelo, la condición del suelo saludable predominó con un 56% de los aspectos evaluados, la condición deficiente tuvo un 36% y la condición no saludable obtuvo 4%.

Cuadro 25. Resultados de la calificación de la salud del suelo por cada uno de los participantes.

Entrevistados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Media
Saludable	13	12	13	12	13	14	15	17	14	12	15	13	14	16	14
Deficiente	11	12	11	12	12	11	10	8	11	13	8	10	6	5	9
No saludable	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	5	4	1

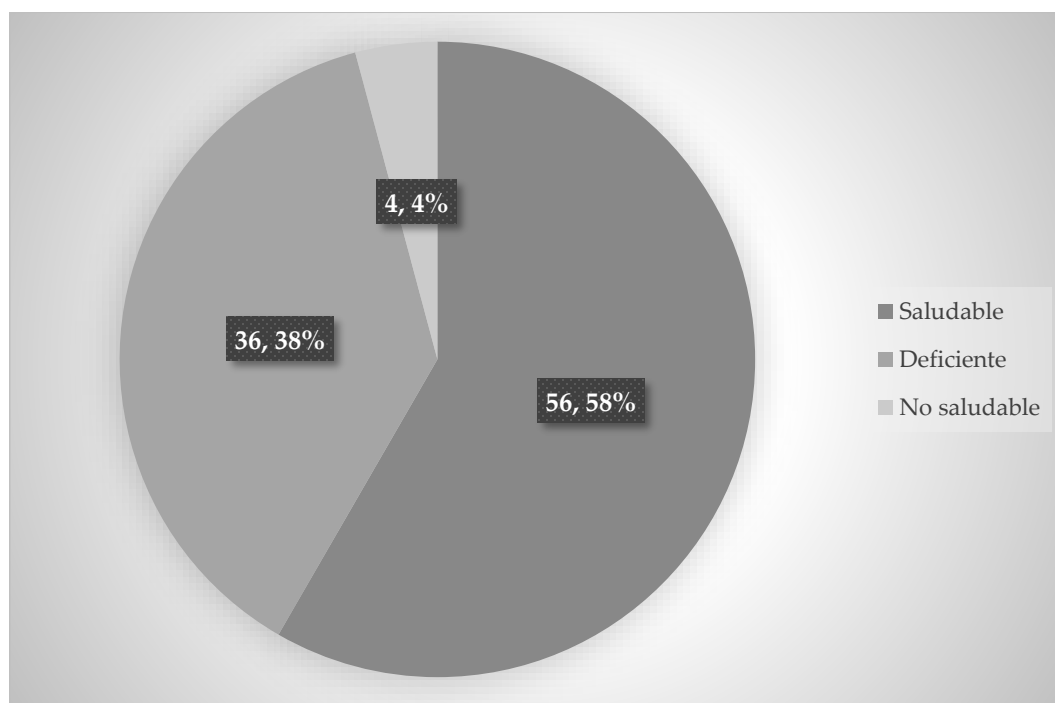


Figura 36. Evaluación de la salud del suelo.

En general se observó que predominó la condición saludable en la evaluación de salud del suelo, sin embargo, es necesario examinar detenidamente qué es lo que ha hecho que el sitio se encuentre en un estado menos que óptimo o saludable. Las propiedades de los indicadores deteriorados

deben vigilarse de cerca a lo largo del tiempo para determinar si se están deteriorando o mejorando. Este tipo de evaluaciones resulta de suma importancia ya que permite evaluar la salud de suelo empleando herramientas alternativas a los análisis de campo y laboratorio convencionales ya que se ha observado que estas herramientas son realmente representativas y mucho más convenientes, precisas, eficaces en distintos entornos y fácilmente comprensibles para los agricultores o los manejadores con escasos recursos (Islam *et al.*, 2017).

El sistema de puntuación de la salud del suelo fue originalmente creado para ser usado en evaluaciones dentro de zonas agrícolas, sin embargo, con algunas adaptaciones puede ser empleado en suelos destinados a la conservación. Lo cual implicaría el uso de una herramienta de menor costo, rápida y confiable si se establecen con claridad los objetivos de la evaluación y si la población es seleccionada de forma adecuada para los fines que se persiguen.

En recientes estudios sobre todo en zonas agrícolas (Mann *et al.*, 2021) se ha vuelto a manifestar la preocupación por las variables que los agricultores consideran importantes, en el caso de zonas de agricultura convencional sus definiciones se han centrado en aspectos biológicos y relacionados con la productividad; y en el caso de los agricultores orgánicos estos se han mostrado más abiertos a evaluaciones como la propuesta por la universidad de Cornell (Moebius-Clune *et al.*, 2016) y han sido más propensos a dar una definición holística de la salud del suelo.

La salud del suelo es un concepto integrador que refleja la capacidad del suelo para responder a la intervención agrícola de modo que siga apoyando tanto la producción agrícola como la prestación de otros servicios ecosistémicos (Kibblewhite *et al.*, 2008). Las evaluaciones de la salud del suelo deben tener en cuenta una mayor pluralidad de valores del suelo y sus resultados en el bienestar humano, que pueden ayudar a facilitar la transformación del sistema alimentario o de provisión para que sea equitativo, justo, saludable y sostenible (Friedrichsen *et al.*, 2021). Dichos principios deben ser incluidos en zonas forestales destinadas a la conservación para el monitoreo de los recursos naturales y enfocar la atención en parámetros críticos pero que involucran distintos elementos del ambiente, lo cual podría ayudar a la detección temprana de alteraciones que comprometan los recursos naturales y por lo tanto la provisión de servicios ecosistémicos o ambientales.

Como resultado de esta investigación se generó el diagrama de la figura 37, el cual muestra las principales interrelaciones dentro del sistema del suelo forestal en el Parque relacionadas a la calidad del suelo. Dicho sistema se divide en cuatro subsistemas. Los cuales son el ambiental, social, económico y político. El subsistema ambiental involucra aquellos aspectos relacionados con las propiedades del suelo tanto inherentes como dinámicas y el tipo de calidad que deriva de estas. El subsistema social involucra a aquellos actores sociales que participan en las actividades de conservación y manejo dentro del parque, como son los comuneros, la población local y los investigadores, quienes a su vez generan una percepción derivada de sus interacciones con el entorno y que se ve afectada por los beneficios que perciben, sus preocupaciones o amenazas y las sugerencias para mejorar el parque. El subsistema económico se refiere a aquellos ingresos que obtienen las personas y que derivan de las actividades permitidas, así como de los apoyos que otorga la CONANP. El subsistema político contempla a los administradores, autoridades locales, estatales y nacionales que participan en el manejo del parque y quienes a través de la CONANP publicaron el plan de manejo para regular las actividades dentro del parque. Los cuatro subsistemas tienen convergencia con los servicios ecosistémicos o ambientales. A través de este esquema se pudo apreciar la importancia de incorporar un enfoque interdisciplinario en el estudio de la calidad del suelo en suelos forestales destinados a la conservación dentro de un área natural protegida.

