



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



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

**“Estimación del carbono almacenado en los suelos del parque nacional la Malinche
a partir de teledetección”**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

DANIEL FERNANDO MENA CUERO

Director de tesis:
Dr. Miguel Ángel Valera Pérez



Marzo 2021



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



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

**“Estimación del carbono almacenado en los suelos del parque nacional la Malinche
a partir de teledetección”**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

DANIEL FERNANDO MENA CUERO

Comité tutorial:

Director	Dr. Miguel Ángel Valera Pérez
Co Directora	Dra. Gladys Linares Fleites
Integrante Comité Tutorial	Dra. Elsa Iracena Castañeda Roldán
Integrante Comité Tutorial	Dr. Alejandro Augusto Isaías Augusto Alonso

Marzo 2021

Contenido

Tabla de Figuras.....	4
Índice de tablas	5
Capítulo I. Introducción.....	7
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Delimitaciones espacial, temporal y semántica	11
1.3 Preguntas de Investigación.....	13
1.4 Justificación del Problema	13
1.5 Objetivos	14
1.5.1 Objetivo general.....	14
1.5.2 Objetivos específicos	14
1.6 Hipótesis	15
Capítulo II. Marco teórico.....	16
2.1. Recurso Natural	16
2.2. Uso de la Teledetección en la evaluación de Recursos Naturales.....	18
2.2.1 Teledetección y Suelo	18
2.3 Suelos.....	21
2.3.1 Conceptos Generales.....	21
2.3.2 Nuevos enfoques sobre la ciencia del suelo.....	22
2.3.3. Suelos forestales.....	23
2.3.4 Andosoles.....	25
2.4 Secuestro de carbono	26
2.4.1 Ciclo del carbono	26
2.4.2 Secuestro de Carbono en Suelos	28
Capítulo III. Antecedentes	31
3.1 Técnicas geomáticas de análisis de suelos	31
3.2 Estudios de suelos realizados en el Parque Nacional La Malinche.....	32

3.3 Andosoles como almacenes de carbono.....	36
Capítulo IV. Descripción de la zona de estudio.....	38
4.1 Localización.....	38
4.2 Geología.....	39
4.3 Edafología.....	39
4.4 Hidrología.....	39
4.5 Clima.....	40
4.6 Biodiversidad.....	41
4.7 Aspectos socio económicos.....	41
Capítulo V. Materiales y métodos.....	43
5.1 Tipo de Investigación.....	43
5.2. Diseño de planes de muestreo.....	44
5.3 Materiales.....	46
5.4 Técnicas.....	46
Capítulo VI. Resultados y discusión.....	48
6. 1 Procesamiento de imágenes satelitales.....	48
6. 2 Técnicas estadísticas de análisis multivariado.....	48
6.3 Regresión lineal.....	54
6.4 Comparación de regresiones lineales.....	60
6.5 Modelo Geomático.....	61
6.6. Validación.....	63
Capítulo VII. Conclusiones.....	64
LITERATURA CITADA.....	67

Tabla de Figuras

<i>Figura 1. Componentes de un sistema de percepción remota.....</i>	20
<i>Figura 2. Distribución de los suelos en México.....</i>	22
<i>Figura 3. Diagrama simplificado de los flujos de carbono en ecosistema forestal..</i>	24
<i>Figura 4. Flujos de materia orgánica y gases con efecto invernadero en el planeta Tierra.....</i>	28
<i>Figura 5. Ubicación geográfica de la zona de estudio..</i>	38
<i>Figura 6. Suelos predominantes en el Parque Nacional La Malinche, Estado de Puebla.....</i>	40
<i>Ilustración 7. Grid de puntos de muestreo definitivos..</i>	45
<i>Figura 8. Gráfico de sedimentación para las componentes principales de matriz de pixeles del año 2004</i>	51
<i>Figura 9. Variación del porcentaje de carbono orgánico en función de la primera componente principal.....</i>	55
<i>Figura 10. Variación del porcentaje de carbono orgánico en función de la primera y segunda componentes principales.....</i>	56
<i>Figura 11. Variación del porcentaje de carbono orgánico en función del primer factor.....</i>	58
<i>Figura 12. Variación del porcentaje de carbono orgánico en función de los factores 1 y 2.....</i>	59
<i>Figura 13. Calibración del modelo del porcentaje del carbono orgánico almacenado por los suelos del Parque Nacional La Malinche hasta el 2004 en relación con la primera componente principal.....</i>	63

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de pixeles para los para los suelos del Parque Nacional La Malinche en el año 2004. ...	49
Tabla 2. Carga de las componentes principales 1 y 2 para las imágenes satelitales del Parque Nacional La Malinche, Puebla, para el año 2004.....	50
Tabla 3. Importancia de componentes en el ACP para las imágenes satelitales para el Parque Nacional La Malinche, Puebla, para el año 2004.....	50
Tabla 4. Aporte de los pesos en el análisis factorial exploratorio para un solo factor.....	53
Tabla 5. Aporte de los pesos en el análisis factorial exploratorio para dos factores.	54
Tabla 6. Regresión lineal simple para matriz de pixeles de imágenes satelitales obtenidas en 2004.....	56
Tabla 7. Regresión lineal múltiple entre el porcentaje de carbono orgánico y las componentes principales 1 y 2.....	57
Tabla 8. Regresión lineal simple entre el porcentaje de carbono orgánico y el primer factor 1.....	58
Tabla 9. Regresión lineal simple entre el porcentaje de carbono orgánico y los factores 1 y 2.....	59
Tabla 10. Resumen de características de las regresiones lineales con ACP y AFE.	60
Tabla 11. Clasificación de los contenidos de materia orgánica de los suelos derivados de cenizas volcánicas (Fassbender & Bornemisza, 1994).	62

Agradecimientos

Ante todo mis más humildes reverencias a la Divina Providencia por su constante y permanente apoyo, especialmente, en los momentos de mayor dificultad.

A este maravilloso lugar del mundo llamado México que abrió sus puertas para tratarme como un hijo propio, permitirme conocer la bastedad de su cultura, la calidez de sus nacionales, la amplitud de sus tradiciones y sus colores múltiples y variados.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por haber financiado esta investigación para la obtención del grado de maestría y finalizar apropiadamente este proceso de formación.

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado, VIEP, por siempre abrirse a los estudiantes y poner a disposición de los mismos las herramientas necesarias para avanzar en pro de la investigación, por ese inestimable apoyo durante la etapa final de esta investigación.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, BUAP, por permitirme el acceso a sus instalaciones y gozar de una vida universitaria de primer nivel.

A toda la comunidad que integra el posgrado en Ciencias Ambientales por darle a la ciudad, al país y al mundo la oportunidad de integrar los saberes ancestrales, la academia y la vocación personal, por permitir comprender el mundo desde una visión integradora y no separatista y, especialmente, inculcar en cada uno de sus integrantes que somos parte de este maravillosos ser (sistema) a quien llamamos Tierra.

A mi asesor, el Dr. Miguel Ángel Valera Pérez, por su claridad, conocimiento, precisión, apoyo, porque siempre tenía las palabras adecuadas para darse a entender, pero, por encima de cualquier cosa, por su calidez humana. ¡Dr. usted es el mejor!

A la Dra. Gladys Linares Fleites por impulsarme a ir más allá, por su ánimo constante, por compartir esa energía, esa pasión a los números y por generar ese gusto por la estadística que antes no sentía. ¡Muchas gracias Dra.!

Infinitas gracias a mi familia, particularmente, a mi mamá, Luz Carime Cuero Rodríguez, porque siempre estuvo, nunca me dejó caer, aun en los momentos más difíciles siempre tenía una palabra de aliento. Si tal vez hoy preste un servicio al mundo se debe, en gran medida, a que siempre tuve ese amoroso apoyo sin ninguna reserva o juicio. ¡Te estaré eternamente agradecido gorda!

Para finalizar, un agradecimiento muy especial al Dr. Edgardo Torres Trejo quien con sus pláticas llena de amor y entusiasmo despertó en mi ser el amor hacia el conocimiento del clima, los sistemas de información geográfica y la teledetección, al igual que el Dr. Fernando Hernández Aldana por su inestimable amabilidad, esa siempre confiable disposición a apoyar el crecimiento y ser mejor cada día.

Que la Divinidad los tenga en su gloria.

A todos mi más sincero agradecimiento.

Capítulo I

Introducción

El secuestro de carbono se define como el proceso por el cual el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera se incorpora en formas almacenadas fundamentalmente en el suelo y la biomasa, quedando temporalmente inmovilizado respecto a la circulación biogeoquímica durante largos periodos de tiempo (Valera *et al*, 2015). Este proceso se ha convertido en una estrategia para mitigar los efectos del calentamiento global al reducir la concentración de CO₂ como principal componente de los gases de efecto invernadero (GEI) (Valera, Llaguno, Linares y Torres, 2009), así mismo, detiene la degradación de los suelos agrícolas, protege el suelo, mejora la disposición de amortiguación del suelo e incrementa su materia orgánica (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2002).

Los ecosistemas terrestres juegan un rol importante en el ciclo global del carbono siendo tanto depósitos de carbono, siendo estimado corrientemente cercano a 2200Gt-C (600gt-C contenidas en la biomasa y 1600Gt-C contenidas en el suelo), como fuentes y sumideros para flujos de CO₂ estrechamente balanceados del orden de 120Gt-C por año tomado de la atmósfera a partir de la fotosíntesis y emitidos a través de la respiración vegetal y microbiana. Los efectos combinados de estos flujos resultan en un consumo neto de carbono hacia los ecosistemas terrestres desde la atmósfera corrientemente estimado en 2.8Gt-C por año (Rackley, 2010).

En los ecosistemas forestales los principales almacenes de carbono son el suelo, la vegetación y el mantillo (Benjamín y Masera, 2001). El papel del suelo es determinante debido a que almacena más cantidad de carbono que la atmósfera y la vegetación que soporta (Jandl, 2005). Es fundamental para este propósito llevar a cabo buenas prácticas de manejo forestal que tienen incidencia directa en la cantidad y calidad de materia orgánica en el suelo, al igual que con los ritmos de degradación y los procesos de estabilización del carbono orgánico edáfico (Pérez, Ramírez, Jaramillo-López y Bautista, 2013).

Los bosques cubren el 29% de las tierras y contienen el 60% del carbono de la vegetación terrestre (Organización para las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación [FAO], 2002). El carbono almacenado en los suelos forestales representa el 36% del total del carbono del suelo a un metro de profundidad. Los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie

que cualquier otro uso de la tierra y sus suelos (que contienen cerca del 40% del total del carbono). Son de importancia primaria cuando se considera el manejo de bosques. (Zambrano, Franquis & Infante, 2004)

Los suelos forestales como grandes captosres y depósitos de carbono representan un gran instrumento para enfrentar los desafíos asociados a la disminución de los GEI planteados desde el protocolo de Kioto, que, asociados con el manejo sustentable adecuado de los suelos forestales pueden beneficiar social, económica y ambientalmente a las comunidades asociadas a ellos (FAO, 2002).

La teledetección, enfocada al estudio de recursos naturales, se fundamenta en el registro, observación, análisis e interpretación de datos como resultado de la interacción con la energía electromagnética sin tener contacto directo con el objeto de estudio (Weng, 2010). En la actualidad las imágenes satelitales se usan ampliamente en distintos campos del conocimiento después que las imágenes colectadas sean convertidas a información relevante, así mismo, son de fácil acceso para todas las personas quienes las usan, entre otros, por los servicios de mapeo (Chuvienco, 2016).

Gracias a estas aptitudes, la Teledetección se convierte en una herramienta de información espacial de gran interés para la producción y actualización cartográfica, como fuente de entrada en Sistemas de información geográfica de carácter multipropósito, para los estudios ambientales y para las ciencias de la Tierra en general. (Martínez y Martín, 2010)

El texto está distribuido en 6 capítulos, que comprenden desde la introducción hasta las conclusiones. La introducción presenta de manera sucinta la temática relacionada con el secuestro de carbono, los suelos forestales, su importancia y la teledetección. El capítulo 2 presenta el marco teórico. Esta sección trata los conceptos, definiciones y teorías de las que se sirve la investigación para su desarrollo. Destacan los conceptos de recurso natural, suelo, suelo forestal, suelo volcánico, secuestro de carbono y teledetección, entre otros. El capítulo 3 trata los principales métodos de trabajo en teledetección usados para la investigación de recursos naturales, específicamente, del recurso suelo, así mismo, se presentan algunas investigaciones relevantes desarrolladas en el Parque Nacional La Malinche (PNM) e investigaciones en suelos volcánicos.

En el capítulo 4 se disponen las características del PNM, Puebla, que constituye la zona de estudio. Se hace especial énfasis en su ubicación geográfica, clima, suelos, actividades económicas y

culturales. El capítulo 5 da conocimiento de los recursos y las técnicas empleadas para llevar a cabo la investigación. El capítulo 6 presenta los resultados derivados de la investigación: matriz de pixeles, análisis de componentes principales (ACP), análisis factorial exploratorio (AFE), regresión lineal y planteamiento del modelo.

1.1 Planteamiento del problema

El cambio climático es uno de los problemas, sino, el problema más importante que enfrenta la humanidad como conjunto en el presente siglo, además, se encuentra asociado al aumento de la temperatura media del planeta por el incremento de los GEI, especialmente, CO₂, metano (CH₄), y los compuestos nitrogenados (N_xO_y) que resultan del impacto de las actividades humanas sobre los ecosistemas (Pittock, 2009). El cambio climático representa un problema que demanda la atención de todos los sectores sociales, en sí mismo, representa un desafío importante gracias a su nivel de complejidad tanto a escala de acción como de integración en los aspectos socioeconómicos, políticos, institucionales y gubernamentales, entre otros (Quintana, 2016).

Los GEI hacen referencia a los componentes gaseosos de la atmósfera que al aumentar su concentración dificultan la salida de la radiación infrarroja reemitida desde la superficie de la tierra por causa de su elevado nivel de absorción y reemisión generando como consecuencia un incremento en la temperatura media atmosférica, al igual que, cambios en los patrones climáticos locales, regionales de precipitación (Burroughs, 2007). El GEI más importante circulando la atmósfera es el CO₂, es un componente natural de la atmósfera biológicamente muy reactivo que puede ser reducido a biomasa de carbono a través de la captación por medio de la fotosíntesis y la oxidación biológica, su concentración ha aumentado de 280ppm a 416.21ppm en los últimos 250 años (Hardy, 2003).

América Latina y el Caribe, como el resto del mundo, deben atender durante el siglo XXI el desafío del cambio climático y, al mismo tiempo, mantener, un alto ritmo de crecimiento económico acompañado de una mejora de las condiciones sociales y de un respeto al medio ambiente. Ello implica transformaciones importantes al estilo actual de desarrollo y la aplicación de un conjunto de políticas públicas consistentes con un desarrollo sostenible. Actualmente, en América Latina y el Caribe se observan diversos esfuerzos por instrumentar políticas públicas referidas a la mitigación y a la adaptación al cambio climático. (Sánchez y Reyes, 2015)

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2015) reporta que los efectos del cambio climático han afectado cerca de 2.5 millones de personas, además, los costos económicos superaron los 335.35 miles de millones de pesos causando tanto la pérdida de vidas como de recursos materiales.

Los ecosistemas forestales intercambian energía, agua, nutrientes, y en particular, carbón (C) con los ecosistemas circundantes, además, juegan un papel importante en el ciclo global del carbono, ya que, mantienen las reservas de C en la biomasa viva y muerta donde los árboles vivos capturan y liberan C a través de la fotosíntesis y la respiración, la biomasa muerta se desintegra y libera C (Lorenz & Lal, 2010, p. 23). La reforestación, forestación, el manejo sustentable de los suelos agrícolas y forestales junto con un adecuado manejo global de la biomasa permite mitigar las emisiones de CO₂ (Linares, Valera, y García, 2007).

En los últimos años el volcán ha estado sujeto a intensas actividades de degradación de sus recursos naturales ocasionada por procesos de deforestación clandestina, incendios forestales, cambios de uso de suelo, extracción de leña, recolección de recursos naturales entre otras, que han ocasionado que sea una de las zonas más devastadas del país (Licona, 2011), en consecuencia, se han alterado las funciones naturales del ecosistema, entre ellas, el cambio del ciclo hidrológico y microclimático e incremento de las emisiones de CO₂ (Llaguno, 2007).

Desde sus orígenes en 1859 la teledetección se presentó como una herramienta importante para el análisis topográfico y geográfico de zonas terrestres, a partir de imágenes fotográficas (Elachi & van Zyl, 2006). A partir de 1972 con la llegada de la era satelital se incrementaron las aplicaciones en diversas áreas del conocimiento, entre ellas, la ecología, las ciencias de la Tierra y las ciencias ambientales, gracias a la información que se puede obtener por la interacción de la radiación electromagnética con las esferas que integran el planeta (Escalante, 2012; Franklin, 2001).