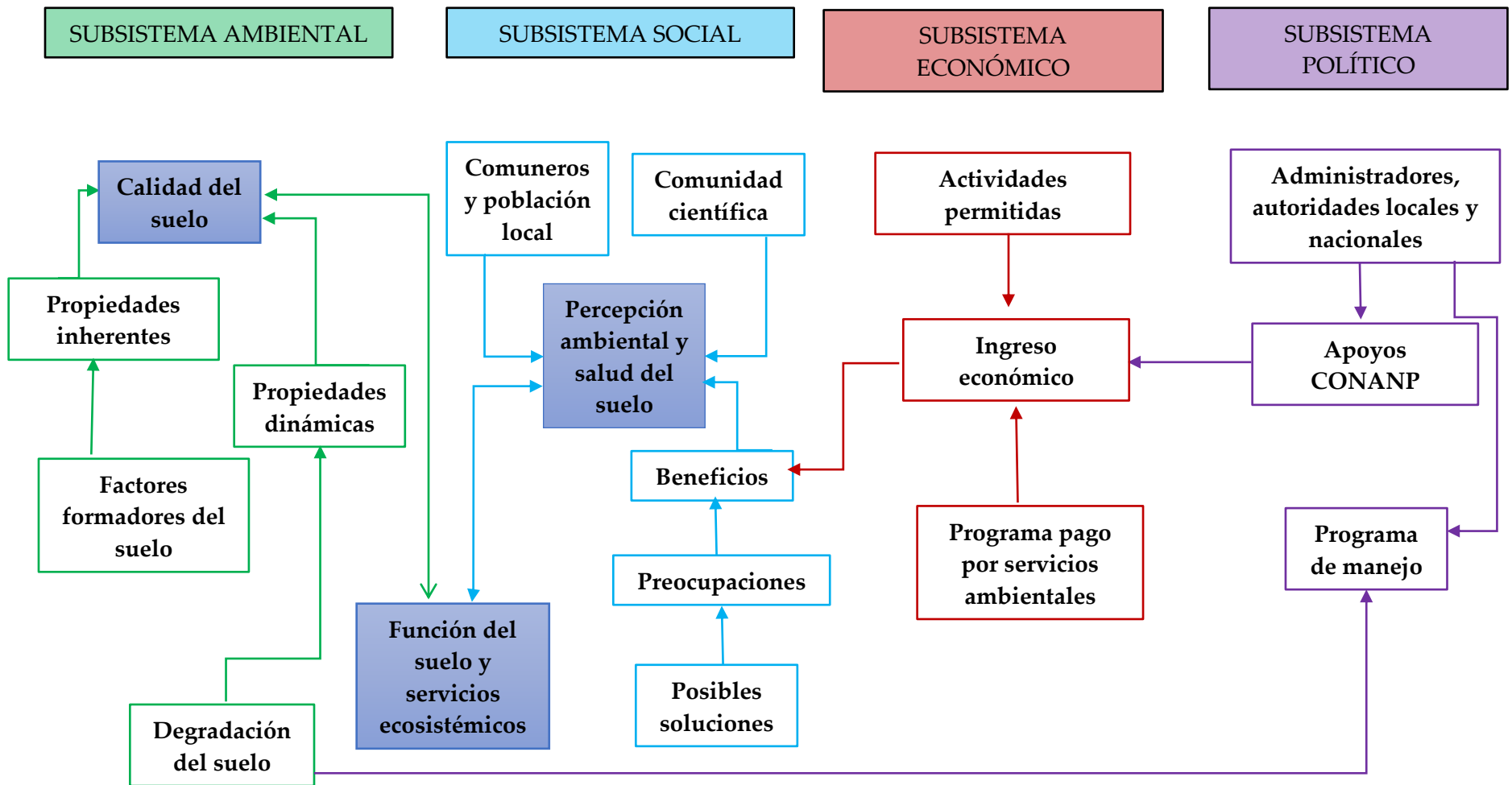


Figura 37. Sistema de la calidad del suelo forestal y sus servicios ambientales dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

## 11. CONCLUSIONES

- Los resultados del índice de calidad mostraron que en la subzona de preservación la calidad del suelo es mejor, lo cual se debió principalmente al mayor contenido de nitrógeno y la elevada ponderación dentro del ACP.
- La subzona de influencia mostró menor calidad que la zona de preservación, pero fue mayor que ambas zonas en recuperación. Esto debido a un mayor contenido de nitrógeno, la subzona de influencia a pesar de encontrarse en una zona fuera de los límites del parque se ha visto beneficiada del manejo de la población ya que sus valores de carbono orgánico y nitrógeno fueron más altos que las zonas de recuperación.
- Los dos sitios dentro de la zona de recuperación presentaron menor calidad de suelo debido principalmente al bajo contenido de nitrógeno total resultado de la manera inadecuada en que fue explotada en el pasado y a que solo en años más recientes se han destinado actividades a su recuperación.
- El análisis de varianza evidenció que los índices de calidad más adecuados fueron los obtenidos por la estandarización lineal de los datos tanto el método aditivo como el ponderado, ya que permitieron diferenciar de mejor forma los valores entre las distintas calidades de las zonas estudiadas.
- En cuanto a las funciones del suelo, la zona de preservación fue más adecuada para la función Bio y la función de almacenamiento de carbono, esto debido al uso del suelo que está relacionado con una menor actividad humana en comparación con las otras subzonas, así como con el alto contenido de carbono orgánico del suelo y la baja densidad aparente. En relación con la función buffer la zona de preservación mostró un buen potencial para llevarla a cabo, sin embargo, fue ligeramente más bajo que la zona de recuperación en pastizal.

- La subzona de influencia mostró menos capacidad para llevar a cabo la función Bio lo cual estuvo determinado por el uso del suelo, ya que al ser una zona donde la actividad humana está más presente disminuye el valor de la función. Para la función carbono fue más adecuada que ambas zonas de recuperación, pero menor que la zona de preservación debido a su alto contenido de carbono y la baja densidad aparente. En relación con la función buffer se determinó que fue la más baja de las zonas junto con la zona de recuperación con bosque de pino, lo cual se debió a los bajos valores de pH y los altos valores de CIC.
- En ambas zonas de recuperación se determinó que la función Bio fue adecuada ya que se encontró solo por debajo de la zona de preservación, lo cual se debió a que en ambas zonas de recuperación la presencia humana es escasa y esto afecta directamente el cálculo de la función. En el almacén de carbono los valores fueron los más bajos de todos en ambas zonas de recuperación, debido al bajo contenido de carbono orgánico. En cuanto a la función buffer la zona en el área de pastizal obtuvo el valor más alto entre todas las zonas debido a que aquí el pH fue ligeramente más alto que en los otros sitios. En cambio, en el sitio ubicado en el área de bosque la función buffer fue menor debido a que el valor de pH fue más bajo lo cual podría incrementar el riesgo de liberación de metales o contaminantes.
- El cálculo de las funciones del suelo por subzona de manejo podría ser considerada una herramienta importante para valorar los servicios del suelo y así obtener compensaciones derivadas del pago por servicios ambientales.
- De acuerdo con el análisis de los climogramas complementarios se detectó como riesgo la demasía de humedad durante los meses de verano, lo cual representa un potencial riesgo de erosión en las zonas sin cobertura vegetal o en donde el cambio de uso de suelo ha afectado de forma considerable la cobertura vegetal propia de la zona.
- Las muestras de suelos analizados presentaron propiedades ándicas como la retención de fosfatos

y densidad aparente, además el índice melánico ayudó a identificar el tipo de compuestos orgánicos formados. Es importante evaluar esta información durante la toma de decisiones para el manejo del suelo y realizar una correcta reforestación, en el caso donde predominan los ácido húmicos tipo P o B es adecuada la reforestación con pinos porque la descomposición de sus hojas produciría este tipo de ácido húmico, a diferencia de la zona de pastizal en donde predominan los ácido húmicos tipo A y la reforestación más adecuada sería con pastos en cuyas raíces se lleva a cabo la transformación del carbono orgánico en estructuras más complejas y estables, una evidencia a considerar es la baja supervivencia de pinos, así como deficiencias en los especímenes que se observan en zonas reforestadas de forma incorrecta.

- El uso de un Índice de Calidad de suelo basado en las propiedades inherentes de los suelos (propiedades ándicas) han sido escasamente utilizados en las evaluaciones de Calidad de suelo, sin embargo, la aplicación de este tipo de índices dentro del Parque resultó ser una herramienta valiosa que permitió disminuir el número de variables a estudiar, por lo tanto, implicaría ahorro en costos y tiempo en evaluaciones posteriores.
- Los entrevistados reconocieron los múltiples beneficios que proporciona el PNIP, basados en la frecuencia de sus respuestas, los servicios de provisión fueron los más destacados. Los participantes mostraron su preocupación por ciertas problemáticas como la pérdida forestal y el abuso en la extracción para consumo personal y para venta. Además, identificaron ciertas amenazas hasta ahora poco tratadas, como son la inseguridad, el problema de basura y la falta de apoyo para la conservación de las áreas. Percibieron el PNIP como un sitio valioso que les proporciona múltiples beneficios; sin embargo, todos coinciden en que ha sido degradado con el paso del tiempo. Por lo que integrar la percepción de la población y sobre todo de quienes se encuentran más vinculados a su manejo y cuidado podría favorecer la aplicación de medidas más concretas destinadas no solo a la conservación del entorno sino también a las mejoras de las condiciones de vida de la población, incluyendo un aumento en su ingreso económico.
- De acuerdo con el índice de la salud del suelo, en su mayoría el estado del suelo fue considerado

saludable. Sin embargo, en cuanto a la salud de los árboles y pastizal los entrevistados manifestaron su preocupación por encontrarlos deficientes. El valor más bajo se observó en la salud animal ya que no se detecta de forma regular la presencia de animales que se apreciaban en el pasado, así mismo la salud de la población también es considerada deficiente debido a la presencia de personas enfermas y de edad avanzada dentro de la población de comuneros.