La teledetección se define como la ciencia de adquirir información sobre el estado de un objeto por medio de sensores sin establecer contacto con él (Chuvienco, 2016). La información se registra a través de sensores dispuestos en una plataforma satelital que captan la energía electromagnética emitida y reflejada por un objeto en la superficie de la Tierra por efecto de la interacción de la energía electromagnética proveniente del sol (Elachi & van Zyl, 2006). Los datos captados por el satélite son transformados a formato digital dividiendo la imagen en una cuadrícula

donde cada cuadro, llamado pixel, adopta un valor numérico que indica el nivel de intensidad de radiación registrada por el sensor (Weng, 2010).

Landsat es un conjunto de satélites creados por la Aeronáutica Nacional y Administración Espacial (NASA) norteamericana con el propósito de observar la Tierra (Chuvienco, 2016). Se han enviado, desde 1972 hasta la actualidad 8 satélites que recolectan imágenes multispectrales del planeta, en particular, la plataforma Landsat 7 dispone del sensor ETM+ (*Enhance Thematic Mapper Plus*) que cuenta con una resolución espacial de 30m en las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 para recolectar información del mismo punto del espacio cada 16 días (Wang & Weng, 2014).

El uso de plataformas satelitales constituye una herramienta importante y un reciente campo de acción de amplio espectro en el manejo y evaluación de los recursos naturales razón por la cual se plantea la pregunta de investigación:

¿Qué relación tiene el porcentaje de carbono orgánico (C%) almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 con los pixeles de imágenes satelitales obtenidas de la plataforma Landsat 7?

1.2 Delimitaciones espacial, temporal y semántica

Delimitación Espacial: El estudio se desarrolló en el PNM (o Matlalcueyatl) en el estado de Puebla.

Delimitación Temporal: Para la elaboración del proyecto se tendrán en cuenta varios factores temporales. En principio el tiempo de curso de la maestría en ciencias ambientales, los tiempos fijados por los organismos asociados a la continuidad de la maestría como son CONACYT, PNPC y el Posgrado en Ciencias Ambientales. En cuanto a la óptica de la investigación se tendrá en cuenta el tiempo transcurrido desde el cambio de uso del suelo. Según las imágenes satelitales, se estima un tiempo superior a 30 años (entre 1980 y 2002).

Delimitación Semántica:

Calentamiento global: se define como un incremento en el valor promedio de la temperatura producto de la concentración de GEI en la atmósfera, especialmente, CO₂. La concentración de CO₂ en la atmósfera está vinculada a procesos tanto naturales como artificiales de acción humana (Caballero, Lozano y Ortega, 2007).

Cambio climático: se refiere a más que solo a un aumento en la temperatura abarca también cambios regionales en la temperatura y en la precipitación, al igual que, cambios en su variabilidad y patrones estacionales (Boersema & Reijnder, 2009).

Ciclo biogeoquímico: se define como el movimiento de un elemento químico a través de los componentes principales de la Tierra: atmósfera, hidrósfera, litósfera y biósfera (Botkin, 2011).

Ciclo del carbono: es la serie de actividades de organismos que resultan en el movimiento de los átomos de carbono entre la atmósfera y los organismos vivos (Tillery, Enger & Rose, 2013).

es un ciclo biogeoquímico en el cual el carbono se transforma al asociarse con otros elementos en una determinada escala de tiempo. El ciclo del carbono es importante para la vida y la regulación del clima en el planeta (IDEAM, 2007).

Efecto invernadero: es el proceso mediante el cual se calienta la atmósfera desde su parte más baja a partir de la absorción de la radiación solar y la reemisión de radiación infrarroja. (Tillery, Enger y Ross, 2001).

Gases de Efecto Invernadero (GEI): es un término general para gases especialmente efectivos en la captura de energía de longitud de onda larga proveniente de la superficie de la tierra (Cunningham & Cunningham, 2010).

Materia Orgánica del Suelo (MOS): hace referencia a los materiales compuestos de carbono que se encuentran en distintos grados de descomposición. La permanencia de este tipo de materiales varía en el tiempo, tanto que puede tomar algunos días hasta algunas centurias. (Jaramillo, 2002)

Sistema de Información Geográfica (SIG): es un sistema basado en la computación para ayudar en la colección, mantenimiento, almacenamiento, análisis, salida y distribución de datos espaciales e información (Boldstad, 2019).

Teledetección: incluye un amplio rango de aspectos, desde las bases físicas para obtener información a distancia, la operación de plataformas llevadas a cabo por un sistema de sensores, la adquisición, almacenamiento e interpretación de información. (Chuvienco, 2016).

Suelo: desde la óptica ambiental se define como un cuerpo natural, comprometido en interacciones dinámicas con la atmósfera encima y los estratos abajo, que influencia el clima

del planeta y el ciclo hidrológico, además sirve como medio de crecimiento para una comunidad versátil de organismos vivos (Jaramillo, 2002).

Suelo forestal: es cualquier suelo que ha sido desarrollado principalmente bajo la influencia de una cubierta boscosa. (Binkley y Fisher, 2013).

1.3 Preguntas de Investigación

- ¿Qué modelo permite describir el C% almacenado por los suelos del PNM, Puebla, hasta el año 2004 con los píxeles de las imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7 correspondientes al año 2004?
- ¿Qué rango de funcionamiento permite predecir el modelo?
- ¿Qué modelo permite explicar la relación entre el C% almacenado en los suelos del PNM, Puebla, con los píxeles de las imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7?

1.4 Justificación del Problema

La prospección edáfica constituye un procedimiento importante y necesario para evaluar el estado de un ecosistema, también, es esencial para conocer las condiciones del recurso suelo y evaluar los potenciales efectos de las actividades humanas que pretenden involucrarlo (Porta, López & Roquero, 2003). La observación de la tierra por medio de plataformas espaciales permite obtener información importante asociada al estado de los recursos naturales, así como, de sus asociaciones con las poblaciones a través de su interacción con la energía electromagnética (Chuvienco, 2016).

Desde 1947 se valora el C% empleando el método de Wackley-Black que se encarga de oxidar la materia orgánica resultante del calor generado por la reacción del suelo con la mezcla dicromato de potasio 1N, ácido sulfúrico y ácido fosfórico concentrados para, posteriormente, titular el exceso de ácido crómico generado con sulfato ferroso 0.5N utilizando como indicador difenilamina (León y Aguilar, 1987). La evaluación del estado del suelo requiere de muestreo, transporte y análisis fisicoquímico de muestras, también, se involucran los factores de tiempo y clima, además, de

presentar importantes costos económicos de materiales, entre otros (Porta, López y Roquero, 2003).

La investigación planteada contribuyó a generar un modelo que permite estimar el C% en los suelos del PNM hasta el año 2004 en función de los píxeles de imágenes satelitales obtenidas de la plataforma Landsat 7 correspondientes al año 2004. Los resultados de la misma, contribuyeron a estimar el porcentaje de carbono orgánico almacenado en dichos suelos de manera rápida, económica y práctica.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Modelar el C% almacenado por los suelos del PNM (Puebla) hasta el año 2004 en función de los píxeles de imágenes satelitales obtenidas de la plataforma Landsat 7 para el año 2004.

1.5.2 Objetivos específicos

- Procesar imágenes satelitales del PNM, Puebla, correspondientes al año 2004.
- Analizar la base de datos resultante del procesamiento de imágenes satelitales del PNM para el año 2004 mediante las técnicas de ACP y AFE.
- Establecer modelos del C% almacenado por los suelos del PNM, Puebla, hasta el año 2004 en función de los píxeles de imágenes satelitales obtenidas de la plataforma Landsat 7 correspondientes al año 2004.
- Comparar modelos mediante regresión lineal simple.
- Calibrar el modelo de mayor ajuste
- Validar el modelo

1.6 Hipótesis

- La relación entre el C% almacenado por los suelos del PNM, Puebla, hasta el año 2004 y los pixeles de imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7 correspondientes al año 2004 es de tipo lineal.
- El modelo que mejor describe la relación entre el C% de los suelos del PNM y los pixeles de las imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7 es un modelo lineal univariado.

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Recurso Natural

Los recursos naturales son el conjunto de bienes materiales que proporciona la naturaleza sin alteración previa por parte del hombre (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], 2015). Hacen referencia a cualquier componente del ambiente natural, tal como suelo, agua, pastizales, bosques, vida silvestre y minerales de los que dependen las especies para su bienestar (Grebner, Bettinger y Siry, 2013). En un sentido más amplio se considera recurso natural no solo a la existencia material de ellos sino también aquellas funciones cumplidas por la naturaleza que permiten satisfacer necesidades humanas, por ejemplo la purificación del aire por los bosques y las selvas, regulación de escurrimientos superficiales por la vegetación natural, entre otros (Martínez, 1992).

De acuerdo a la disponibilidad en el tiempo, tasa de generación (regeneración) y ritmo de uso o consumo los recursos naturales se agrupan como renovables y no renovables (INIA, 2015). Los recursos naturales renovables pueden ser formados o regenerados por procesos naturales. El suelo, los animales, la vegetación, el aire y el agua son recursos renovables principalmente porque están sometidos naturalmente a procesos que reparan, generan o los limpian cuando su calidad o cantidad se reduce (Enger & Smith, 2010). Por otro lado, los recursos naturales no renovables son depósitos limitados o con ciclos de regeneración muy por debajo de los ritmos de extracción o explotación y se agotan con su explotación. Los minerales y el petróleo son recursos no renovables debido a que al ser utilizados no pueden ser regenerados en tiempo real, puesto que son resultado de complejos procesos que duraron miles de años (INIA, 2015).

El suelo es un recurso natural finito y no renovable que presta diversos servicios ecosistémicos o ambientales, entre ellos y a manera de ejemplo, el relacionado con su participación en los ciclos biogeoquímicos de elementos clave para la vida como carbono, nitrógeno, fósforo, etc., que continuamente y por efecto de la energía disponible, pasan de los seres vivos a los componentes no vivos del planeta. (Burbano, 2016)

El recurso suelo no goza del mismo reconocimiento ni del mismo aprecio que los otros recursos naturales como, por ejemplo, las aguas, los bosques o los yacimientos minerales, porque

no es un bien directamente consumible y porque existe la creencia común, de que los suelos son renovables a escala humana (Zinck, 2005). La evolución del suelo es constante bajo condiciones propicias, pero con lapsos que fluctúan de cientos a miles de años requeridos para la formación de algunos centímetros. Este largo período hace que se considere al suelo como un recurso natural no renovable (Cotler *et al*, 2007).

Las funciones del suelo son consideradas como aquellas capacidades que tienen los suelos relacionadas con la agricultura, el ambiente, la protección de la naturaleza y la arquitectura del paisaje, que en detalle son: producción de biomasa y alimentos, ciclado de nutrientes, regulación hídrica, interacciones ambientales (almacenamiento, filtrado y transformación) hábitat biológico, reserva genética, fuente de materias primas, patrimonio físico y cultural, y plataforma de estructuras antrópicas (edificaciones y vías). (Trujillo, Mahecha y Torres, 2018)

El suelo puede ir disminuyendo sus funciones y capacidades a causa del fenómeno de degradación. La degradación del suelo es definida como la disminución de su potencial o utilidad actual, y la reducción en su habilidad para realizar sus funciones ecosistémicas. (Lal, Sobecki, Livari & Kimble, 2004)

Hay tres tipos de degradación del suelo: la física, la química y la biológica. Los procesos de degradación física afectan los procesos de relación masa-volumen del suelo, aire-agua, intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera y la resistencia contra fuerzas disruptivas de aire y agua; Los procesos de degradación química están relacionados con las propiedades químicas del suelo, su pH, la reducción y reservas en la disponibilidad de nutrientes de las plantas, la capacidad de inactivar compuestos tóxicos y reducir la excesiva elaboración de sales en la zona radical; mientras, los procesos de degradación biológica pueden afectar adversamente la cantidad y calidad del carbono orgánico del suelo (COS), diversidad de especies del suelo e incrementar la proporción de organismos patógenos que lo habitan. (Lal, Sobecki, Livari & Kimble, 2004).

A escala global, la erosión hídrica es el proceso dominante en la degradación de suelos inducida por intervenciones humanas, el cual afecta cerca de 11 millones de km² (= 8,5% de los 130 millones de km² de tierras en la superficie del globo terráqueo). En conjunto, la erosión hídrica (10,94 millones de km²), la erosión eólica (5,49 millones de km²), la degradación química (2,39 millones de km²) y la degradación física (0,83 millones de km²) afectan, en diferentes niveles de intensidad, casi 20 millones de km², esto es, 15% de la superficie total de tierras, o

aproximadamente 66% de las tierras potencialmente arables en todo el mundo (Oldeman citado en Zinck, 2005).

En adición a los fenómenos de degradación, el cambio climático también genera impactos importantes sobre los suelos, la FAO sugiere que una modificación pronunciada de la precipitación pluvial y de la temperatura afectaría la MOS y su dinámica general, al igual que la vegetación nativa y los cultivos establecidos sobre él (Burbano, 2016)

2.2. Uso de la Teledetección en la evaluación de Recursos Naturales

2.2.1 Teledetección y Suelo

La Geomática, también conocida como Teledetección o percepción remota (*Remote Sensing*) se define como la ciencia de adquirir información de la superficie de la Tierra sin tener contacto con ella. Esto se hace por la percepción y registro de energía reflejada o emitida y procesamiento, análisis y aplicación de la información. (Canada Center for Remote Sensing, 2020)

En el ámbito de las Ciencias de la Tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, el tratamiento y el análisis de imágenes satelitales tomadas desde satélites artificiales (Pérez y Muñoz, 2006).

Desde el punto de vista de su aplicación, la teledetección tiene como objetivo el reconocimiento de las características de la superficie terrestre y de los fenómenos que en ella se producen a partir de los datos registrados por el sensor, basándose en que los materiales de la superficie terrestre tienen una respuesta espectral propia, a partir de la cual se pueden identificar, apoyándose en una serie de leyes y principios físicos básicos que pueden resumirse en los siguientes puntos: (i) la radiación electromagnética como fuente de energía, (ii) la interacción de la energía electromagnética con la atmósfera, (iii) la interacción de la energía electromagnética con los objetos de la superficie terrestre, (iv) la recogida de información mediante sensores (Sacristán, 2006).

El rango de aplicación de la Teledetección incluye la arqueología, agricultura, cartografía, ingeniería civil, meteorología y climatología, estudios costeros, respuesta de emergencia, silvicultura, geología, Sistemas de Información Geográfica, riesgos, uso y cubierta terrestre, oceanografía, desastres naturales, recursos hídricos y milicia, entre otras. (Wang & Weng, 2014)

Se ha empleado Teledetección para realizar estudios de erosión de playas y arenales, inventarios regionales de medio ambiente para preparar estudios de impacto ambiental, cartografía geológica para exploración mineral y petrolífera, cartografía de nuevos depósitos volcánicos, control de acumulación nival, de la fusión y de los cambios previsibles en la disponibilidad de energía hidroeléctrica, control del movimiento de icebergs en zonas polares, estimación de modelos de escorrentía y erosión, inventario del agua superficial, análisis en tiempo real de masas nubosas de escala media y pequeña, realización de inventarios forestales, predicción de rendimiento de cultivos, cartografía de la cobertura vegetal del suelo, entre otras. (Chuvienco, 1995)

La teledetección brinda la posibilidad de ir más allá de lo estructural y describir aspectos funcionales de los sistemas ecológicos, particularmente a nivel de ecosistemas. A este nivel el funcionamiento involucra intercambios de materia y energía de la biota con el medio físico, para cuya caracterización han demostrado ser muy efectivos los índices espectrales, particularmente los relacionados con las ganancias de C y las pérdidas de agua (Paruelo, 2008).

Un sistema de Teledetección está compuesto por una fuente de energía encargada de producir la radiación electromagnética que interactúa entre el sensor y la superficie, la cubierta terrestre formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua, rocas, nieve o construcciones humanas, tal que, estas superficies reciben la energía incidente de la fuente y, como resultado, emiten y reflejan una parte de la energía incidente hacia el sensor; el sistema sensor conformado por el sensor y su plataforma soporte, donde, el sensor mide y registra la energía procedente de la superficie, mientras, la plataforma provee un mayor servicio para la operación del sensor; un sistema de recepción donde se recibe, se graba y se distribuye la información recibida de la plataforma; un intérprete, quien se encarga de analizar la información y, el usuario final, quien está encargado de analizar la información interpretada y determinar las consecuencias resultantes (Chuvienco, 2016).