### 11.1 REFLEXIÓN FINAL

El PNIP es un sitio de enorme importancia para la satisfacción de múltiples necesidades de la población: económicas, sociales, espirituales, educativas, entre otras. Constituye por sí mismo un sitio de gran riqueza biológica y geológica digno de preservación. Sin embargo, ha sufrido fuertemente las demandas de la población y de intereses públicos y privados. Por lo tanto, la evaluación con un enfoque interdisciplinario de los recursos dentro del parque resulta una herramienta importante para afrontar la necesidad de lograr su conservación tanto para las generaciones presentes como futuras.

El presente trabajo ha contribuido a satisfacer una laguna de información que muestra como ha afectado el manejo y ordenamiento del parque a las propiedades del suelo en un ANP. También identifica los sitios más adecuados para la provisión de funciones ambientales del suelo y por último contribuye con el estudio de la percepción, la cual ayudó a identificar aspectos hasta ahora poco tratados como son las percepciones ambientales en un área natural protegida.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Adhikari, K. & Hartemink, A.E. 2016. Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, **262**, 101–111.
- Alcalá-de Jesús, M., Ortiz-Solorio, C.A. & Gutiérrez-Castorena, M. del C. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra Latinoamericana*, **19**, 227–239.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L. & Cambardella, C.A. 2004. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68**, 1945–1962, (At: <https://pubag.nal.usda.gov/pubag/downloadPDF.xhtml?id=9094&content=PDF> ).
- Andrews, S.S., Karlen, D.L. & Mitchell, J.P. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **90**, 25–45.
- Armenise, E., Redmile-Gordon, M.A., Stellacci, A.M., Ciccarese, A. & Rubino, P. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, **130**, 91–98, (At: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198713000573>. Accessed: 28/1/2020).
- Arshad, M.A. & Coen, G.M. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, **7**, 25–31, (At: <https://www.cambridge.org/core/article/characterization-of-soil-quality-physical-and-chemical-criteria/2174882BC78EFEFE3E29059F77F2002C> ).
- Astier, C.M., Maass, M.M. & Etchevers, B.J. 2002. Derivación De Indicadores De Calidad De Suelos En El Contexto De La Agricultura Sustentable Derivation of Soil Quality Indicators in the Context of Sustainable Agriculture. *Agrociencia*, **36**, 605–620, (At: <http://www.redalyc.org/pdf/302/30236511.pdf> ).
- Balvanera, P. & Cotler, H. 2007. Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta Ecológica*, **84–85**, 8–15, (At: [http://produccionbovina.com/regiones\\_ganaderas/27-Ecosist\\_del\\_Delta-2010.pdf](http://produccionbovina.com/regiones_ganaderas/27-Ecosist_del_Delta-2010.pdf) ).
- Bautista Z, F. & Estrada M, H. 1998. Conservación y manejo de los suelos. *Ciencias*, **Abril-Juni**, 50–55.

- Becerra, M.G. 2018. De Parque Nacional a Reserva de la Biosfera Historia biocultural de la Sierra Nevada de México. 208.
- Bezaury-Creel, J.E. 2009. El valor de los bienes y servicios que las áreas naturales protegidas proveen a los mexicanos. *The Nature Conservancy Program México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.*, 36, (At: <https://www.cbd.int/financiamiento/values/Mexico-valueprotectedareas.pdf> ).
- Biswas, S., Hazra, G.C., Purakayastha, T.J., Saha, N., Mitran, T., Singha Roy, S., Basak, N. & Mandal, B. 2017. Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. *Geoderma*, **292**, 34–48.
- Blum, W.E.H. 2005. Functions of soil for society and the environment. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, **4**, 75–79, (At: <http://link.springer.com/10.1007/s11157-005-2236-x> ).
- Botey-Fullat, R. & Moreno-García, J.V. 2015. Metodología para estimar la humedad del suelo mediante un balance hídrico exponencial diario. (Balance hídrico 2). 22.
- Bouma, J. 2014. Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: Linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **177**, 111–120.
- Breure, A.M., De Deyn, G.B., Dominati, E., Eglin, T., Hedlund, K., Van Orshoven, J. & Postuma, L. 2012. Ecosystem services: A useful concept for soil policy making! *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **4**, 578–585, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.010> ).
- BUAP. 2019. Proyecto Integral Morelos 2019: el gasoducto de la discordia. (At: <https://cupreder.buap.mx/territorio/?q=proyecto-integral-morelos-peligro-sismico> ).
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W. & Brussaard, L. 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, **120**, 105–125.
- Burbano Orjuela, H. 2017. La calidad y salud del suelo influyen sobre la naturaleza y la sociedad. *Tendencias*, **18**, 118.
- Burger, J.A. & Kelting, D.L. 1999. Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management*, **122**, 155–166.
- Calixto-Flores, R. & Herrera-Reyes, L. 2010. Estudio sobre las percepciones y la educación

- ambiental. *Tiempo de educar*, **11**, 227–249.
- Calva-Soto, K., Bravo-Cadena, J., Ortega-Meza, D. & Pulido-Silva, M.T. 2019. Perspectivas de conservación desde múltiples actores: el caso de la Zona Ecológica de Preservación Chicamole, México. *BOSQUE*, **40**, 105–115.
- Calzolari, C., Ungaro, F., Filippi, N., Guermandi, M., Malucelli, F., Marchi, N., Staffilani, F. & Tarocco, P. 2016. A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geoderma*, **261**, 190–203.
- Carabias L, J. & Quadri de la T, G. 1995. Áreas Naturales Protegidas: Economía E Instituciones. *Instituto Nacional de Ecología*, 1–50.
- Cárdenas, T., Cüsener-Godt, M.R. & Köck G, M. 2016. *Man and The Biosphere Programme Biannual Activity Report 2014 – 2015*. Baden (Austria).
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. & Pierce, F.J. 1997. Chapter 1 Concepts of soil quality and their significance. In: *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health* (eds. Gregorich, E.G. & Carter, M.R.B.T.-D. in S.S.), pp. 1–19. Elsevier.
- Castillo, A., Magaña, A., Pujadas, A., Martínez, L. & Godínez, C. 2005. Understanding the interaction of rural people with ecosystems: A case study in a tropical dry forest of Mexico. *Ecosystems*, **8**, 630–643.
- Catarina, E.D.S. & Pinheiro, L. 2004. Pinheiro, L., 2004. 325–334.
- CCMSS. 2008. Estudio de las condiciones territoriales y su percepción del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas. 56–62.
- CCMSS. 2016. Nota Informativa 46: Plagas y enfermedades forestales en México: urgen políticas públicas para fomentar la acción de los dueños y habitantes de bosques y selvas. 1–6, (At: <http://www.ccmss.org.mx/documentacion/nota-informativa-46-plagas-y-enfermedades-forestales-en-mexico-urgen-politicas-publicas-para-fomentar-la-accion-de-los-duenos-y-habitantes-de-bosques-y-selvas/> ).
- Cebrián-Piqueras, M.A., Filyushkina, A., Johnson, D.N., Lo, V.B., López-Rodríguez, M.D., March, H., Oteros-Rozas, E., Peppler-Lisbach, C., Quintas-Soriano, C., Raymond, C.M., Ruiz-Mallén, I., van Riper, C.J., Zinngrebe, Y. & Plieninger, T. 2020. Scientific and local ecological knowledge, shaping perceptions towards protected areas and related ecosystem services.