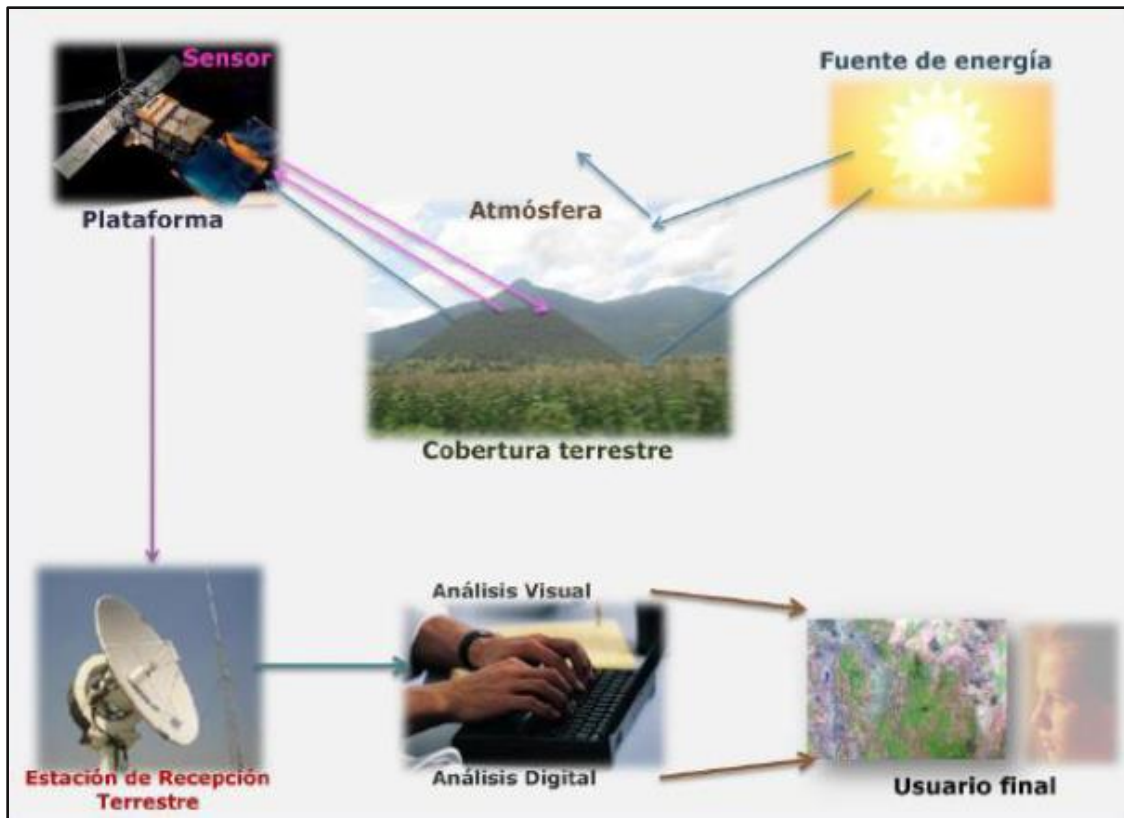


Figura 1. Componentes de un sistema de percepción remota. Fuente INEGI, 2020.

Cabello y Paruelo (2008) estimaron que el 9% de artículos publicados en revistas de ecología de alto impacto hacían uso de la percepción remota. La mayor parte de trabajos usaron la información espectral para describir la variación en el espacio de la vegetación o del paisaje en términos más generales, asumiendo una perspectiva holística de los sistemas ecológicos. Las publicaciones de carácter aplicado, en las que las descripciones del territorio y la resolución de cuestiones de gestión ambiental cobran más importancia, hacen mayor uso de los sensores remotos que aquellas otras más orientadas a los aspectos básicos de la ciencia ecológica. Sin embargo, son los estudios asociados a escalas regionales o globales o a nivel de organización ecosistema los que incorporan una proporción sensiblemente mayor de los artículos publicados.

2.3 Suelos

2.3.1 Conceptos Generales

Es un recurso natural finito y no renovable que presta diversos servicios ecosistémicos o ambientales, entre ellos y a manera de ejemplo, el relacionado con la participación en los ciclos biogeoquímicos de elementos clave para la vida como carbono, nitrógeno, fósforo, etc. (Burbano, 2016). Desde la óptica ambiental, se define como un cuerpo natural, comprometido en interacciones dinámicas con la atmósfera encima y los estratos abajo, que influencia el clima del planeta y el ciclo hidrológico, además, sirve como medio de crecimiento para una comunidad versátil de organismos vivos (Jaramillo, 2002). Adicionalmente, juega un papel importante como reactor bio-físico-químico que descompone productos de desecho y los recicla en nutrientes para la continua regeneración de vida sobre la tierra (Hillel, 1998).

En términos de edafología, la estructura del suelo se ha considerado resultado de la interacción del material parental constituido por minerales primarios o formados por cristalización, los cuales, al degradarse originan los minerales secundarios: arenas, limos y arcillas, quienes junto con la acumulación de la materia orgánica en sus diferentes manifestaciones (biota y los restos orgánicos) propician la presencia y disponibilidad de nutrientes, de agua y un ambiente atmosférico con manifestaciones micro y macroscópicas (Sánchez, Prager, Naranjo & Sanclemente, 2012).

El suelo se considera como un sistema dinámico abierto perturbable de manera constante por fuerzas internas y externas, un balance de entradas y salidas que perdura en un medio de procesos complejos y perpetuamente dinámicos que incluyen: intercambio entre el suelo y el medio ambiente de materiales como agua, oxígeno o dióxido de carbono, respuestas de control automático (contracciones y dilataciones, congelación y descongelación, etc.) y producción y consumo de nuevos materiales orgánicos e inorgánicos (Ortíz, 2015).

Según INEGI (2007), en México existen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional de Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2007). En su mayoría son Leptosoles (28,3% de territorio), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.7%), Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%), Vertisoles (8.6%), que en conjunto ocupan 81.7% de la superficie nacional (Figura 1)

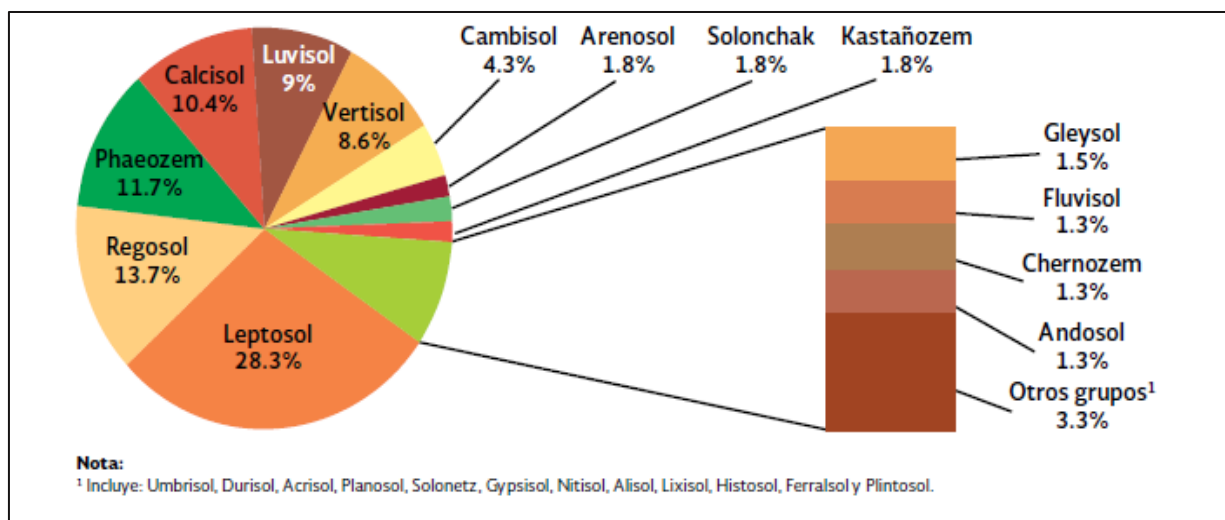


Figura 2. Distribución de los suelos en México. Fuente INEGI, 2007.

Por otro lado, los suelos que presentan una cubierta forestal son de gran importancia (FAO, 2003). A diferencia de los suelos agronómicos, presentan horizonte O (cubierta formada por hojas, ramas y restos vegetales), capas orgánicas que cubren el suelo mineral, tienen flora y fauna diversa que juegan mayores roles en su estructura y función, regularmente son húmedos o escarpados, superficiales a la roca madre, o tienen alto contenido de rocas. En adición, todos los suelos excepto los de tundra, pantano, pradera y desierto fueron desarrollados bajo una cubierta forestal y han adquirido algunas propiedades distintivas como resultado (Binkley y Fisher, 2013).

El suelo, como mayor sumidero de carbono en la naturaleza, fija carbono para impedir que el CO₂ vaya a la atmósfera y contribuya con el calentamiento global, siendo que este es uno de los GEI que propician el cambio climático, se integra por la intermediación de las plantas y la participación de los organismos del suelo provocando la transformación de carbono en materia orgánica que se acumula en el suelo por amplios periodos de tiempo y se almacena en el primer metro y medio del suelo (Burbano, 2016).

2.3.2 Nuevos enfoques sobre la ciencia del suelo

El concepto de Suelo ha evolucionado a lo largo del tiempo. Ha pasado por acepciones bastante simplistas que toman en cuenta la función que desempeña dentro del área de estudio desde la cual se examine (Hillel, 1998). La concepción de suelo empezó a cambiar hacia principios del

siglo XIX, cuando empezó a mirarse en un contexto naturalista y a considerarse como un cuerpo natural. En 1886 Dokuchaev concibió el suelo como un cuerpo natural independiente y evolutivo formado bajo la influencia de cinco factores, de los cuales él consideraba que la vegetación era el más importante (Jaramillo, 2002).

La Soil Survey Staff [SSS] (1999) establece que el suelo es un cuerpo natural compuesto de sólidos, líquidos y gases que ocurren en la superficie de la tierra, ocupa un espacio y se caracteriza porque tiene horizontes o capas que se diferencian del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, translocaciones y transformaciones de energía y materia o porque es capaz de soportar plantas arraigadas en un ambiente natural.

En la actualidad se han elaborado, por efecto de la influencia ambiental, la sostenibilidad y de la sistémica, concepciones más holísticas. Los científicos ambientalistas consideran el suelo como un cuerpo natural comprometido en interacciones dinámicas con la atmósfera y los estratos, que influencia el clima del planeta y el ciclo hidrológico, además, sirve como medio de crecimiento para una comunidad versátil de organismos (Hillel, 1998). Posterior al año 2000 surge una nueva propuesta en la cual se establece el suelo como una zona crítica. La zona crítica se refiere a la superficie externa de la tierra que se extiende de los límites exteriores de la vegetación baja hasta los límites de agua subterránea. Esta zona sostiene la mayoría de la vida del planeta (Brantley *et al.*, 2006).

2.3.3. Suelos forestales

Un suelo forestal es cualquier suelo que se ha desarrollado primeramente bajo la influencia de una cubierta forestal. Una mejor definición de suelos forestales podría ser aquellos suelos que en la actualidad son influenciados por una cubierta forestal. Actualmente, bosques de varios tipos cubren cerca de un tercio de la superficie del planeta (Binlkey y Fisher, 2013).

Los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso de la tierra y sus suelos – que contienen cerca del 40% del total de carbono- son de importancia primaria cuando se considera el manejo de los bosques (FAO, 2002). Los organismos fotosintéticos toman el CO₂ de la atmósfera y utilizan la energía de la Luz solar para convertirlo en biomasa mientras crecen, la cual los animales y seres humanos usan para alimentos, abrigos, y energía que acalora la biosfera (Ussiri & Lal, 2017). Cuando las plantas mueren y se

descomponen el carbono contenido en su biomasa se transforma en MOS el cual es crítico en condicionar la calidad del suelo y la producción de CO₂. Las emisiones de los ecosistemas naturales y de las actividades antropogénicas retornan el C a la atmósfera, lo cual renueva el ciclo (Ussiri y Lal, 2017).

El intercambio neto entre suelos y vegetación (Figura 3), mayormente diferencia, entre entradas orgánicas (humificación) y salidas de C a la atmósfera (mineralización) se cifra entre 0,25 y 0,50Pg de C por año; pero este posible superávit se encuentra perturbado por las actividades antropozoógenas (Gallardo, 2004).

Si se repasan los principales ecosistemas de acuerdo a la climatología zonal, obviamente, salvo los bosque tropicales pluviales (con cerca de 200MgC/ha), los bosques tropicales de estación seca o templados (generalmente con alrededor de 150Mg/ha) y los bosques boreales (con cerca de 90Mg/ha), los demás ecosistemas no cobran importancia en cuanto a la masa vegetal (más o menos permanente). Dada la gran superficie que ocupan los bosques tropicales en el planeta Tierra, se estima que pueden acumular unos 460Pg de carbono (prácticamente la mitad de la biomasa); de ahí el interés de que no sean deforestados (Gallardo, 2004).

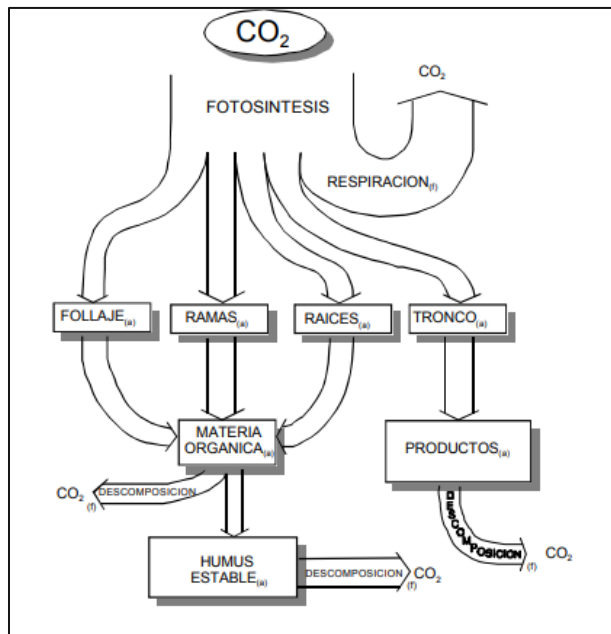


Figura 3. Diagrama simplificado de los flujos de carbono en ecosistema forestal. Tomado de Benjamín y Masera (2001).

2.3.4 Andosoles

En el sistema propuesto por el United States Department of Agriculture (USDA) los suelos de origen volcánico se denominan andosoles (Jaramillo, 2002). Este tipo de suelos está constituido principalmente de ceniza, la cual contiene alto contenido de alófono (mineral no cristalino compuesto de silicio, aluminio y agua), que le confiere ligereza y suntuosidad al suelo. Son generalmente de colores oscuros y tienen alta capacidad de retención de la humedad. En condiciones naturales presentan vegetación de bosque o selva. Tienen generalmente bajo rendimiento agrícola debido a que retienen considerablemente el fósforo y este no puede ser absorbido por las plantas (INEGI, 2004).

Los andosoles cubren cerca de 124 millones de hectáreas o cerca del 0,84% de la superficie libre de hielo (Tsai *et al*, 2010). El sorprendente patrón de distribución de los andosoles sigue paralelo al cinturón de Fuego del Pacífico, que concentra las zonas de actividad tectónica y volcánica a lo largo de la costa occidental de todo el continente americano, se extiende a través de las islas Aleutianas, hacia el sur de la península Kamchatka en Rusia, de un lado a otro de Japón, Filipinas e Indonesia, a través de Papúa Nueva Guinea, Islas Salomón y Vanuatu y otras islas del Pacífico hasta Nueva Zelanda (SSS, 1999). La distribución global de los andosoles abarca una gran variedad de condiciones climáticas-frío a cálido y húmedo a seco. Esto sugiere que el clima es menos importante para su formación que la proximidad a los materiales parentales piroclásticos o volcánicos (Mc Daniel, Lowe, Arnalds y Ping, 2012). Aproximadamente la mitad de los andosoles en el mundo se presentan en los trópicos, con la restante mitad distribuida entre las regiones boreales y templadas (Wilding, 2000). En México se extienden territorialmente en las regiones del Mil Cumbres y la Neovolcánica Tarasca, en el estado de Michoacán. En las Sierras Neovolcánicas Nayaritas, Sierra de los Tuxtlas en Veracruz y en la región de Lagos y Volcanes de Anahuac, en el centro del país (INEGI, 2004).