*Landscape Ecology*, 2549–2567.

- CEC. 2006. *Thematic strategy for soil protection*. (At: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Thematic+strategy+for+soil+protection#1> ).
- Christensen, N.L., Bartuska, A.M., Brown, J.H., Carpenter, S., D'Antonio, C., Francis, R., Franklin, J.F., MacMahon, J.A., Noss, R.F., Parsons, D.J., Peterson, C.H., Turner, M.G. & Woodmansee, R.G. 1996. The report of the ecological society of america committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications*, **6**, 665–691.
- Ciarkowska, K. & Gambus, F. 2020. Building a quality index for soils impacted by proximity to an industrial complex using statistical and data-mining methods. *Science of the Total Environment*, **740**, 140161, (At: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140161> ).
- CONAGUA-SMN. 2018. The Weather Stations REPDA Database. (At: <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx> ).
- CONANP-GIZ. 2017. Valoración de Servicios Ecosistémicos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. 1–11, (At: [https://www.ecovalor.mx/sitios\\_documentos\\_interes\\_se.html](https://www.ecovalor.mx/sitios_documentos_interes_se.html) ).
- CONANP. 2010. Pago Por Servicios Ambientales en Áreas Naturales Protegidas Análisis 2003-2008.
- CONANP. 2012. Áreas Naturales Protegidas Federales de México, Agosto 2012. (At: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/anp\\_agosto12gw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/anp_agosto12gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no) ).
- CONANP. 2019. *Resiliencia Áreas Naturales Protegidas Soluciones naturales a retos globales*. México.
- Corral, Y. 2010. Diseño de cuestionarios para recolección de datos. *Revista Ciencias de la Educación*, **20**, 17.
- Cotler, H., Cram, S., Martínez-Trinidad, S. & Quintanar, E. 2013. Forest soil conservation in central Mexico: An interdisciplinary assessment. *Catena*.
- Cotler, H., Martínez, M. & Etchevers, J.D. 2016. Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación políticas públicas. *Terra Latinoamericana*, **34**, 125–138.
- Cram, S., Cotler, H., Morales, L.M., Sommer, I. & Carmona, E. 2008. Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones*

- Geograficas*, **66**, 81–104.
- Cruz-Flores, G. & Etchevers-Barra, J.D. 2011. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia*, **45**, 849–862.
- Cruz-Flores, G., Guerra-Hernández, E.A., Valderrábano-Gómez, J.M. & Campo-Alves, J. 2020. Soil quality indicators in temperate forests of the Volcanoes Biosphere Reserve, Mexico. *Terra Latinoamericana*, **38**, 781–793.
- CSF. 2012. *Valoración de servicios ambientales del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl*. CONANP, México.
- DGE. 1972. *Instructivo para la Determinación del Clima de acuerdo al Segundo Sistema de Thornthwaite*. México.
- Dixon, H.J., Doores, J.W., Joshi, L. & Sinclair, F.L. 2001. Agroecological Knowledge Toolkit for Windows : Methodological Guidelines , Computer Software and Manual for Akt5 2001. 171.
- DOF. 1935. Decreto que declara Parque Nacional, las montañas denominadas Iztaccíhuatl y Popocatepetl. 1–3, (At: <https://www.conanp.gob.mx/sig/decretos/parques/Iztapopo.pdf> ).
- DOF. 1937. Decreto que declara Parque Nacional los terrenos de la hacienda Zoquiapan y Anexas que han estado a cargo del Banco Nacional de Crédito Agrícola. (At: [https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files\\_ipo/2015/1/5/82b317636ecef2c1c27f7d3a0a6902b.pdf](https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2015/1/5/82b317636ecef2c1c27f7d3a0a6902b.pdf) ).
- DOF. 1984. Decreto que modifica los linderos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.
- DOF - Diario Oficial de la Federación. 1992. Acuerdo por el que se declara extinguida la Unidad Industrial de Explotación Forestal, que se estableció a favor de las Fábricas de Papel San Rafael y Anexas, S. A. el 15 de octubre de 1947. *DOF - Diario Oficial de la Federación*, **1**, (At: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5284148&fecha=04/01/2013](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5284148&fecha=04/01/2013) ).
- Dominati, E., Patterson, M. & Mackay, A. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, **69**, 1858–1868, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002> ).
- Doran, J.W. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **88**, 119–127.
- Doran, J.W. & Jones, A.J. 1996. *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America,

- Madison, WI. (At: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub49.frontmatter>. ).
- Doran, J.W. & Parkin, T.B. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 1–21, (At: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>. ).
- Doran, J.W. & Safley, M. 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: *Biological indicators of soil health*. (eds. Pankhurst, C., Doube, B.M. & Gupta, V.V.S.R.), pp. 1–28. CAB International, Wallingford, Oxon, UK.
- Doran, J.W., Sarrantonio, M. & Liebig, M.A. 1996. Soil Health and Sustainability. In: (ed. Sparks, D.L.B.T.-A. in A.), pp. 1–54. Academic Press.
- Dourado-Neto, D., Jong van Lier, Q. de, Metselaar, K., Reichardt, K. & Nielsen, D.R. 2010. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. *Scientia Agricola*, **67**, 87–95.
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A. & Grêt-Regamey, A. 2018. Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, **94**, 151–169.
- Dubroeuq, D., Geissert, D., Barois, I. & Ledru, M.P. 2002. Biological and mineralogical features of Andisols in the Mexican volcanic higlands. *Catena*, **49**, 183–202.
- Engen, S., Fauchald, P. & Hausner, V. 2019. Stakeholders’ perceptions of protected area management following a nationwide community-based conservation reform. *PLoS ONE*, **14**, 1–23.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E. & Reich, P. 1993. Organic carbon in soils of the World. *Soil Science Society of America Journal*, **57**, 192–194.
- FAO. 2002. *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos No. 96.* (At: [http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=OKZt9agfRksC&oi=fnd&pg=PR3&dq=CAPTURA+DE+CARBONO+EN+LOS+SUELOS+PARA+UN+MEJOR+MANEJO+DE+LA+TIERRA&ots=5xOjDqvtWf&sig=c9-6h5Q4W\\_qU0xBHudD4IqchYyc](http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=OKZt9agfRksC&oi=fnd&pg=PR3&dq=CAPTURA+DE+CARBONO+EN+LOS+SUELOS+PARA+UN+MEJOR+MANEJO+DE+LA+TIERRA&ots=5xOjDqvtWf&sig=c9-6h5Q4W_qU0xBHudD4IqchYyc). ).
- FAO. 2009. *Pago por Servicios Ambientales en Áreas Protegidas en América Latina.* (At: <http://www.fao.org/3/a-i0822s.pdf>. ).
- FAO. 2010. *Evaluación de los recursos forestales. Informe principal.* Roma. (At: <http://www.fao.org/3/i1757s/i1757s.pdf>. ).

- FAO. 2012. *El estado de los bosques del mundo 2012*. (At: <http://www.fao.org/docrep/016/i3010s/i3010s00.htm>. ).
- FAO. 2015. Forests and forest soils: an essential contribution to agricultural production and global food security. *2015 International Year of Soils*, (At: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/en/c/285569/>. ).
- FAO. 2017. *Carbono orgánico del suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura., Roma. (At: [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications). ).
- FAO & ITPS. 2015. *Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main Report*. Rome, Italy. (At: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01241064/>. ).
- FAO, ITPS, GSBI, CBD & CE. 2021. *Estado del conocimiento sobre la biodiversidad del suelo-Situación, desafíos y potencialidades. Resumen para los formuladores de políticas*. FAO, Roma.
- Fick, S.E. & Hijmans, R.J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, **37**, 4302–4315, (At: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>. ).
- Fleishman, E., Wolff, G.H., Boggs, C.L., Ehrlich, P.R., Launer, A.E., Niles, J.O. & Ricketts, T.H. 1999. Conservation in practice: Overcoming obstacles to implementation. *Conservation Biology*, **13**, 450–452.
- Friedman, D., Hubbs, M., Tugel, A., Seybold, C. & Sucik, M. 2001. Guidelines for soil quality assessment in conservation planning. *Natural Resources Conservation Service Soil Quality Institute*, 1–38, (At: [http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/sq\\_assessment\\_cp.pdf](http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/sq_assessment_cp.pdf). ).
- Friedrichsen, C.N., Hagen-Zakarison, S., Friesen, M.L., McFarland, C.R., Tao, H. & Wulfhorst, J.D. 2021. Soil health and well-being: Redefining soil health based upon a plurality of values. *Soil Security*, **2**, 100004, (At: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100004>. ).
- Galicia, L., María, A., Cáceres, G., Cram, S., Vergara, B.C., Peña Ramírez, V., Saynes, V. & Siebe, C. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. Stocks and Dynamics of Soil Organic Carbon in Temperate Forests of Mexico. *Terra Latinoamericana*, **34**, 1–29.
- Galindo, C. 2016. Proteger la naturaleza: la evolución de un concepto. *CONABIO*.
- Gallardo, J.F. 2017. *La materia orgánica del suelo: Residuos orgánicos, hummus, compostaje y captura de*

- carbono*. Universidad Autónoma de Chapingo, Texcoco.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz-Gaistardo, C., Encina-Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça-Santos-Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñiz-Ugarte, O., Schad, P., Vara-Rodríguez, M.I. & Vargas, R. 2014. *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea., Luxembourg.
- Gardi, C., Jeffery, S. & Saltelli, A. 2013. An estimate of potential threats levels to soil biodiversity in EU. *Global Change Biology*, **19**, 1538–1548.
- Giacometti, C., Demyan, M.S., Cavani, L., Marzadori, C., Ciavatta, C. & Kandeler, E. 2013. Chemical and microbiological soil quality indicators and their potential to differentiate fertilization regimes in temperate agroecosystems. *Applied Soil Ecology*, **64**, 32–48, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.10.002> ).
- González-Chávez, L. 2020. *Proyecto Integral Morelos: sus impactos sociales y la demanda de justicia hídrica de los ejidatarios del municipio de Ayala, Morelos*. Primera. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Centro de Investigación en Ciencias Sociales y Estudios Regionales, México.
- Govaerts, B., Sayre, K.D. & Deckers, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, **87**, 163–174.
- Granatstein, D. & Bezdicek, D.F. 1992. The need for a soil quality index: Local and regional perspectives. *American Journal of Alternative Agriculture*, **7**, 12–16, (At: <https://www.cambridge.org/core/article/need-for-a-soil-quality-index-local-and-regional-perspectives/671733E6C3AAC734A69AFD473E23E613> ).
- Gras, R. 1989. *Le fait technique en agronomie: activité agricole, concepts et méthodes d'étude*. Institut national de la recherche agronomique. (At: <https://books.google.com.mx/books?id=qQmh41VrVygC> ).
- Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A. & Papritz, A. 2017. Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy*, **69**, 224–237.
- Gruver, J.B. & Weil, R.R. 2007. Farmer perceptions of soil quality and their relationship to management-sensitive soil parameters. *Renewable Agriculture and Food Systems*, **22**, 271–281.

- Guo, L., Sun, Z., Ouyang, Z., Han, D. & Li, F. 2017. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. *Catena*, **152**, 135–143, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.015> ).
- Halpern, B.S., Longo, C., Hardy, D., McLeod, K.L., Samhoury, J.F., Katona, S.K., Kleisner, K., Lester, S.E., Oleary, J., Ranelletti, M., Rosenberg, A.A., Scarborough, C., Selig, E.R., Best, B.D., Brumbaugh, D.R., Chapin, F.S., Crowder, L.B., Daly, K.L., Doney, S.C., Elfes, C., Fogarty, M.J., Gaines, S.D., Jacobsen, K.I., Karrer, L.B., Leslie, H.M., Neeley, E., Pauly, D., Polasky, S., Ris, B., St Martin, K., Stone, G.S., Rashid Sumaila, U. & Zeller, D. 2012. An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, **488**, 615–620, (At: <http://dx.doi.org/10.1038/nature11397> ).
- Harris, R.F. & Bezdicek, D.F. 1994. Descriptive Aspects of Soil Quality/Health. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 23–35, (At: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c2> ).
- Hartemink, A.E. 2006. *El futuro de la Ciencia del Suelo*. IUSS International Union of Soil Science.
- Hati, D.P., Gani, R.A., Mulyani, A. & Husnain. 2021. Differences in Andisols properties as affected by horticulture land use and pine forest in Lembang Sub District, West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **648**.
- Hernández-García, M.A. & Granados-Sánchez, D. 2006. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y El Impacto Ecológico-Social De Su Deterioro. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, **12**, 101–109.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. & Baptista-Lucio, M. del. P. 2014. *Metodología de la Investigación*. Mc Graw Hill, México.
- Hidalgo, M.C., Etchevers, J.D. & Martínez, H. 1986. Determinación de la densidad aparente en suelos de Ando. *Terra*, **4**, 3–9.
- Hillel, D. 2004. *Encyclopedia of soils in the environment* (JL Hatfield, DS Powlson, C Rosensweig, KM Scow, MJ Singer, and DL Sparks, Eds.). 1st ed. Academic Press, New York.
- Hing, S. & Riggs, R. 2021. Re-thinking benefits of community protected areas in Mondulkiri, Cambodia. *Trees, Forests and People*, **6**, 100128, (At: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100128> ).
- Honna, T., Yamamoto, S. & Matsui, K. 1988. A Simple Procedure to Determine Melanic Index that is Useful for Differentiating Melanic from Fulvic Andisols. *Pedologist*, **32**, 69–78.

- Hoyos, N. & Comerford, N.B. 2005. Land use and landscape effects on aggregate stability and total carbon of Andisols from the Colombian Andes. *Geoderma*, **129**, 268–278.
- INEGI. 1992. Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del Suelo y vegetación. Escala 1: 250 000. Serie I. Continuo Nacional. (At: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825007020> ).
- INEGI. 2014. Conjunto de Datos Vectoriales Edafológico escala 1:250 000 Serie II. Continuo nacional. (At: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/eda250s2gw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/eda250s2gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no) ).
- INEGI. 2015. Encuesta Intercensal. Marco Geoestadístico Nacional. México. (At: <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/214/study-description?idPro=> ).
- INEGI. 2017. Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Conjunto Nacional. (At: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459> ).
- IPCC. 2019. *Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del r.* (At: [www.environmentalgraphiti.org](http://www.environmentalgraphiti.org) ).
- Islam, S.M.D.-U., Bhuiyan, M.A.H., Mohinuzzaman, M., Ali, M.H. & Moon, S.R. 2017. A Soil Health Card (SHC) for soil quality monitoring of agricultural lands in south-eastern coastal region of Bangladesh. *Environmental Systems Research*, **6**.
- Islam, K.R. & Weil, R.R. 2000. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **79**, 9–16, (At: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880999001450> ).
- Jenny, H. 1945. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. Dover Publications Inc., New York.
- Juhos, K., Czigány, S., Madarász, B. & Ladányi, M. 2019. Interpretation of soil quality indicators for land suitability assessment – A multivariate approach for Central European arable soils. *Ecological Indicators*, **99**, 261–272, (At: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.063> ).