Este tipo de suelo se encuentra únicamente sobre material parental volcánico que resulta del intemperismo de las rocas volcánicas, en particular del vidrio volcánico. Usualmente derivan de materiales parentales de origen volcanoclástico. Generalmente las rocas volcanoclásticas se agrupan en dos grandes divisiones, material piroclástico (explosivo) y material epiclástico (erosivo). El material piroclástico incluye los depósitos de roca incandescente, nubes cargadas de gas de alta velocidad con rocas arrastradas y arenas, cenizas y partículas expulsadas en el aire que viajan bien alto en la atmósfera antes de caer a la tierra. El material epiclástico incluye todas las

formas de removilización volcanoclástica en la post- deposición del paisaje e incluye depósitos de avalanchas de escombros volcánicos, corrientes de lodo volcánico, flujo de escombros e hiperconcentrados flujos de corriente (Neall, 2009).

2.4 Secuestro de carbono

2.4.1 Ciclo del carbono

El carbono es un elemento fundamental para todas las formas de vida en el planeta y es el elemento esencial presente en todas las formas de vida conocidas, conformado cerca del 50% del peso seco de los organismos (Ussiri y Lal, 2017). Es el principal constituyente de los compuestos orgánicos que al combinarse con otros elementos como el hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre genera una amplia gama de moléculas necesarias para el desarrollo de organismos. La unión molecular entre el carbono y el oxígeno da origen a varios compuestos, entre ellos, el CO₂. El CO₂ es el resultado de procesos biológicos y geoquímicos, suele establecerse en la atmósfera en su capa más próxima a la Tierra y su presencia es esencial en la regulación del clima en el planeta a causa de su participación como gas de efecto invernadero (Jaramillo, 2004).

La concentración de CO₂ en la atmósfera se ha incrementado drásticamente al igual que otros gases de efecto invernadero, como son el CH₄, el óxido nitroso (NO₂) y los gases fluorados. Esto ha provocado alteraciones en el clima, aumento en la temperatura promedio anual del planeta y variaciones en los procesos naturales de movimiento de carbono en los ecosistemas a causa, principalmente, de actividades antropógenas como son la quema de combustibles fósiles y los procesos industriales que contribuyeron en el periodo comprendido entre 1970 y 2010 con el 78% de las emisiones (IPCC, 2015).

El ciclo del carbono es un proceso biogeoquímico en el cual el C se transforma a lo largo del tiempo. El C se presenta de diversas formas en el sistema terrestre: como CO₂, CH₄ y otros compuestos en la atmósfera, como CO₂ disuelto en agua en la hidrósfera, como componente de rocas e hidrocarburos en la litósfera y como carbohidratos en la antroposfera. Se deposita principalmente en la atmósfera, suelos oceánicos, reservas geológicas y biomasa vegetal (Gallardo, 2007), circulando entre ellos por medio de la interacción en escalas de tiempo que van desde horas

hasta largos periodos geológicos (IDEAM, 2007). La velocidad de proceso definida por la escala de tiempo permite que se pueda clasificar en dos formas:

El aumento en actividades como la deforestación, el pastoreo y la agricultura ha incrementado la liberación de carbono hacia la atmosfera, lo cual ha acelerado el calentamiento global. En el pasado, la agricultura era la principal fuente de emisiones de CO₂ a la atmosfera. Actualmente, el mayor contribuyente es el uso de combustibles fósiles para la industria y el transporte (Hernández, Tirado y Beltrán, 2014).

Ciclo biológico del carbono

Hace referencia a los flujos de bióxido de carbono entre los seres vivos y la atmósfera (IDEAM, 2007). Inicia con la incorporación del CO₂ por parte de los organismos autótrofos a través de la fotosíntesis. El CO₂ es devuelto a la atmósfera mediante la respiración aunque es retenido en el suelo como carbono orgánico a causa de la descomposición de los organismos vegetales. Los procesos de descomposición del carbono orgánico son quienes dan origen a los combustibles fósiles que son explotados en la actividad minera para que por combustión retomen la forma de CO₂ y aumente su concentración en la atmósfera (Pérez, Jaramillo y Bautista, 2013).

Ciclo biogeoquímico del Carbono

Es el responsable de regular la transferencia de carbono entre la atmósfera, la litosfera y la hidrosfera (IDEAM, 2007). Los océanos capturan grandes cantidades de carbono a causa de la acumulación de sedimentos de naturaleza carbónica en el fondo que derivan del intemperismo efectuado en la superficie de la Tierra a partir de la combinación de ácido carbónico con minerales (Rackley, 2010). La combinación se da lentamente en periodos de larga duración para que los sedimentos sean empujados bajo los márgenes continentales mediante procesos de subducción y a causa de las fuerzas tectónicas de las rocas con elevadas concentraciones de carbono se calienten hasta fundirse y volver a la superficie como CO₂ (Pérez, Jaramillo y Bautista 2013).

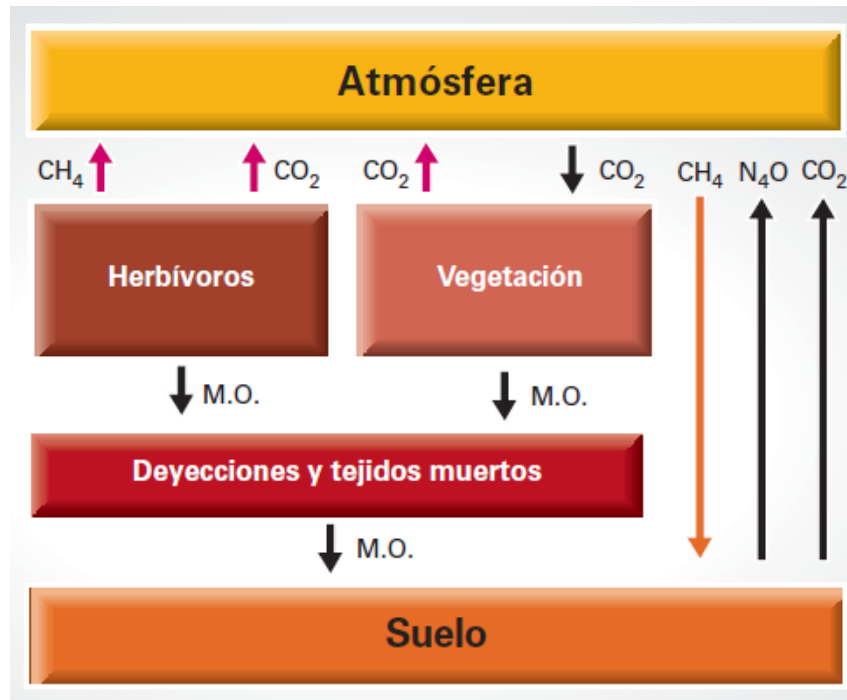


Figura 4. Flujos de materia orgánica y gases con efecto invernadero en el planeta Tierra. Fuente Gallardo, 2007.

2.4.2 Secuestro de Carbono en Suelos

El secuestro de carbono se define como el proceso por el cual el CO_2 la atmósfera se incorpora en formas almacenadas fundamentalmente en el suelo y en la biomasa, quedando temporalmente inmovilizado respecto a la circulación biogeoquímica durante largos periodos de tiempo (Valera, Llaguno, Linares y Torres, 2009). Es considerado como una importante estrategia para disminuir la concentración del bióxido de carbono CO_2 , el principal de los gases de efecto invernadero en una estrategia para mitigar los efectos del calentamiento de la atmósfera, pero además supone un medio adicional para frenar los procesos de degradación de los suelos y aumentar su calidad desde una perspectiva ambientalmente sustentable (Rodeghiero, Heinemeyer y Bellamy, 2010).

Los bosques del mundo (templados y tropicales) capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Dixon *et al.*, 1994). Los principales almacenes de carbono en los ecosistemas forestales son el suelo, la vegetación y el mantillo. La vegetación es la encargada de incorporar el

carbono atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis (Benjamín y Masera, 2001). Los suelos constituyen el depósito de carbono primario, contienen cuatro veces la cantidad de carbono que la vegetación (Jandl, 2005), valorado entre 1500 y 2000 Pg (petagramos) (Janzen, 2004), siendo el elemento más abundante en la MOS (45-55%) (Galicía *et al.*, 2015). Adicionalmente, juegan un papel importante en el ciclaje de carbono en este tipo de ecosistemas. El almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) depende de diversos factores (bióticos, abióticos, antrópicos). Se ha sugerido que en escalas de décadas a siglos, el uso de la tierra y cambio de uso de la tierra es el principal factor que determina el almacenamiento de COS (Scott *et al.*, 2002). El cambio de uso de la tierra es la segunda causa de incremento de CO₂ atmosférico luego de la quema de combustibles fósiles, siendo responsable de alrededor del 25% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Lal, 2004).

El almacenamiento de carbono en los bosques se puede mejorar reduciendo la tala y deforestación, por ejemplo protegiendo particularmente los bosques antiguos, regenerando los bosques secundarios y degradados con biomasa arbórea y carbono orgánico del suelo (COS) por debajo de sus valores potenciales (Rackley, 2010).

En México, el potencial de captura de carbono en la vegetación y los suelos de los bosques templados fue estimado en 200 y 327 Mg ha⁻¹ respectivamente (Monreal *et al.*, 2005), sin embargo, no existen estudios sobre el papel de los diferentes tipos de suelos como reservorio terrestre de carbono bajo los bosques templados mexicanos (Galicía *et al.*, 2016). Aunque es conocido que el almacenamiento de carbono y la emisión de CO₂ dependen del tipo de suelo y ecosistema, entre otros factores; los cuales son heterogéneos en los bosques templados de México y han sido estudiados escasamente (Galicía *et al.*, 2016).

El inventario Nacional Forestal y de Suelos (2009) contabiliza para México 137,8 millones de hectáreas de superficie forestal, que representan el 70.5% de las 195, millones de hectáreas del territorio nacional, donde, se consideran 54 agrupaciones vegetales o tipos de vegetación, representadas a lo largo del país e incluidas en once formaciones forestales (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2018). El inventario estatal forestal y de suelos para el estado de Puebla (2013) estima la presencia de 11 tipos de suelos de acuerdo a la base referencial del recurso suelo y la presencia de 21 tipos de vegetación: siete bosques, seis para selvas, cuatro en matorral xerófilo y cuatro en otras áreas forestales, todas ellas agrupados en 10 formaciones y tres ecosistemas donde

los bosques son los mejor representados en el estado (SEMARNAT, 2014). La superficie forestal del estado ocupa 1 674 763,2 hectáreas, sin embargo 56,2% ha sufrido algún tipo de perturbación, ya que su estructura vegetal se encuentra en algún tipo secundario de sucesión ecológica (arbustiva, arbórea o herbácea) (SEMARNAT, 2014).

Capítulo III

Antecedentes

3.1 Técnicas geomáticas de análisis de suelos

Las técnicas de percepción remota se agrupan en métodos pasivos y activos cuando se tiene en cuenta el origen de la señal utilizada (Wang y Weng, 2014). Los métodos pasivos están basados en las características radiactivas o reflectantes del sistema observado, mientras, los métodos activos generan una señal que luego es captada por un sensor cuando es reflejada por el objeto de estudio (Weng, 2010). Para la evaluación de recursos naturales se emplean en mayor medida los métodos pasivos debido a que tan solo reciben las señales emitidas naturalmente y reflejadas por los objetos percibidos (Chuvienco, 2016). Son técnicas de teledetección pasiva:

- Los **Sensores fotográficos** son dispositivos compuestos mediante un sistema óptico (conjunto de lentes) para registrar la energía radiante reflejada por un objeto en relación con la radiación incidente sobre el mismo en una película fotosensible (Billings *et al*, 1976). Dentro de esta configuración básica, pueden establecerse numerosas variantes, en función de cuatro elementos: tipo de película, número de objetivos, ángulo de observación y altura de la plataforma (Chuvienco, 2016).
- Los **Sensores óptico-electrónicos** combinan un sistema óptico con un sistema de detección electrónico que busca evitar la dependencia a una superficie sólida (Chuvienco, 1995). Los exploradores de barrido (*scanners*) constan de un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria para explorar una franja de terreno (Chuvienco, 2016). La radiancia recibida por el componente óptico, se dirige a una serie de detectores, que la amplifican y la convierten en una señal eléctrica que es transformada en un valor numérico que puede almacenarse en la plataforma o transmitirse a una red de antenas receptoras para ser guardadas para su procesamiento posterior (Chuvienco, 1995).
- Los **Radiómetros de microondas** trabajan en el rango del espectro correspondiente a las longitudes de onda largas entre 1 y 100 mm caracterizadas, básicamente, porque no se ven afectadas por las condiciones atmosféricas ni de iluminación (Billings *et al*, 1976). El radiómetro está compuesto por un elemento direccional, un receptor que permite la

recepción y la amplificación de las microondas y un detector. Su gran desventaja estriba en la pobre resolución espacial que proporciona, ya que, al tratarse de un sensor de apertura circular, la resolución es inversamente proporcional al diámetro de apertura y directamente a la longitud de onda (Chuvieco, 2016).

Las técnicas de teledetección activa de mayor uso son:

- El sistema **radar** (*Radio Detecting and Ranging*) es el sistema de teledetección activo más conocido. Trabaja en el rango de las microondas con diferentes bandas espectrales entre 0.1cm y 1m. Al trabajar en el rango de las microondas el radar puede adquirir imágenes en cualquier condición atmosférica e independientemente de la iluminación solar (Chuvieco, 2016).
- El sistema **Lidar** (*Ligth Detection and Ranging*) es una técnica de teledetección activa que emite pulsos de luz polarizada entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano, mide distancias entre un sensor y los objetos basado en el retraso de tiempo entre la amplificación de luz transmisora por la emisión estimulada del haz de radiación proveniente del sensor y las señales recibidas reflejadas de los objetos iluminados (Chen, 2010).

Los sistemas Lidar usan pulsos de luz láser polarizada y colimada que tienen radiación coherente. Esto implica que las emisiones del láser están muy direccionadas, los electrones están alineados y los fotones están en fase (Chuvieco, 2016).

3.2 Estudios de suelos realizados en el Parque Nacional La Malinche

El PNM ha albergado variadas y diversas investigaciones, 15 de ellas corresponden a las ciencias ambientales, 34 a Zoología, 28 a Ecología y 19 a Botánica, entre otras. Algunas investigaciones significativas son:

- Castañeda, (2011), analizó los impactos potenciales en las comunidades vegetales del PNM según ciertos escenarios de cambio climático. Construyó el escenario climático base con las variables de temperatura, precipitación para el área de estudio, así como la descripción

de la vegetación en base al método fitosociológico, reforzando los resultados mediante un análisis de clasificación aglomerativa Aplicó dos Modelos de Circulación General para analizar el cambio climático: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL-TR 90) y el HADLEY (HADLEY 3-TR-00), con dos escenarios de emisiones (A2 y B2) para los horizontes temporales de 2020 y 2050. El análisis de los impactos del cambio climático se realizó bajo tres escalas de estudio, el primero a nivel de pisos bioclimáticos, el segundo por comunidad vegetal aplicando un índice que relacionó las variables precipitación y temperatura; además de las modificaciones climáticas en las comunidades vegetales, por último, se evaluó el posible impacto de algunas especies presentes en las diferentes comunidades vegetales. Las proyecciones de los modelos de cambio climático indicaron que en el volcán Malinche podría haber una reorganización de las comunidades tanto a nivel altitudinal como en su composición, siendo las comunidades de *Calamagrostis tolucensis-Trisetum rosei* y *Pinus hartwegii-Muhlenbergia macroura* las más vulnerables. Se estimó que el clima se hará más seco por influencia del aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación; se perderá el tipo climático frío y el semifrío solo permanecerá hasta el 2020 además de la aparición de una sequía veraniega en la zona. Las comunidades estarán sometidas a cambios muy rápidos y de gran impacto por lo que las especies se verán obligadas a desarrollar estrategias que les permita adaptarse a las nuevas condiciones prevalecientes, de lo contrario verán reducida su distribución o desaparecerán en la zona. Se prevé que un 8% de las especies mantienen su distribución, el 88% de las especies reducen su distribución, y solamente una especie (4%) expande su distribución según escenarios para el 2020, mientras, el 12% de las especies desaparecen en 2050.

- Arreola y colaboradores (2010) evaluaron la calidad de suelo de los sistemas forestales en referencia con cambios en el clima y la capacidad del suelo para infiltrar agua en la zona del volcán la Malinche. Se estudió el comportamiento del clima en la región durante el período 1980-2006 y se comparó la capacidad de infiltración del agua en los suelos forestales conservados con respecto a los degradados. No se encontraron evidencias claras de que los cambios en el clima hayan afectado la capacidad de infiltración del suelo, además, no hubo diferencias significativas en los climogramas complementarios de tal manera que indiquen cambios en la acumulación de humedad en el suelo. Existen

diferencias significativas en la capacidad de infiltración agua de los suelos forestales degradados respecto a los conservados. Se concluyó que es posible mejorar los servicios ambientales que proporcionan los suelos de La Malinche reforestando la zona afectada y evitando la deforestación.