- Karlen, D.L., Andrews, S.S. & Doran, J.W. 2001. Soil quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, **74**, 1–40.
- Karlen, D.L., Andrews, S.S., Wienhold, B.J. & Zobeck, T.M. 2008. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. *J. Integr. Biosci.*, **6**, 3–14.
- Karlen, D.L., Ditzler, C.A. & Andrews, S.S. 2003. Soil quality: Why and how? *Geoderma*, **114**, 145–156.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. & Schuman, G.E. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, **61**, 4–10.
- Karltun, E., Lemenih, M. & Tolera, M. 2013. Comparing farmers' perception of soil fertility change with soil properties and crop performance in beseku, ethiopia. *Land Degradation and Development*, **24**, 228–235.
- El Kenawy, A., López-Moreno, J., M.Vicente-Serrano, S. & Morsi, F. 2010. Climatological modeling of monthly air temperature and precipitation in Egypt through GIS techniques. *Climate Research*, **42**, 161–176.
- Kibblewhite, M.G., Ritz, K. & Swift, M.J. 2008. Soil health in agricultural systems. *Soil health in agricultural systems.*, **363**, 685–701.
- Kraal, P., Nierop, K.G.J., Kaal, J. & Tietema, A. 2009. Carbon respiration and nitrogen dynamics in Corsican pine litter amended with aluminium and tannins. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**, 2318–2327, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.08.017> ).
- Kunito, T., Isomura, I., Sumi, H., Park, H.D., Toda, H., Otsuka, S., Nagaoka, K., Saeki, K. & Senoo, K. 2016. Aluminum and acidity suppress microbial activity and biomass in acidic forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **97**, 23–30, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.019> ).
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, **304**, 1623–1627.
- Larson, W.E. & Pierce, F.J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*, **2**, 175–203.
- Llaven-Anzures, Y. 2021. Tres multinacionales controlan el agua embotellada en Puebla: Danone, Nestlé y Dr. Pepper. *Jornada de Oriente*, (At:

<https://www.lajornadadeorientemexico.com.mx/puebla/tres-multinacionales-controlan-el-agua-embotellada-en-puebla-danone-nestle-y-dr-pepper/> ).

- López-Lafuente, A. & González-Huecas, C. 2015. El Suelo : un reto para la salud. *Revista Salud Ambiental*, **15**, 76–79.
- Mann, C., Lynch, D.H., Dukeshire, S., Mills, A., Mann, C., Lynch, D.H., Dukeshire, S. & Mills, A. 2021. Farmers ' perspectives on soil health in Maritime Canada Farmers ' perspectives on soil health in Maritime Canada. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, **45**, 673–688, (At: <https://doi.org/10.1080/21683565.2020.1866143> ).
- Maples-Vermeersch, M. 1992. Regímenes de humedad del suelo Escala 1:4000000. *Hidregeografía IV.6.2 Atlas Nacional de México.*, **II**, (At: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rehsu4mgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xml&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rehsu4mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xml&_indent=no) ).
- Martinuzzi, S., Withey, J.C., Pidgeon, A.M., Plantinga, A.J., McKerrow, A.J., Williams, S.G., Helmers, D.P. & Radeloff, V.C. 2015. Future land-use scenarios and the loss of wildlife habitats in the southeastern United States. *Ecological Applications*, **25**, 160–171, (At: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/42640/Mexico\\_009.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/42640/Mexico_009.pdf) ).
- Masera, O.R., Ordóñez, M.J. & Dirzo, R. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: Current situation and long-term scenarios. *Climatic Change*, **35**, 265–295.
- McDaniel, P.A., Lowe, D.J., Arnalds, O. & Ping, C.L. 2012. *Andisols. Handbook of Soil Sciences. Properties and Processes* (PM Huang, Y Li, and ME Summer, Eds.). 2nd ed. CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, Florida.
- MEA. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Menta, C., Conti, F.D., Pinto, S. & Bodini, A. 2018. Soil Biological Quality index (QBS-ar): 15 years of application at global scale. *Ecological Indicators*, **85**, 773–780.
- Merrill, S.D., Liebig, M.A., Tanaka, D.L., Krupinsky, J.M. & Hanson, J.D. 2013. Comparison of soil quality and productivity at two sites differing in profile structure and topsoil properties. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **179**, 53–61, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.07.011> ).
- Meza-Pérez, E. & Geissert-Kientz, D. 2006. Structure Stability in Forested and Cultivated Andisols.

- Terra Latinoamericana*, **24**, 163–170.
- Moebius-Clune, B.N., Moebius-Clune, D.J., Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., Ristow, A.J., van Es, H.M., Thies, J.E., Shayler, H.A., McBride, M.B., Wolfe, D.W. & Abawi, G.S. 2016. *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual, Edition 3.2*.
- Mukherjee, A. & Lal, R. 2014. Comparison of soil quality index using three methods. *PLoS ONE*, **9**.
- Muñoz-Rojas, M. 2018. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, **5**, 47–52.
- Muscolo, A., Panuccio, M.R., Mallamaci, C. & Sidari, M. 2014. Biological indicators to assess short-term soil quality changes in forest ecosystems. *Ecological Indicators*, **45**, 416–423, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.047> ).
- NRCS. 2011. Soil Quality for Environmental and Health. Filtering and Buffering. (At: [http://soilquality.org/functions/filter\\_buffer.html](http://soilquality.org/functions/filter_buffer.html) ).
- Okumah, M., Yeboah, A.S. & Amponsah, O. 2020. Stakeholders' willingness and motivations to support sustainable water resources management: Insights from a Ghanaian study. *Conservation Science and Practice*, **2**, 1–14.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. & Sombroek, W.G. 1991. *World map of the status of human-induced soil degradation: An Explanatory Note, UNEP and ISRIC*. Wageningen.
- Olivé, L. 2012. La Cultura Científica Y Tecnológica En El Tránsito a La Sociedad Del Conocimiento. *Revista de la Educación Superior*, **XXXIV**, 49–63, (At: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-27602005000400049&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-27602005000400049&lng=es&nrm=iso) ).
- Page-Dumroese, D., Jurgensen, M., Neary, D., Curran, M. & Rocky, C.T. 2010. Soil quality is fundamental to ensuring healthy forests. *General Technical Report - Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service*, 27–36.
- Palacio-Prieto, J.L., Sánchez-Salazar, M.T., Casado-Izquiero, J.M., Propin-Frejomil, E., Delgado-Campos, J., Velázquez-Montes, A., Chias-Becerril, L., Ortiz-Álvarez, M.I., González-Sánchez, J., Negrete-Fernández, G., Gabriel-Morales, J. & Márquez-Huitzil, R. 2004. *Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio*. Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaria de desarrollo social, Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, Instituto de

Ecología., Méx.

- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. & Hayes, D. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, **333**, 988–993.
- Parr, J.F., Papendick, R.I., Hornick, S.B. & Meyer, R.E. 1992. Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, **7**, 5–11, (At: <https://www.cambridge.org/core/article/soil-quality-attributes-and-relationship-to-alternative-and-sustainable-agriculture/FEB16F9D7CE013FB32EDEF98EEE5D20B> ).
- de Paul Obade, V. & Lal, R. 2016. A standardized soil quality index for diverse field conditions. *Science of the Total Environment*, **541**, 424–434, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.096> ).
- Pereira, P., Bogunovic, I., Munoz-Rojas, M. & Brevik, E.C. 2018. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, **5**, 7–13.
- Pidgeon, N. 1998. Risk assessment, risk values and the social science programme: Why we do need risk perception research. *Reliability Engineering and System Safety*, **59**, 5–15.
- Pinheiro, L. 2004. Da ictiologia ao etnoconhecimento: saberes populares, percepção ambiental e senso de conservação em comunidade ribeirinha do rio Piraí, Joinville, Estado de Santa Catarina. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, **26**, 325–334.
- Porta, J., López, M. & Roquero, C. 1994. EDAFOLOGÍA Para la agricultura y el medio. *Ambiente, EDAFOLOGÍA Para la agricultura y el medio*, 591–626, (At: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/14463> ).
- Prieto, J., Prieto, F., Acevedo, O. & Méndez, M.A.M. 2012. Indicators and Quality Indices of Soil (QIS) Producer's Barley in the Southern State of Hidalgo, Mexico. *International Journal of Applied Science and Technology*, **2**, 1–9.
- Pulido, M., Schnabel, S., Contador, J.F.L., Lozano-Parra, J. & Gómez-Gutiérrez, Á. 2017. Selecting indicators for assessing soil quality and degradation in rangelands of Extremadura (SW Spain). *Ecological Indicators*, **74**, 49–61, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.016> ).