- Ruiz y Gomez (2010) realizaron un inventario de los mamíferos silvestres que habitan en el Parque Nacional Malinche a través de capturas y registros de rastros. Se determinó la distribución de cada especie a lo largo del volcán Malinche en cuatro tipos de vegetación: cultivos (15 especies), bosque de pino (27 especies). Se encontró que durante 2007 y 2008, se registraron un total de 27 especies pertenecientes a 22 géneros, 14 familias y 7 órdenes, incluyendo 5 especies endémicas a México (*Sylvilagus 43 cunicularius*, *Peromyscus difficilis*, *P. melanotis*, *Neotomodon alstoni* y *Sorex oreopolus*). Se concluyó que los mamíferos del volcán Malinche representan el 40.3 % de las especies de mamíferos del estado de Tlaxcala.
- Llaguno (2007) determinó los cambios en la precipitación media anual y los regímenes de humedad del suelo ocurridos entre los años 1986-2006 en el PNM y sus alrededores en el estado de Puebla. Se evaluaron climogramas de 7 estaciones meteorológicas de la CONAGUA correspondientes a los estados de Puebla y Tlaxcala, se establecieron los balances hídricos y se definió el régimen de humedad del suelo para los periodos 1985-1995 y 1995-2005. Se encontró una disminución en la precipitación media anual hasta en 80mm en algunas zonas, mientras, en otras menos afectadas se presentó una disminución menor a 20 mm lo que permitió identificar el régimen de humedad ústico de los suelos. Se concluyó que las zonas más afectadas son las de mayor grado de urbanización e industrialización, en tanto que, las menos afectadas conservan relictos de bosque. Por otra parte, se encontró que la disminución de la precipitación combinada con factores ambientales como el relieve, el material geológico, el régimen de humedad y uso del suelo, son los causantes de la la escasez del recurso agua, por lo cual, se sugirió rediseñar estrategias para evitar la deforestación y promover la sostenibilidad del bosque.

- Marín y colaboradores (2007) estudiaron los patrones espaciales de diferentes géneros de hongos ectomicorrízicos en el período de julio a noviembre del 2004 para obtener y conservar *in vitro* el germoplasma de las especies colectadas en la zona poblana del PNM. Se recolectaron hongos carpóforos entre los meses de mayo a octubre describiendo sus características en campo. Posteriormente, se aisló el material de estudio separándolo de restos vegetales o cuerpos extraños para extraer una porción de tejido luego de haberlo escindido a la mitad y desarrollar un cultivo en agar, dextrosa y papa. Después de etiquetar cada muestra, poner en incubación a 25°C se observó diariamente. Se logró aislar ocho sepas, 3 del género *Suillus* y 5 de los géneros *Helvela*, *Cantarelius*, *Russula*, *Bolletus* y *Lactarius*.
- Vela y colaboradores (2007) investigaron sobre la regeneración vegetal natural en suelos de cinco sitios en el PNM con condiciones edafoclimáticas adecuadas para desencadenar la germinación y crecimiento de nuevas plántulas para ocupar el lugar de los árboles que alcanzaron su límite de vida. Se pretendió cuantificar la población natural de renuevos de *Pinus montezumae* Lamb. y determinar las propiedades fisicoquímicas de los suelos de cinco sitios en el PNM. Se encontró un alto grado de similitud entre los suelos por su origen común a partir del intemperismo de cenizas volcánicas caracterizada por la presencia de una secuencia de evolución A/C, una estructura poliédrica subangular debidamente desarrollada y abundantes raíces, entre otras. También se encontró que los sitios entre los 3000 a 3200m de altura con orientación al N tuvieron 58% de la población de renuevos de *P. montezumae* Lamb. donde predominan árboles con un tamaño de 1.50 a 2.50 m, la población disminuyó notablemente a más de 3200 m de altura llegando a 7% del total con una altura de 8 a 12 m. Se concluyó que tanto la altitud como la temperatura son los factores principales que determinan la presencia de renuevos y que el arbolado padre presenta las condiciones adecuadas para liberar semillas y propiciar la continuidad de la masa forestal, aunque, disminuye su número en altitudes mayores a los 3000 m por la tala clandestina e incendios.
- Wong y Villers (2006), realizaron un estudio sobre el peligro y combate de incendios forestales debido a la interacción entre los factores meteorológicos y las características de

los combustibles, donde se analizaron la humedad de los combustibles muertos sobre el suelo, la cual depende de su diámetro y de la humedad relativa principalmente. Se estudiaron combustibles de 0.6 a 2.5 y de 2.6 a 7.5 cm de diámetro en las comunidades donde predominan especies de los géneros: *Quercus*, *Alnus*, *Abies* y *Pinus* del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala, México. Los resultados a los que ellos llegaron demuestran: a) que la humedad de los combustibles varió de 41 acuerdo con las condiciones atmosféricas en los diferentes sitios y horarios, b) que los combustibles con mayor diámetro tuvieron una menor relación entre la superficie de exposición al medio y su volumen (120 m²/m³) y que los de menor diámetro la relación aumentó (235 m²/m³), teniendo estos últimos una mayor probabilidad de incendiarse. Concluyeron que durante la temporada de incendios en los meses de febrero, marzo y abril, la humedad de los combustibles en *Alnus jorullensis* y *Pinus montezumae* fue mayor a 25% que es aquella que impide la combustión, conocida como humedad de extinción; así también que en *Quercus crassipes*, *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa-Pinus teocote*, la humedad de los combustibles fue menor a 25% por lo que fueron las comunidades más vulnerables a incendios.

3.3 Andosoles como almacenes de carbono

Los suelos volcánicos han sido objeto de investigación en varias ocasiones.

- Sánchez y Rubiano (2015) realizaron una revisión de las principales relaciones entre la génesis y la mineralogía de los Andosoles, Alfisoles y los Ultisoles en Colombia para proponer alternativas técnicas para la utilización y el manejo sostenible de los suelos en dicho país. Se hizo un análisis documental de la relación entre la mineralogía de estos suelos y su fertilidad, de acuerdo con las especies presentes en sus fracciones gruesa (arena y limo) y fina (arcilla). Se concluyó que el proceso de andolización es favorecida por todos los factores que aceleran la alteración de los minerales y el vidrio volcánico y permiten la síntesis rápida de aluminosilicatos amorfos.
- Alcalá, Hidalgo y Gutiérrez (2009) estudiaron los suelos volcánicos de la región de Purhépecha, Michoacán, empleando análisis químico por disolución selectiva, difracción de rayos X, espectroscopia IR y microscopía electrónica de transmisión, para caracterizar los minerales amorfos y las arcillas silicatadas cristalinas de la región arcillosa en tres

andisoles, además, se definió si los minerales amorfos del tipo alófano y ferrihidrita fueron los responsables de la retención de fosfatos. Se encontró que en la fracción fina dominaron los materiales amorfos del tipo alófano y ferrihidrita en los tres andosoles estudiados.

- Rodríguez y colaboradores (2004) estudiaron el contenido y las formas de carbono en andosoles forestales para evaluación ecológica y la monitorización de los suelos de los ecosistemas en el Parque Nacional Garajonay (La Gomera), Islas Canarias. Se agruparon los andosoles en dos categorías principales: alófanos y organominerales. Se evaluaron condiciones climáticas, físicas, químicas y morfológicas además de realizar toma de muestras de suelo y evaluar el contenido de carbono orgánico mediante el método de Wackley Black. Se evaluó también el carbono orgánico disuelto en pirofosfato, carbono orgánico extraíble con sulfato potásico, carbono ligado a la biomasa. Se demostró el alto contenido de carbono orgánico en los suelos del Parque Nacional Garajonay con valores medios de 150 a 200 tha^{-1} en los primeros 30-40cm. También se encontró que en los suelos bajo formaciones maduras de laurisilva y fayal-brezal es donde se acumula mayor cantidad de carbono orgánico y en forma más estable.

Capítulo IV

Descripción de la zona de estudio

4.1 Localización

El PNM o Mantlacueyatl se encuentra en la zona central del oriente de México formando parte de la cordillera neovolcánica y se considera la montaña aislada más significativa del país (SEMARNAT, 2013). Sus coordenadas geográficas son los paralelos $19^{\circ} 05' 55''$ y $19^{\circ} 13' 48''$ latitud norte y los meridianos $97^{\circ} 53' 54''$ y $98^{\circ} 19' 42''$ de longitud oeste. Es el onceavo parque con mayor extensión de los 67 Parques Nacionales decretados en el país, comprende una superficie total de 46mil 112.241416 hectáreas, de las cuales el 72% corresponde al estado de Tlaxcala y el 28% al Estado de Puebla (SEMARNAT, 2013).

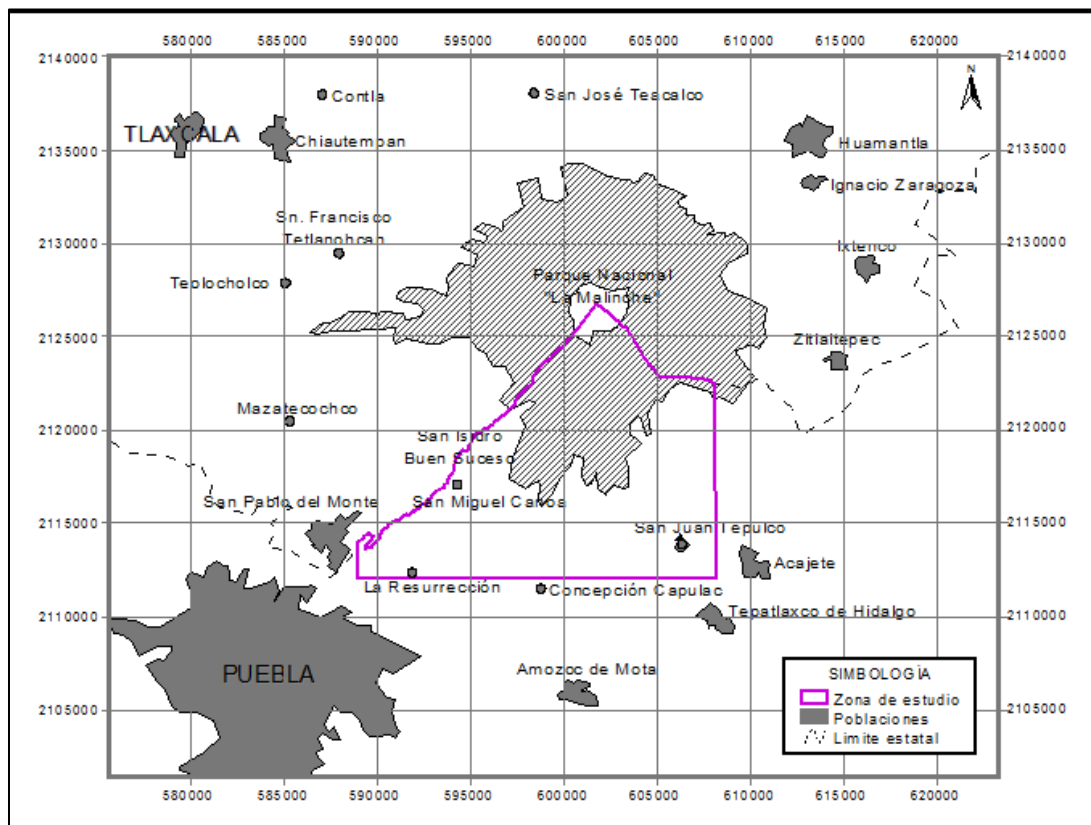


Figura 5. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Tomado de Llaguno, 2007.

4.2 Geología

INEGI (1986) reporta que la Malinche se considera como una de las primeras montañas que conformaron la cordillera neovolcánica cuyo proceso de formación inició a mediados del periodo terciario, aproximadamente, unos 35 millones de años.

La Montaña Malinche es de origen poligenético (formada por varios eventos eruptivos), su formación data del Mioceno. Aunque se ha considerado la Malinche como un volcán extinto presentó una erupción en el 8000 A.C. y debido a que se han reportado otros volcanes que han hecho erupción después de un largo tiempo de inactividad, se identifica este volcán como potencialmente activo y en reposo en la actualidad (Castro, 2007).

4.3 Edafología

Los suelos existentes en el volcán se originaron a partir de las erupciones efectuadas por los cráteres satélites durante el Pleistoceno y Holoceno, que aportaron el material para la actual formación de la capa edáfica superior. Los suelos de La Malinche derivan de cenizas volcánicas y se consideran de origen reciente. Los suelos predominantes, según la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación que se distribuyen en el Parque Nacional La Montaña Malinche o Mantlacueyatl son, el Regosol, seguido de Fluvisol, el Cambisol y ocupando una menor extensión se encuentran el Litosol, Feozem y Luvisol (Figura 6) (SEMARNAT, 2013).

4.4 Hidrología

El PNM o Mantlacueyatl forma parte de la cuenca del río Atoyac (región hidrológica del Río Balsas) y cuenca cerrada del río Guadalupe (región hidrológica del Río Papaloapan) (SEMARNAT, 2013). Aporta volúmenes considerables a las aguas subterráneas y de afloramiento, de la presa Manuel Ávila Camacho (Hommer, 2002). Las condiciones del suelo y subsuelo y las fuertes pendientes dan lugar a un drenaje muy rápido, no existen corrientes de agua permanente, únicamente se registran corrientes principalmente intermitentes de fuertes pendientes y corto recorrido.

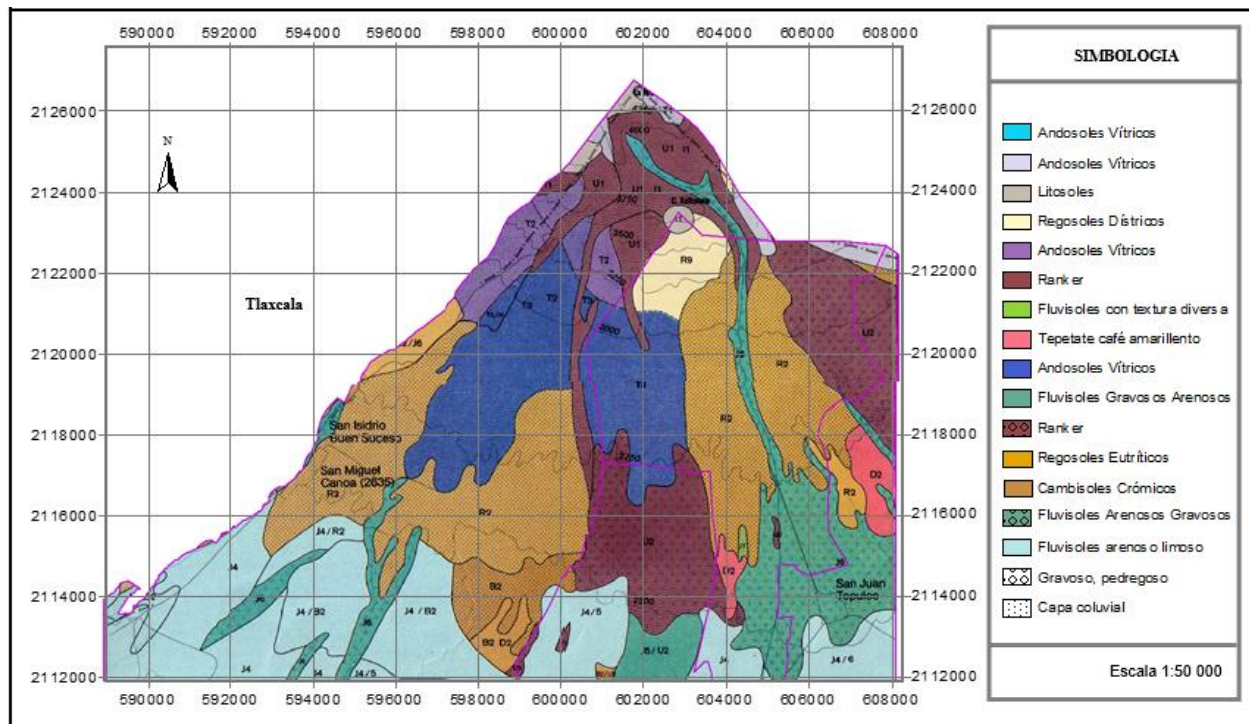


Figura 6. Suelos predominantes en el Parque Nacional La Malinche, Estado de Puebla. Tomado de Werner et al 1976

4.5 Clima

Según la clasificación climática propuesta por García (2004) los tipos de clima presentes en el PNM son:

C(w₁)(w): clima templado subhúmedo con lluvias en verano; temperatura media anual entre 11 y 17°C, temperatura del mes más frío entre 3 y 18°C. Porcentaje de precipitación invernal con respecto a la anual menor de cinco. Se presenta en la parte meridional de la región. Se presenta entre los 2 mil y los 2 mil 500 metros sobre el nivel del mar.

C(e)(w₂)(w): clima semifrío con y subhúmedo con lluvias en verano; temperatura media anual entre cinco y 12°C; temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C; precipitación del mes más seco menor de 40 milímetros; porcentaje de precipitación invernal con respecto a la anual menor de cinco. Se presenta en las faldas superiores del PNM y de la Sierra Nevada.

E(T)(H): clima frío temperatura media del mes más caliente menor de 6.5°C, temperatura media anual entre 2 y 5°C, temperatura del mes más frío menor de 0°C. Se presenta en la cumbre de la Malinche y de La Sierra Nevada.

4.6 Biodiversidad

Se han registrado en el PNM un total de 919 especies repartidas entre Myxomycetes (129), Hongos macroscópicos (217), Plantas (404), Anfibios (5), Reptiles (14), Aves (112) y Mamíferos (38). Se considera que los tipos de vegetación encontrados dentro de la poligonal y el área de influencia de la montaña son: Bosque de pino (24.92%), Bosque de oyamel-pino (4.46%), Bosque de encino (3.41%), y las asociaciones de pino-encino (1.36%), Bosque encino-pino (0.17%), Bosque pino-oyamel (5.38%), así como pastizal natural (5.38%), páramo de altura (1.66%) y agricultura de temporal (53.27%) (SEMARNAT, 2013).

4.7 Aspectos socio económicos

En la parte correspondiente al estado de Puebla del PNM habitan 37mil 451 personas que corresponden al 30.9 por ciento, de estas, 6mil 529 (5.3%) realizan actividades en el sector primario, 17mil 456 habitantes (14.4%) en el sector secundario y 12mil 378 personas (10.2%) en el sector terciario. (SEMARNAT, 2013).

SEMARNAT (2013) reporta que las personas ocupadas, principalmente, en la industria manufacturera y de la construcción habitan las áreas de influencia del PNM debido a la demanda de sus servicios tanto en las grandes ciudades como en los corredores industriales regionales.

4.7.1 Demografía

El PNM, corresponde con 16 municipios, de los cuales, 12 son del estado de Tlaxcala, y cuatro de Puebla; 58 localidades con una población total de 43mil 827 habitantes (SEMARNAT, 2013). Las comunidades asentadas dentro del ANP pertenecen o al grupo étnico otomí, ubicados en la parte este de la montaña, o al grupo étnico nahua, ubicado en la parte oeste. En particular, las comunidades del Estado de Puebla y pertenecientes al municipio de Amozoc de Mota son San Miguel Canoa, San Miguel Espejo y Capulac, por el lado este la comunidad de San Juan Tepulco, perteneciente al Municipio de Acajete (SEMARNAT, 2013). En la mayoría de estas comunidades

la población es bilingüe (otomí-español y náhuatl-español) y menos del 4.5% es monolingüe (otomí o náhuatl) (SEMARNAT, 2013).

4.7.2 Actividad agrícola

En el PNM se realizan siembras en condiciones de temporal y en tierras de baja productividad. Los cultivos principales son el maíz (*Zea mays*), ocupando una superficie de 31 mil 214 hectáreas, seguido por el frijol (*Phaseolus vulgaris*), con más de 3 mil hectáreas cultivadas, el trigo y habas con 575 toneladas y 120 toneladas de producción reportadas para el año 1998-99 (SEMARNAT, 2013).

4.7.3 Ganadería

En el PNM se desarrolla ganadería caprina, bovina, ovina, porcina y avícola de forma extensiva, principalmente, en la zona de influencia que genera deterioro en los boques, en especial, los ganados caprino, bovino y ovino (SEMARNAT, 2013, p.48).

Capítulo V

Materiales y métodos

5.1 Tipo de Investigación

La investigación científica es un proceso sistemático, estructurado, crítico, empíricos u objetivo que se aplican al estudio de un fenómeno para obtener información verídica y relevante que permita realizar un tratamiento adecuado del fenómeno en sí (Carrasco, 2006). Está encaminada a profundizar el conocimiento de un proceso ya sea teórico, práctico o teórico-práctico (Cortés e Iglesias, 2004).

Hernández y colaboradores (2014) proponen como elementos importantes a tener en cuenta en una investigación científica el enfoque, el alcance y el diseño, donde, el enfoque de la investigación hace referencia al paradigma o alternativa metodológica, clasificadas, en gran medida, desde hace aproximadamente un siglo, por las diversas corrientes de pensamiento y marcos de interpretaciones polarizaron en los enfoques cuantitativo y cualitativo.

De igual manera, Hernández y colaboradores (2014) plantean los alcances de investigación exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo: la investigación exploratoria se desarrolla cuando se pretende investigar un tema poco estudiado o se indaga desde una nueva perspectiva; la investigación descriptiva busca comprender cómo son y cómo se originan; por otro lado, el alcance correlacional intenta relacionar características o propiedades del objeto de estudio, mientras que, la investigación explicativa trata de argumentar por qué se presentan los fenómenos.

El diseño de la investigación se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea con el fin de responder al planteamiento del problema, busca responder las preguntas de investigación, cumplir los objetivos del estudio y someter las hipótesis a prueba (Hernández, Fernández & Baptista, 2014). Se encuentran diferentes clasificaciones de los diseños como la investigación experimental y no experimental. En el primer caso se presenta una subdivisión en preexperimentos, experimentos puros y cuasiexperimentos. Esta clasificación tiene en cuenta el grado de control que se tiene sobre las variables. La investigación no experimental se subdivide en diseños transversales y longitudinales. (Carrasco, 2006)

La presente investigación se ubica en el enfoque cuantitativo con alcance tanto exploratorio como correlacional y el diseño de la investigación es cuasi-experimental. A partir de ella se pretende realizar una primera observación sobre la relación existente entre los píxeles de imágenes satelitales y el C% secuestrado en los suelos volcánicos del PNM. Además, no se tiene control sobre las variables a tratar que son el C% y la radiación electromagnética captada por los sensores de la plataforma LandSat 7.

5.2. Diseño de planes de muestreo

Se desarrolló la investigación en tres etapas: la correlación, la calibración y la validación. La correlación requirió la descarga de imágenes satelitales obtenidas mediante la plataforma Landsat 7. Se evaluó el nivel de relación entre los píxeles derivados de las imágenes satelitales y el C% almacenado en los suelos del PNM en los periodos comprendidos antes de 1986, entre 1986 y 2002 al igual que entre 2002 y 2007. Finalmente, se validó el modelo obtenido haciendo uso de la técnica estadística conocida como remuestreo, particularmente el remuestreo por validación simple.

El esquema de la zona de muestreo está dispuesto en la Figura 7. Consta de tres bloques de estudio: los suelos donde la deforestación ocurrió antes de 1986 (MAL), los suelos que fueron deforestados entre 1986 y 2002 (8MAL) y, aquellos suelos que conservaban la vegetación entre 2002 y 2007 (0MAL). En esta área de muestreo fue trazado un grid o rejilla de cuadros de 40 metros de lado, donde a los nodos o puntos se les determinaron sus coordenadas UTM, siendo estos los posibles puntos de muestreo tal como recomiendan Castellanos, Uvalle y Aguilar (2000). El grid permitió escoger los puntos que hicieron intersección con la línea en zigzag que fueran representativos para cada uno de los bloques de estudio. Llaguno (2007) empleó el esquema de muestreo en la investigación titulada “Emisiones del Gas de efecto invernadero dióxido de carbono en los suelos forestales del volcán la Malinche, estado de Puebla.

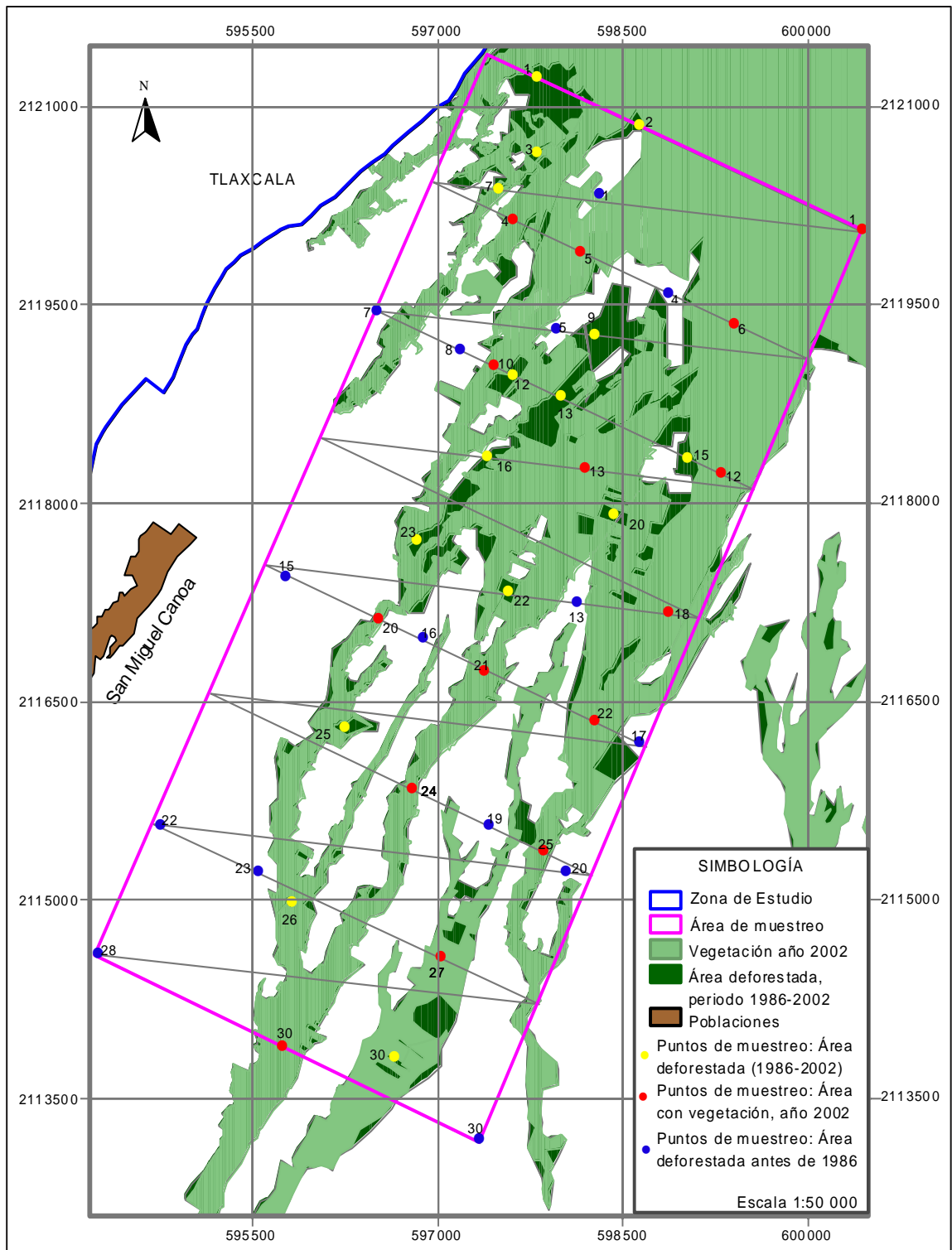


Figura 7. Grid de puntos de muestreo definitivos. Tomado de Llaguno 2007.

5.3 Materiales

Hardware

Se hizo uso de un ordenador Lenovo de G480, sistema operativo de 64 bits, memoria RAM de 4,00 GB, procesador Intel core™ i3-3120 y CPU de 2,50GHz.y disco duro de 1TB

Software

Los programas de cómputo usados fueron Microsoft Office Word 2013, Microsoft Office Excel 2013, R Commander versión 4.02, ArcGis 10.2.2.

Imágenes satelitales

Imágenes satelitales Landsat 7 tomadas del banco de imágenes del servidor *Earth Science Data Interface* perteneciente al United States Geological Service, USGS, con resolución espacial de 30 x30 metros el 23 de mayo de 2018 para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7.

5.4 Técnicas

5.4.1 Medición de imagen con Pixeles

Las imágenes satelitales descargadas de la plataforma Landsat 7 correspondientes a las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 para el año 2004 fueron procesadas mediante el software ArcGIS 10.2.2.

5.4.2 Análisis estadísticos

Una vez obtenida la base de datos o matriz de pixeles con el valor de pixel asociado a cada punto de muestreo se aplicaron el ACP y el AFE para evaluar una reducción al número de variables. Acto seguido, se compararon de resultados de acuerdo a los criterios de cada modelo, para finalmente plantear un modelo de regresión lineal.

Los análisis estadísticos se realizaron con el lenguaje de programación R y su complemento R Commander. R es un software GNU, General Public License, es decir, de uso libre (Contreras, Molina y Arteaga, 2007).

5.4.3 Validación por remuestreo

El análisis por remuestreo se desarrolló con el software R después de comparar y calibrar las opciones de modelos resultantes. El método de remuestreo implementado es la validación simple. La validación simple consta de dividir el grupo de datos en dos subgrupos. Uno de los grupos se emplea para realizar la estimación el segundo grupo se usa para establecer la capacidad predictiva del modelo (Montgomery, 2006).

Capítulo VI

Resultados y discusión

6.1 Procesamiento de imágenes satelitales

Se obtuvo la matriz de píxeles para el año 2004 para la zona de estudio a partir del procesamiento de imágenes satelitales. La matriz consta de 6 columnas o 7, si se considera la variable de C%, y 44 filas. El conjunto de datos se encuentran consignado en la Tabla 1. Los datos de muestra y C% fueron tomados de la tesis de licenciatura de Llaguno de 2007. Los valores etiquetados como MAL corresponden a la región deforestada antes de 1986, los datos registrados como 8MAL a la región deforestada entre 1986 y 2002 y los datos 0MAL se refieren a los datos correspondientes a la región que conservó la vegetación entre 2002 y 2007

6.2 Técnicas estadísticas de análisis multivariado

Se examinó la matriz de píxeles mediante el ACP como método preliminar de tratamiento estadístico. El ACP se emplea para reducir la dimensionalidad del problema, es decir, reducir el número de variables involucradas. Hay dos criterios de selección del número de variables. Primero tomar las componentes que agrupen más del 70% de la variación total y segundo, considerar el tipo de datos involucrados: estandarizados o no estandarizados. Si los datos son estandarizados, que sus autovalores o valores propios sean mayores a 1. Adicionalmente, de las componentes principales escogidas, seleccionar la variable con mayor valor absoluto, que no haya sido seleccionado previamente (Jolliffe, 1972).

Posteriormente, se aplicó el AFE sobre la matriz de píxeles. Al igual que el ACP, el AFE es un método que busca reducir el número de variables involucradas en un problema estadístico mediante el tratamiento de la matriz de correlaciones o la matriz de covarianzas y la obtención de sus autovalores y autovectores. Con el AFE se busca encontrar grupos de homogéneos de variables a partir de un conjunto numeroso de las mismas. Fundamentalmente lo que se pretende con el AFE es simplificar la información que proporciona una matriz de correlaciones para hacerla más fácil e interpretable (Fuente, 2011).

Tabla 1. Matriz de pixeles para los para los suelos del Parque Nacional La Malinche en el año 2004.