- Raiesi, F. 2017. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators*, **75**, 307–320, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049> ).
- Ramírez-Silva, J.P. & Abundis, Y. 2015. Percepción del uso de los recursos naturales por habitantes de un área natural protegida: el caso de Altavista, Sierra de Vallejo, Nayarit. In: *Temas selectos de turismo y sustentabilidad* (eds. Barrón Arreola, K.S. & Fonseca Morales, M.A.), pp. 101–132. Primera. Universidad Autónoma de Nayarit.
- Ramos Ribeiro, R.R., Olcina Cantos, J. & Molina Palacios, S. 2014. Análisis de la percepción de los riesgos naturales en la Universidad de Alicante. *Investigaciones Geográficas*, 147–157.
- Rangel-Peraza, J.G., Padilla-Gasca, E., López-Corrales, R., Medina, J.R., Bustos-Terrones, Y., Amabilis-Sosa, L.E., Rodríguez-Mata, A.E. & Osuna-Enciso, T. 2017. Robust Soil Quality Index for Tropical Soils Influenced by Agricultural Activities. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, **06**, 199–221.
- Revilla, J.C. 2016. Narrar con imágenes: entrevistas fotográficas en un estudio comparado de “resiliencia” social y resistencia ante la crisis. 71–104.
- Riemann, H., Santes-Álvarez, R. V. & Pombo, A. 2011. The role of natural protected areas in local development: The case of the peninsula of Baja California. *Gestión y Política Pública*, **20**, 141–172.
- Rinot, O., Levy, G.J., Steinberger, Y., Svoray, T. & Eshel, G. 2019. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Science of the Total Environment*, **648**, 1484–1491, (At: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259> ).
- Ritter, E. 2007. Carbon, nitrogen and phosphorus in volcanic soils following afforestation with native birch (*Betula pubescens*) and introduced larch (*Larix sibirica*) in Iceland. *Plant and Soil*, **295**, 239–251, (At: <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9279-4> ).
- Roming, D.E., Garlynd, J., Harris, R.F. & McSweeney, K. 1995. How farmers assess soil health and quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, **50**, 229–236.
- SAGARPA. 2012. Subíndice de Uso Sustentable del Suelo – Metodología de Cálculo. 1–66.
- Sarantonio, M., Doran, J.W., Liebig, M.A. & Halvorson, J.J. 1996. On-farm assessment of soil quality

- and health. In: *Methods for assessing soil quality*. SSSA Spec. Publi. 49. (eds. Doran, J.W. & Jones, A.J.), pp. 83-106. Soil Science Society of America, Inc, Madison, Wisconsin, USA.
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J. & Halffter, G. 2017. *Capital natural de México. Síntesis: evaluación del conocimiento y tendencias de cambio, perspectivas de sustentabilidad, capacidades humanas e institucionales*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Schoenholtz, S.H., Miegroet, H.V. & Burger, J.A. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, **138**, 335–356.
- SEDESOL-CONEVAL. 2010. Informe Anual Sobre La Situación Pobreza y Rezago Social. (At: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/42640/Mexico\\_009.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/42640/Mexico_009.pdf) ).
- SEMARNAT-CONANP. 2013. Programa de manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. 185.
- SEMARNAT-CONANP. 2016. Prontuario Estadístico y Geográfico de las Áreas Naturales Protegidas de México.
- SEMARNAT. 2002. NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario oficial de la Federación*, 85.
- SEMARNAT. 2006. *La gestión ambiental en México*.
- SEMARNAT. 2021. Presupuesto asignado a la SEMARNAT por unidad administrativa (Pesos). 2020, (At: [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D4\\_GASTOS01\\_03&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce&NOMBREANIO=\\*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D4_GASTOS01_03&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*) ).
- SEMARNAT & COLPOS. 2003. *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la república mexicana Escala 1:250 000 Memoria Nacional 2001-2002*.
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L. & Rogers, H.H. 2018. Quantification of soil quality. *Soil Processes and the Carbon Cycle*, 387–404.
- Shoji, S. 1988. Separation of melanic and fulvic andisols. *Soil Science and Plant Nutrition*, **34**, 303–306.

- Shoji, S., Kurebayashi, T. & Yamada, I. 1990. Growth and chemical composition of Japanese pampas grass (*Miscanthus sinensis*) with special reference to the formation of dark-colored andisols in northeastern Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, **36**, 105–120.
- Shoji, S., Takahashi, T., Ito, T. & Ping, C.L. 1988. Properties and classification of selected volcanic ash soils from Kenai Peninsula, Alaska. *Soil Science*, **145**, 395–413.
- Silvano, R.A.M. & Begossi, A. 2005. Local knowledge on a cosmopolitan fish: Ethnoecology of *Pomatomus saltatrix* (Pomatomidae) in Brazil and Australia. *Fisheries Research*, **71**, 43–59.
- Sims, J.T., Cunningham, S.D. & Sumner, M.E. 1997. Assessing Soil Quality for Environmental Purposes: Roles and Challenges for Soil Scientists. *Journal of Environmental Quality*, **26**, 20–25.
- Soil Survey Staff - NRCS/USDA. 2014. Keys to Soil Taxonomy. *Soil Conservation Service*, **12**, 360, (At: [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_051546.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf) ).
- Staff, S.S. 1999. *Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. USDA-NRCS.
- Steffan, J.J., Brevik, E.C., Burgess, L.C. & Cerdà, A. 2018. The effect of soil on human health: an overview. *European Journal of Soil Science*, **69**, 159–171.
- Takahashi, T. & Dahlgren, R.A. 2016. Nature, properties and function of aluminum-humus complexes in volcanic soils. *Geoderma*, **263**, 110–121, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.032> ).
- Tiedemann, A.R., O. Klemmedson, J. & Bull, E.L. 2000. Solution of forest health problems with prescribed fire: Are forest productivity and wildlife at risk? *Forest Ecology and Management*, **127**, 1–18.
- Tóth, G., Stolbovoy, V. & Montanarella, L. 2007. *Soil quality and sustainability Evaluation- An integrated approach to support soil-related policies of the European Union*. EUR 22721. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. (At: <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=4gv5HEOrX8YC&oi=fnd&pg=PA17&dq=biodiversity+soil+anthropogenic&ots=8iYVaJ1UY0&sig=RYau2eYlIFzCRpq5cuSueqcwL3s%5Cnhttp://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=4gv5HEOrX8YC&oi=fnd&pg=PA17&dq=biodiversity+soil+anthropo> ).
- Uehara, G. & Gillman, G.P. 1981. *The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable*

- charge clays*. Publising, Avalon.
- UNESCO. 1996. Reservas de biosfera. La Estrategia de Sevilla y el Marco Estatutario de la Red Mundial.
- UNESCO. 2010. Los Volcanes, México. (At: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/latin-america-and-the-caribbean/mexico/los-volcanes> ).
- Ungar, P. & Strand, R. 2005. Complejidad: Una reflexión desde la ciencia de la conservación. *Nómadas*, 36–46.
- USDA, Service, A.R., NRCS & Institute, S.Q. 1999. *Soil QUality Test Kit Guide*. USDA.
- Valera, M.A. 1993. *Fisicoquímica y mineralogía de Andosoles de la región de Teziutlán, Puebla*. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de México.
- Vallejo, V., Afanador, L., Coca, D., Vargas, A., Bautista, M. & Mendoza, A. 2020. Evaluación de la calidad de suelos en agroecosistemas de Colombia a través de la selección de un conjunto mínimo de datos. *Colombia forestal*, **23**, 35–50.
- Vicente-Serrano, S.M., Saz-Sánchez, M.A. & Cuadrat, J.M. 2003. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): Application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, **24**, 161–180.
- Wada, K. 1985. The Distinctive Properties of Andosols - Advances in Soil Science. In: (ed. Stewart, B.A.), pp. 173–229. Springer New York, New York, NY.
- Wall, D.H. 2012. *Soil Ecology and Ecosystem Services*. Oxford University Press, New York.
- Wang, X. & Gong, Z. 1998. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma*, **81**, 339–355.
- Werner, G., Aeppli, H., Miehlich, G. & Schönhals, E. 1978. Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores. Comentarios a un mapa de suelos: Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica, Comunicaciones. *Comunicaciones*, 95.
- Wu, J., Feng, Z., Gao, Y. & Peng, J. 2013. Hotspot and relationship identification in multiple landscape services: A case study on an area with intensive human activities. *Ecological Indicators*, **29**, 529–537, (At: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.037> ).
- Yu, P., Han, D., Liu, S., Wen, X., Huang, Y. & Jia, H. 2018a. Soil quality assessment under different

land uses in an alpine grassland. *Catena*, **171**, 280–287, (At: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.021>. ).