Muestra	Carbono orgánico (%C)	Banda1 (pixel)	Banda 2 (pixel)	Banda 3 (pixel)	Banda 4 (pixel)	Banda 5 (pixel)	Banda 7 (pixel)
8MAL01-1	9,15	58	43	38	52	53	32
8MAL02	4,52	65	57	61	58	93	65
8MAL03	4,34	57	45	41	48	58	35
8MAL07	1,03	60	50	51	58	70	47
8MAL09	2,47	57	44	37	62	61	34
8MAL12	2,79	65	55	60	54	91	71
8MAL13	10,42	63	51	52	52	81	62
8MAL15	4,05	61	49	52	49	73	46
8MAL16-1	1,45	57	44	39	55	55	33
8MAL20	7,08	61	50	57	48	84	55
8MAL22	5,6	65	54	59	48	100	78
8MAL23	4,85	65	53	58	50	90	66
8MAL25	3,36	61	50	55	43	83	59
8MAL26	4,23	73	66	78	56	108	95
0MAL01-1	6,18	55	43	37	69	58	30
0MAL04	0,83	56	42	37	53	53	30
0MAL05	4,11	68	58	66	61	101	73
0MAL06	5,79	57	44	37	66	64	32
0MAL10	3,45	59	46	40	50	57	35
0MAL12	6,35	60	47	42	63	66	40
0MAL13	7,18	56	42	36	43	41	23
0MAL18	4,16	61	46	43	59	65	38
0MAL20	1,94	59	45	43	45	51	32
0MAL21	3,97	63	52	54	59	90	59
0MAL22	0,31	70	62	69	68	107	73
0MAL24	5,05	60	46	41	49	53	31
0MAL25	3,03	60	46	42	55	55	33
0MAL27-1	4,43	63	50	48	60	81	48
0MAL30	3,26	64	52	53	53	79	48
MAL01	2,59	66	59	65	63	96	71
MAL04	2,36	63	53	57	52	88	63
MAL05	4,38	69	56	65	56	85	66
MAL07	1,73	69	61	68	60	99	73
MAL08	1,05	61	51	54	50	82	56
MAL13	5,91	66	58	64	66	106	66
MAL15	1,24	75	72	86	70	120	91
MAL16-1	3,67	73	65	75	61	108	84
MAL17	1,99	65	54	61	52	88	59
MAL19	1,28	65	55	63	54	97	67
MAL20	1,88	65	56	63	55	96	69
MAL22	1,06	73	63	77	52	105	83
MAL23	0,91	74	66	79	61	107	87
MAL28	0,85	80	76	92	59	124	107
MAL30	0,91	68	56	64	49	94	66

6.2.1 Análisis de datos mediante ACP

El ACP para las imágenes de 2004 permitió encontrar que la primera componente principal es suficiente para describir el conjunto de datos puesto que con ella se obtuvo un porcentaje de acumulación de 82,51% de la varianza. El gráfico de sedimentación muestra cómo la primera componente presenta un autovalor de mucha mayor magnitud a los restantes (5.12). La expresión algebraica para la primera y segunda componentes principales expresadas como combinación lineal de las variables involucradas toma la forma (Tabla 2):

$$\begin{cases} CP_1 = 0,437Z_1 + 0,445Z_2 + 0,443Z_3 + 0,172Z_4 + 0,436Z_5 + 0,439Z_7 \\ CP_2 = 0,080Z_1 + 0,0160Z_2 + 0,126Z_3 - 0,978Z_4 + 0,016Z_5 + 0,144Z_7 \end{cases} \quad Ec (1)$$

Donde las variables Z_i son variables diferentes a las originales debido a que han sido estandarizadas.

Tabla 2. Carga de las componentes principales 1 y 2 para las imágenes satelitales del Parque Nacional La Malinche, Puebla, para el año 2004.

Variable	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Comp 1	0,4378647	0,4450456	0,4434037	0,1720410	0,4368579	0,4394896
Comp 2	0,0804743	0,0160522	0,1258687	-0,9780313	0,0159168	0,1436129

Tabla 3. Importancia de componentes en el ACP para las imágenes satelitales para el Parque Nacional La Malinche, Puebla, para el año 2004.

	Componente principal 1	Componente principal 2	Componente principal 3	componente principal 4	componente principal 5	componente principal 6
Desviación estándar	2,226	0,944	0,326	0,321	0,139	0,132
Proporción de varianza	0,825	0,148	0,017	0,014	0,003	0,002
Proporción acumulada	0,825	0,974	0,992	0,995	0,998	1,000

La primera componente principal de la matriz de píxeles explica el 82,5% de la varianza. Las variables que agrupan mayor cantidad de variación corresponden a las bandas 1, 2, 3, 5 y 7. La segunda componente principal explica el 14,8%. Juntas explican hasta el 97,4% de la varianza. En variable que contribuye en gran medida a la variación es la banda 4. Según el criterio de ACP la variable primera componente principal aporta la suficiente información relacionada al conjunto de datos. La confirmación de esta proposición se presenta al evaluar el gráfico de sedimentación de las componentes principales. El gráfico de sedimentación es una figura que muestra el grado de importancia de los valores propios de la matriz de correlaciones. El criterio de selección para este caso explicita la consideración de las componentes principales con valor mayor a 1.

La consideración conjunta de las dos primeras componentes principales logra explicar la información casi el 100% de la varianza del conjunto de datos.

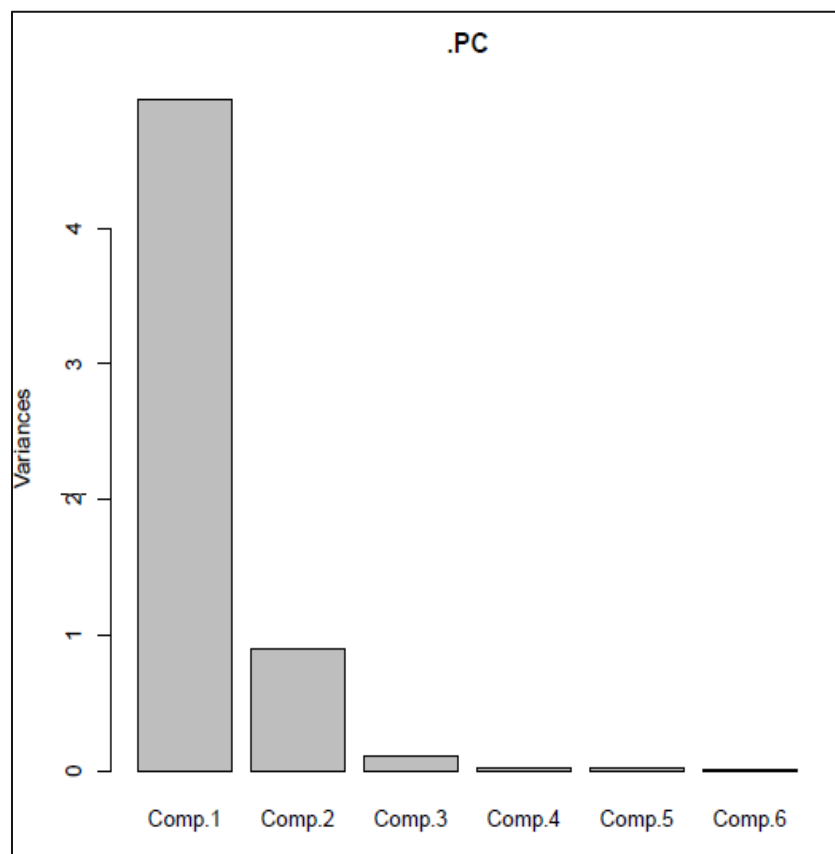


Figura 8. Gráfico de sedimentación para las componentes principales de matriz de píxeles del año 2004

6.2.2. Análisis de datos mediante AFE

R Commander ofrece la posibilidad de calcular hasta dos factores. Los métodos que ofrece para desarrollar la rotación de factores igualmente son dos: el método varimax y el método promax. De igual manera, dispone de dos medios para obtener las puntuaciones factoriales: el método de Barlett y el método de regresión.

En el análisis factorial la suposición básica es que

$$X_i = \sum_{j=1}^m l_{ij}f_j + u_j \quad i = 1, \dots, p \quad \text{Ec (2)}$$

Donde los valores X_i representan las variables objeto de análisis, l_{ij} las comunalidades o cargas factoriales, f_j los factores comunes y u_j los factores únicos o específicos, también conocidos como los errores. En realidad los factores no existen, lo que existe de cada sujeto es la suma de sus respuestas a una serie de ítems o preguntas, una combinación lineal de variables (De la Fuente, 2011, Linares *et al*, 2017).

En las ecuaciones (1) se asume que las p variables aleatorias son independientes entre sí, u_i son independientes entre sí e independientes de los m factores f_j . Usualmente se estandarizan para obligarlas a tener varianza unitaria. Por conveniencia y sin pérdida de generalidad se supone que las medias de las variables son cero (Linares *et al*, 2017).

La aplicación del AFE permite reducir el número de variables a una o dos resultantes de una combinación lineal de las variables originales. Se aplicó el método varimáx para la rotación y el método de Barlett para el cálculo de las puntuaciones factoriales. Los coeficientes de la combinación lineal o saturaciones están consignados en la Tabla 4. En el primer caso se explica un 81,4% de la varianza total y la expresión para el primer factor resultante toma la forma:

$$F_1 = 0,977B_1 + 0,990B_2 + 9,995B_3 + 0,303B_4 + 0,956B_5 + 0,976B_7 \quad \text{Ec (3)}$$

donde las variables B_i para $i=1$ a 5 y 7 representan las bandas de la plataforma Landsat 7. Se aprecia la baja contribución de la banda número 4 correspondiente a la banda del infrarrojo cercano. El infrarrojo cercano permite realizar delineamientos de cuerpos de agua, mapeos

geomorfológicos, mapeos geológicos, evaluar áreas de incendios, evaluar áreas húmedas, agricultura y vegetación.

Al tomar en cuenta dos factores (Tabla 5), el primer factor mantiene el mismo comportamiento. La banda 4 no contribuye significativamente a la explicación de la varianza mientras el aporte de dicho factor explica un 68,7%. En el segundo factor se hace significativo el aporte de las bandas 1, 2, 3 y 4, no obstante, este factor contribuye con un 16,4% a la varianza. En conjunto ambos explican a un 85% de la varianza.

Las expresiones para los factores toman la forma:

$$\begin{cases} F_1 = 0,851B_1 + 0,865B_2 + 0,902B_3 + 0,148B_4 + 0,937B_5 + 0,966B_7 \\ F_2 = 0,488B_1 + 0,496B_2 + 0,412B_3 + 0,449B_4 + 0,259B_5 + 0,247B_7 \end{cases} \quad \text{Ec (4)}$$

Tabla 4. *Aporte de los pesos en el análisis factorial exploratorio para un solo factor.*

Banda	Contribución al factor
1	0,977
2	0,990
3	0,995
4	0,303
5	0,956
7	0,976
Proporción de varianza	0,814

Tabla 5. *Aporte de los pesos en el análisis factorial exploratorio para dos factores.*

Banda	Contribución del factor 1	Contribución del factor 2
1	0,851	0,488
2	0,865	0,496
3	0,902	0,412
4	0,148	0,449
5	0,937	0,259
7	0,966	0,247
Proporción de varianza	0,687	0,164
Varianza acumulada	0,687	0,851

6.3 Regresión lineal

6.3.1 ACP

De acuerdo con los resultados del ACP y AFE es posible modelar el C% almacenado en los suelos del PNM, Puebla, hasta el año 2004 en función de componentes principales y de factores, por medio de la evaluación de cuatro modelos. Dos modelos lineales univariados y dos modelos lineales bivariados.

La primera componente principal explica el 82,5% de la varianza. Un análisis de regresión lineal simple de la forma $y = \beta_0 + \beta_1 x$ bajo las hipótesis nulas (H_0) y alternativas (H_1) de los parámetros de este modelo:

$$\begin{cases} H_0: \beta_0 = 0 \\ H_1: \beta_0 \neq 0 \end{cases} \text{ y } \begin{cases} H_0: \beta_1 = 0 \\ H_1: \beta_1 \neq 0 \end{cases} \quad \text{Ec (5)}$$

El diagrama de dispersión manifiesta el comportamiento asociado a las variables de C% almacenado en los suelos y la primera componente principal. Se observa la tendencia decreciente de la relación y la marcada dispersión de puntos. La elipse de concentración indica la existencia de 6 puntos extremos que se alejan del comportamiento de los datos (datos 1, 7, 16, 21, 36, 43),

además, marca la existencia de correlación negativa entre el C% almacenado por suelos del PNM y la primera componente principal.

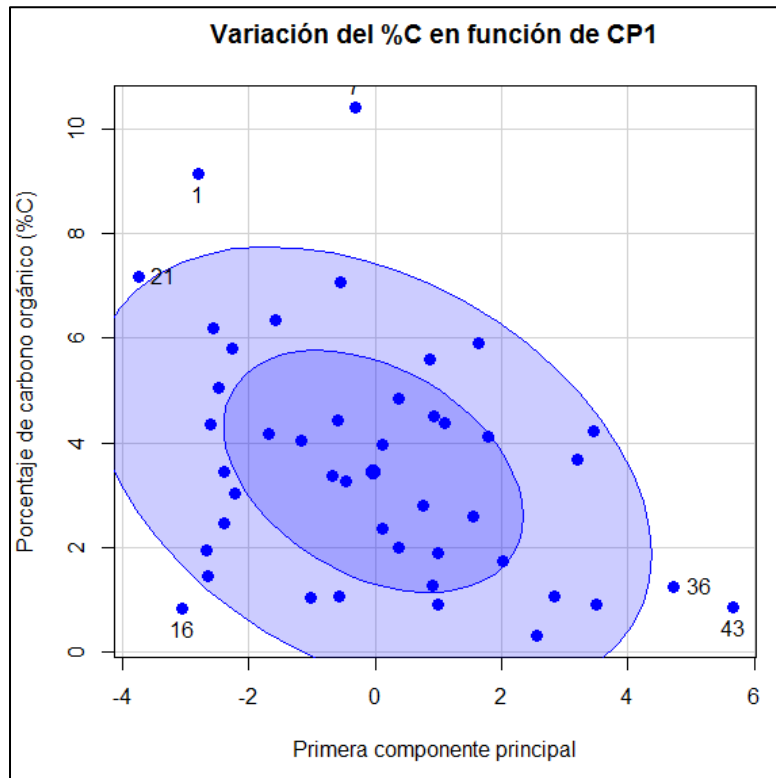


Figura 9. Variación del porcentaje de carbono orgánico en función de la primera componente principal.

El resumen de resultados de la regresión lineal simple (Tabla 6) suministra los parámetros de una función lineal decreciente. Los p valores menores a 0,05 permiten descartar las hipótesis nulas. $R^2=0,1368$ expresa que el 13,68% de la variabilidad del C% almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 puede ser expresado por la primera componente principal (Tabla 6). La ecuación de la recta toma la forma.

$$\%C = 3.5725 - 0.3804 * PC_1 \quad \text{Ec (6)}$$

Tabla 6. Regresión lineal simple para matriz de pixeles de imágenes satelitales obtenidas en 2004.

Coefficientes	Estimación	Error estándar	valor de t	Pr (> t)
Intercepto	3,5725	0,3283	10,88	8,46*10 ⁻¹⁴
PC₁	-0,3804	0,1475	-2,58	0,0135
R²	0,1368			

El modelo lineal bivariado tomando en cuenta las primeras dos componentes principales explica un 97,4% de la varianza. El diagrama de dispersión 3D de la Figura concentra un gran número de datos en el centro. Las hipótesis en consideración son:

$$\begin{cases} H_0: \beta_0 = 0 \\ H_1: \beta_0 \neq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} H_0: \beta_1 = 0 \\ H_1: \beta_1 \neq 0 \end{cases} \quad y \quad \begin{cases} H_0: \beta_2 = 0 \\ H_1: \beta_2 \neq 0 \end{cases} \quad \text{Ec (7)}$$

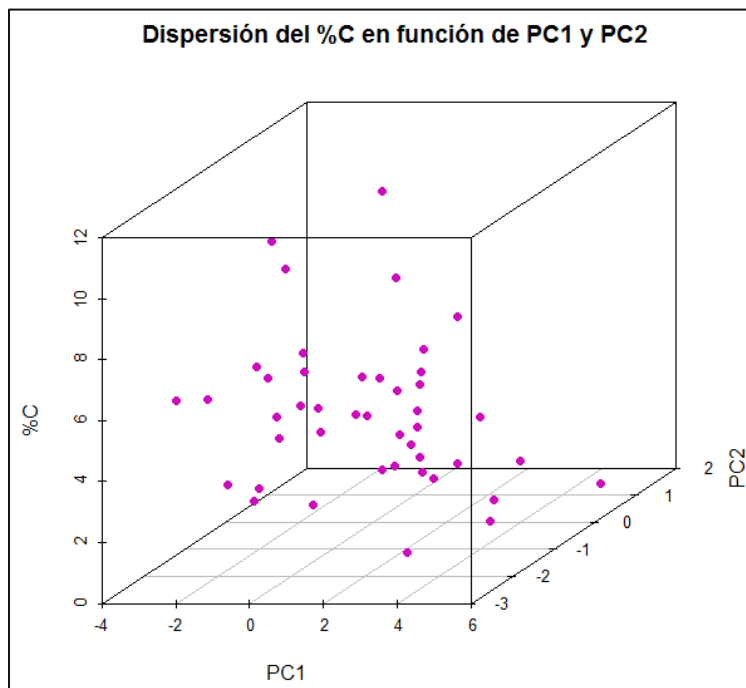


Figura 10. Variación del porcentaje de carbono orgánico en función de la primera y segunda componentes principales.

La regresión lineal generalizada tomando en consideración las primeras dos componentes principales marca la relación inversa entre ambas componentes y el C%. Los p valores para el intercepto y la primera componente principal descartan las hipótesis nulas. Caso contrario sucede con la segunda componente principal que toma el valor de 0,8778 que es mayor a 0,05. El coeficiente de la segunda componente principal puede ser cero. La variabilidad del C% almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 por la primera y segunda componente principales es de 16,73%. No hay una diferencia significativa entre la variabilidad explicada al considerar una sola componente principal o dos (Tabla 7). La ecuación resultante de la regresión lineal múltiple toma la forma:

$$\%C = 3.5725 - 3,3804 * PC_1 - 0,05442 * PC_2 \quad \text{Ec (8)}$$

Tabla 7. Regresión lineal múltiple entre el porcentaje de carbono orgánico y las componentes principales 1 y 2.