Yu, P., Liu, S., Zhang, L., Li, Q. & Zhou, D. 2018b. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of the Total Environment*, **616–617**, 564–571, (At: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.301>. ).

Zornoza, R., Acosta, J.A., Bastida, F., Domínguez, S.G., Toledo, D.M. & Faz, A. 2015. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. *SOIL*, **1**, 173–185, (At: <https://soil.copernicus.org/articles/1/173/2015/>. ).

## 13. ANEXOS

### 13.1 CUESTIONARIO SOBRE PERCEPCIÓN AMBIENTAL DENTRO DEL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL

---

Preguntas	
1. Información básica	1.1 Edad
	1.2 Ocupación
	1.3 Lugar de residencia
	1.4 Tiempo de vivir en la zona
	1.5 Sexo
	1.6 ¿Conoce el PNIP?
2. Conocimiento del PNIP	2.1 ¿Identifica los límites del PNIP?
	2.2. ¿Cuál es el tipo de protección del PNIP?
	2.3 ¿Qué tipo de vegetación conoce dentro del PNIP?
	2.4 ¿Qué animales o insectos conoce en el PNIP?
	2.5 ¿Conoce las leyes o normas que protegen al PNIP?
3. Beneficios que perciben de PNIP	3.1 ¿Qué representa o es para usted el PNIP?
	3.2 ¿Qué beneficios económicos y no económicos le brinda el PNIP?
	3.3 ¿Cuál es el papel del suelo dentro del PNIP?

---

- 
- |   |  |
|---|--|
| 4. Problemáticas que identifican en el PNIP   | 4.1 ¿Qué actividades humanas afectan de forma negativa el PNIP?  |
|   | 4.2 ¿Qué cambios negativos percibe en el PNIP y que afecten o perjudiquen de alguna manera las condiciones del mismo?                  |
|   | 4.3 ¿Ha mejorado o empeorado el estado del PNIP en el tiempo? ¿A qué se debe según usted?  |
|   | 4.4. ¿Qué evento o situaciones lo afectan a usted?   |
| 5. Soluciones o necesidades para mejorar las condiciones de PNIP, así como su calidad de vida | 5.1 ¿Cuáles son sus principales preocupaciones sobre el PNIP?  |
|   | 5.2 ¿Qué acciones sugiere debe realizar la administración para conservar la zona?  |
|   | 5.3 ¿Qué necesita usted le proporcione la administración del parque para llevar a cabo sus actividades y además se conserve el parque? |
-

## 13.2 CUESTIONARIO SOBRE SALUD DEL SUELO

---

---

SUELO	
Lombrices e insectos del suelo	0 Poca actividad de lombrices 2 Algunos agujeros de lombrices 4 Numerosos agujeros de lombrices
Erosión	0 Erosión severa, se movió una considerable cantidad de tierra vegetal, se formaron grietas 2 Erosión moderada, signos de láminas o surcos, se ha perdido algo de la parte superior del suelo 4 Poca erosión evidente, la parte superior del suelo resiste el agua y la lluvia
Estructura del suelo	0 El suelo está cubierto por pedazos grandes o es polvoso 2 El suelo es grumoso y no se mantiene unido 4 El suelo se desmorona, es granuloso
Color	0 Suelo color ocre, ligeramente amarillo, naranja o gris claro 2 Suelo color café, gris o rojizo 4 Suelo color negro, café oscuro o gris oscuro
Compactación	0 El suelo está duro y compactado, no se puede a través, capa dura y gruesa 2 El suelo se apelmaza en una capa dura delgada 4 El suelo está duro, no se apelmaza, no forma una capa dura
Infiltración	

---

---

	0	El agua no moja el suelo, se desliza sobre el suelo
	2	El agua se filtra lentamente, algunos escurrimientos o charcos después de una fuerte Lluvia
	4	El agua se filtra bien, suelo esponjoso sin encharcamientos
Drenaje	0	Drenaje pobre, el suelo está encharcado o saturado
	2	El suelo se drena lentamente
	4	El suelo se drena a buena velocidad
Retención de agua	0	El suelo se seca muy rápido
	2	El suelo es propenso a la sequía durante la temporada seca
	4	El suelo retiene bien la humedad
Descomposición	0	Los residuos del suelo no se descomponen fácilmente
	2	Lenta putrefacción de los residuos y los abonos
	4	Rápida putrefacción de residuos y abonos
Tacto	0	El suelo se siente grasoso, pegajoso
	2	El suelo es suave o granulado, se comprime cuando se aprieta
	4	El suelo es suelto, esponjoso, se abre después de ser apretado
Corteza de la superficie	0	La superficie es dura, se rompe cuando se seca o se compacta
	2	La superficie es suave con algunos orificios, corteza dura
	4	La superficie no tiene corteza, tiene poros, se excava fácilmente con la mano
Cubierta de la superficie		

---

---

	0	La superficie es limpia, desnuda
	2	La superficie tiene algunos residuos, la mayoría enterrados
	4	La superficie tiene muchos residuos, mucho mantillo
Dureza	0	El suelo es duro, denso o sólido, no se rompe entre los dedos
	2	El suelo es firme, se rompe entre los dedos a presión moderada
	4	El suelo es suave, se desmorona fácilmente a presión ligera
Olor	0	El suelo tiene un aroma agrio, putrefacto o a sustancias químicas
	2	El suelo no tiene olor
	4	El suelo huele dulce, fresco o terroso
Textura del suelo	0	Arenoso, rocoso
	2	Muy pesado o muy ligero
	4	Limoso (jabonoso)
Aireación	0	El suelo está muy compacto, cerrado, casi sin poros
	2	Suelo denso, tiene pocos poros
	4	Suelo abierto, poroso, respira
Profundidad del suelo	0	El subsuelo está expuesto o cerca de la superficie
	2	El suelo es superficial
	4	El suelo es profundo
Apariencia de árboles		PLANTAS

---

---

	0	Los árboles no crecen, no tienen color
	2	Los árboles tienen color verde, son pequeños
	4	Los árboles son color verde fuerte, altos y hay densidad poblacional
Deficiencia de nutrientes	0	Los árboles presentan severos signos de deficiencia
	2	Los árboles se ven descoloridos
	4	Los árboles no tienen signos de deficiencia
Resistencia a la sequía	0	Los árboles se secan rápido, no se recuperan
	2	Los árboles sufren en la época seca, se recuperan lentamente
	4	Los árboles soportan el clima seco, se recuperan fácilmente
Resistencia a las plagas y enfermedades	0	
	2	Los árboles se dañan severamente por enfermedades e insectos
	4	Los árboles se estresan por enfermedades e insectos Los árboles toleran plagas y enfermedades
		ANIMALES
Salud humana	0	La salud es pobre, problemas de salud recurrentes, recuperaciones largas y con dificultad
	2	Ocasionalmente hay problemas de salud, recuperación lenta
	4	La salud humana es excelente, resiste enfermedades, larga vida, recuperación rápida
Salud animal		

---

---

	0	No hay presencia de animales, los animales están enfermos
	2	Ocasionalmente se observan animales sanos
	4	Se observan animales sanos
Vida silvestre	0	Raros signos de vida animal, los animales no parecen sanos
	2	Poca frecuencia de vida silvestre, cantos de aves, conejos, serpientes, etc.
	4	La vida salvaje es abundante, se observan aves, se escuchan cantos de aves, excrementos de animales, son comunes
		AGUA
Agua superficial	0	Agua superficial es muy fangoso y lodoso
	2	Agua superficial es marrón con suciedad y limo
	4	Agua superficial clara y limpia

---