Coefficientes	Estimación	Error estándar	valor de t	Pr (> t)
Intercepto	3,57250	0,33216	10,88	8,46*10 ⁻¹³
PC₁	-0,38041	0,14921	-2,549	0,0146
PC₂	-0,05442	0,35171	-0,155	0,8778
R²	0.1673			

6.3.2 AFE

La Figura muestra la distribución de puntos entre el C% y el primer factor. Se observa amplia dispersión de los datos, así como, un comportamiento decreciente. El elipsoide de concentración deja por fuera 5 valores extremos y marca la existencia de correlación entre las variables. Para resolver los contrastes de hipótesis:

$$\begin{cases} H_0: \beta_0 = 0 \\ H_1: \beta_0 \neq 0 \end{cases} \text{ y } \begin{cases} H_0: \beta_1 = 0 \\ H_1: \beta_1 \neq 0 \end{cases} \quad \text{Ec (9)}$$

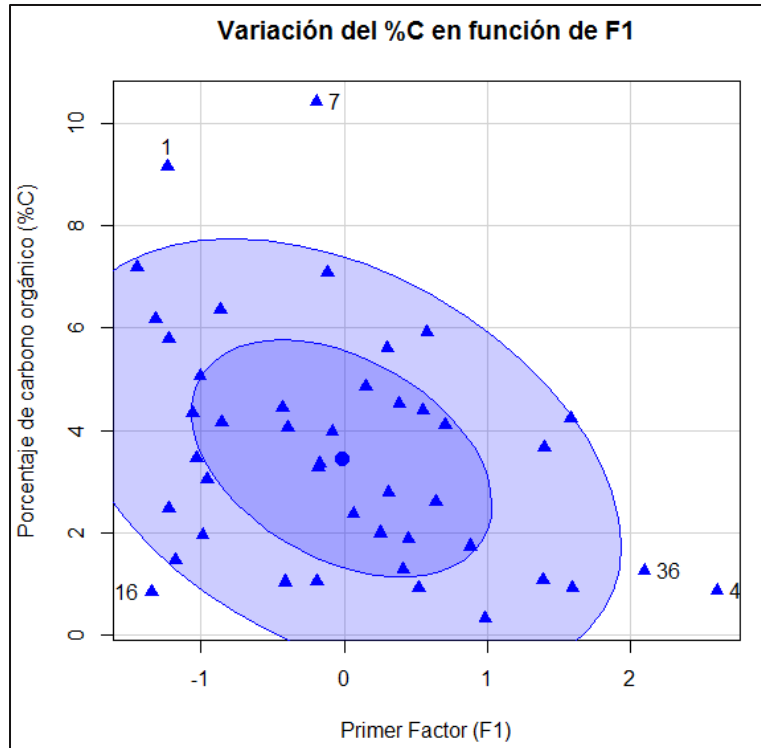


Figura 11. Variación del porcentaje de carbono orgánico en función del primer factor

Las variables están inversamente relacionadas. Los p valores indican que las hipótesis nulas se rechazan y los valores del intercepto y la pendiente no son cero. Para este caso en particular, la variabilidad del $C\%$ almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 explicado por el primer factor es de 15,11%. La ecuación resultante de la regresión lineal simple toma la forma:

$$\%C = 3.5725 - 0.5439 * F_1 \quad \text{Ec (10)}$$

Tabla 8. Regresión lineal simple entre el porcentaje de carbono orgánico y el primer factor 1.

Coefficientes	Estimación	Error estándar	valor de t	Pr (> t)
Intercepto	3,5725	0,3255	10,974	$6,51 * 10^{-14}$
F₁	-0,5439	0,3285	-2,734	0,00911
R²	0,1511			

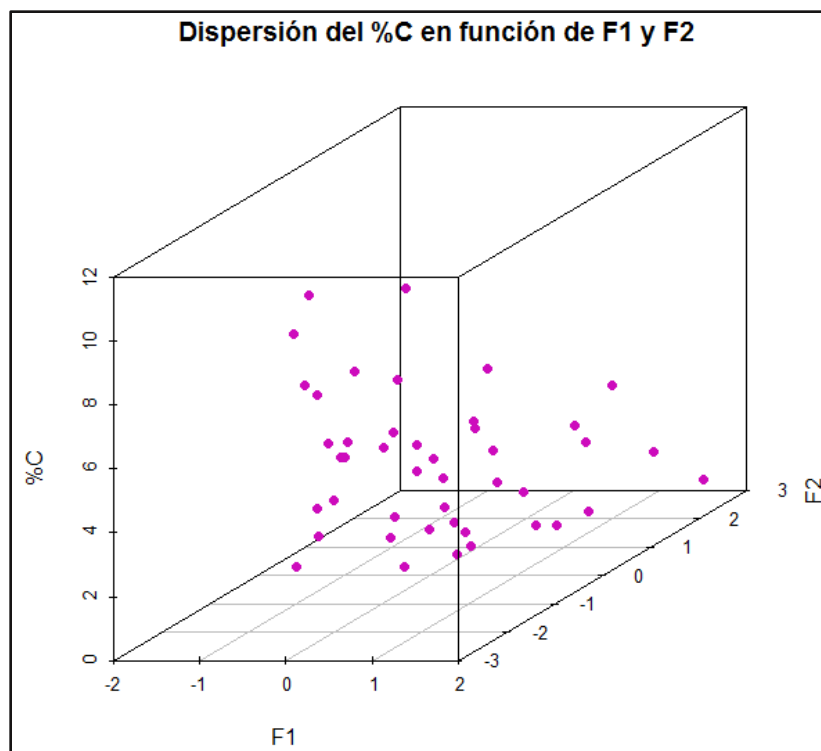


Figura 12. Variación del porcentaje de carbono orgánico en función de los factores 1 y 2.

Los coeficientes indican la existencia de una relación inversa entre el C% por los suelos del PNM hasta el año 2007, los p valores para el intercepto y los coeficientes de las variables son menores a 0,05 por lo cual se rechazan las hipótesis nulas. Los factores explican el 19,77% de la variabilidad del C% en relación con los factores 1 y 2. La ecuación resultante del modelo toma la forma:

$$\%C = 3,5725 - 0,5787 * F_1 - 0,8296 * F_2 \quad \text{Ec (11)}$$

Tabla 9. Regresión lineal simple entre el porcentaje de carbono orgánico y los factores 1 y 2.

Coefficientes	Estimación	Error estándar	valor de t	Pr (> t)
Intercepto	3,57250	0,3203	11,153	5,42 E-14
F₁	-0,5787	0,3211	-1,802	0,0789
F₂	-0,8296	0,3085	-2,689	0,0103
R²			0,1977	

6.4 Comparación de regresiones lineales

Los modelos establecidos con el ACP el porcentaje de carbono almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 explican mayor cantidad de la varianza que los modelos establecidos por AFE. La diferencia en la explicación de la varianza no es significativa entre los modelos univariados. Si hay una diferencia considerable entre los modelos bivariados, pero siempre siendo superior el porcentaje de varianza explicada por el ACP. La bondad del ajuste manifiesto por los modelos de AFE expresan e indican mayor variabilidad que los expresados por ACP.

Tabla 10. *Resumen de características de las regresiones lineales con ACP y AFE.*

	ACP		AFE	
	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
Proporción de la varianza (%)	82,50	97,40	81,40	85,10
R²	0,1368	0,1673	0,1511	0,1977

Los coeficientes de determinación para todos los posibles modelos no superan el 20%. La primera componente principal explica menos del 20% de la variación del C% de los suelos del PNM hasta el año 2004 en los cuatro posibles modelos estudiados. La variable primera componente principal no explica de manera significativa la variación del C% de los suelos del PNM hasta el año 2004 conforme a los parámetros establecidos por la investigación.

La resolución espacial de las imágenes de la plataforma Landsat 7 es de 30m para las bandas 1, 2, 3,4, 5 y 7 que representan un área de 900m² en tierra. Cada sensor de la plataforma Landsat registra la energía promedio reflejada en un área de este tamaño sin tener en cuenta la distribución de vegetación, suelo, cuerpos de agua y cualquier otro componente del ecosistema.

Llaguno (2007) evaluó el contenido de carbono orgánico para los suelos del PNM en Puebla considerando regiones con deforestación antes de 1986 (etiquetados como MAL), regiones deforestadas entre 1986 y 2002 (etiquetados como 8MAL) y regiones que conservaron su vegetación entre 2002 y 2007 (rotulados como 0MAL). El resultado hallado fue que los porcentajes de materia orgánica y de carbono orgánico del suelo no presentaban diferencias significativas para los suelos con cubierta forestal y aquellos que fueron deforestados entre 1986 y 2002.

Los valores de C% almacenado por los suelos del PNM en el estado de Puebla van desde 0,31 hasta 10,32. No representan un conjunto homogéneo de datos porque las zonas estudiadas no fueron homogéneas, es decir, las áreas evaluadas al interior del PNM, Puebla, tuvieron un manejo diferente tanto del suelo como de la vegetación como causa del aumento de la población por la migración después del sismo del 19 de septiembre de 1985.

6.5 Modelo Geomático

El modelo se plantea con la ecuación de regresión lineal establecida con la primera componente principal. Aporta una explicación a la variabilidad del C% almacenado por los suelos del PNM de 13,68% en términos de la primera componente principal. Este valor indica que la mayor variabilidad del C% no es explicada por el modelo de regresión lineal. Según criterios de ACP la primera componente principal explica 82,50% de la varianza de la matriz de píxeles indicando que es suficiente para reducir la dimensionalidad de la matriz de píxeles.

La expresión algebraica para la relación lineal toma la forma:

$$\%C = 3,5725 - 0,3804 * PC_1$$

Los intervalos de confianza para el término independiente y para la pendiente calculados con un nivel de confianza del 95% son

$$\begin{cases} 3,0203 < \beta_0 = 3,5725 < 4,1246 \\ -0,6284 < \beta_1 = 0,3804 < -0,1323 \end{cases} \quad \text{Ec (12)}$$

La calibración del modelo involucra los valores máximo y mínimo de la variable primera componente principal asociada al conjunto de datos, además, del conocimiento de los contenidos de carbono orgánico para suelos volcánicos. Se hace uso de la clasificación del contenido de materia orgánica propuesto por Fassbender y Bornemisza en 1994, dispuestos en la Tabla 11, para obtener los intervalos de la variable independiente donde se hace presencia de algún tipo específico de contenido de materia orgánica.

Tabla 11. *Clasificación de los contenidos de carbono orgánico de los suelos derivados de cenizas volcánicas (Fassbender & Bornemisza, 1994, p.50).*

Clase	% Carbono orgánico
Muy pobre	<1.2
Pobre	1.2-2.9
Medio	2.9-4.6
Rico	4.6-8.7
Muy rico	>8.7

El cálculo para los valores de la variable independiente permite establecer el siguiente rango de funcionamiento con sus intervalos y categorías:

$$\begin{cases} -3,7439 < PC_1 < -2,7011 & Rico \\ -2,7011 < PC_1 < 1,7678 & Medio \\ 1,7678 < PC_1 < 5.6529 & Pobre \end{cases}$$

La Figura 13 expresa gráficamente la situación. Sobre la línea de regresión, en color rojo, se dispone el rango de pobre contenido de carbono mediante una flecha. El rango medio está coloreado por una flecha color azul y el rango rico por una flecha color verde.

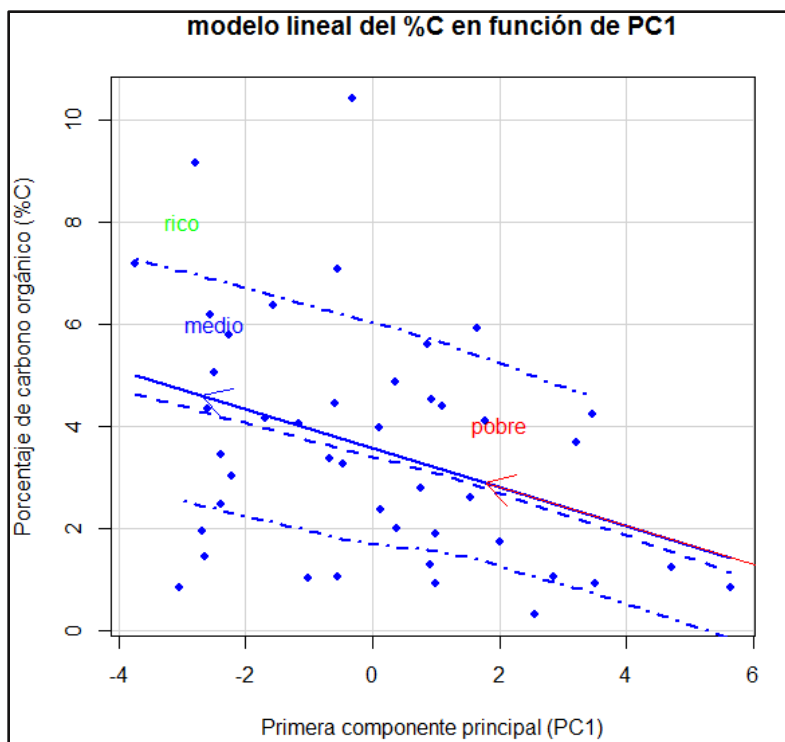


Figura 13. Calibración del modelo del porcentaje de carbono orgánico almacenado por los suelos del Parque Nacional La Malinche hasta el 2004 en relación con la primera componente principal.

6.6. Validación

Se aplicó el método de remuestreo. Dos de los métodos más usados de remuestreo son la validación cruzada y el bootstrap. En particular se aplicó el método de validación cruzada. Se dividió el conjunto de datos en dos grupos. Un grupo de 43 individuos conformaron los datos de estimación y otro, formado por un individuo, el grupo de predicción que se rotó aleatoriamente hasta completar el conjunto de datos. Después de realizar el remuestreo por 43 veces se expresó el coeficiente de determinación promedio R^2 .

$$R^2_{predicción} = 0.1512$$

Este valor indica que la variable primera componente principal es un pobre predictor para el $C\%$ almacenado por los suelos del PNM hasta 2004. El 15,12% de la variabilidad de nuevos datos (muestras de suelo) del $C\%$ almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 se podría explicar por medio de la variable componente principal 1.

Capítulo VII

Conclusiones

Conclusiones para ACP

- El C% almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 se expresa mediante la primera componente principal con un porcentaje de explicación de la varianza de 82,6% de la información contenida en la matriz de píxeles por medio de la ecuación relación $\%C = 3.5725 - 0.3804 * PC_1$ donde la primera componente principal explica el 13,68% de la variación C%.
- El C% almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 se expresa mediante la primera y segunda componente principal con un porcentaje de explicación de la varianza de 97,4% de la información contenida en la matriz de píxeles mediante la ecuación $\%C = 3.5725 - 0.3804PC_1 - 0.0544PC_2$ la cual explica un 16,73% de la variabilidad del C% en términos de las dos primeras componentes principales.
- El C% almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 se expresa mediante la primera y segunda componente principal con un porcentaje de explicación de la varianza de 97,4% de la información contenida en la matriz de píxeles.
- El C% almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 se expresa mediante la relación $\%C = 3.5725 - 0.3804 * PC_1$ con 13,68% de explicación de la variable dependiente con respecto a la variable primera componente principal.
- El C% almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 se expresa mediante la relación $\%C = 3.5725 - 0.3804PC_1 - 0.0544PC_2$ que explica un 16,73% de variabilidad de la variable dependiente con respecto a las variables primera y segunda componentes principales.

Conclusiones para AFE

- El C% almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 se puede expresar en términos del primer factor explicando un 81,4% de la varianza de la matriz de píxeles por medio de la ecuación $3,5725 - 0,8983 * F_1$ que explica un 15,11% de la variable dependiente en función del primer factor.

- El C% almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004 se puede expresar en términos del primer y segundo factor explicando un 85,1% de la varianza de la información contenida en la matriz de píxeles por medio de la relación $3,5725 - 0,5787F_1 - 0,8296F_2$ explicando un 19,77% de la variable dependiente en términos de las variables factor 1 y factor 2.

Conclusiones adicionales

- El modelo $\%C = 3.5725 - 0.3804 * PC_1$ funciona para un rango entre $[-3,7439, 5,6529]$ en la variable componente principal 1. Comprende tres rangos del contenido de carbono orgánico: $-3,7439 < PC_1 < -2,7011$ para contenido rico en carbono orgánico, $2,7011 < PC_1 < 1,7678$ para contenido medio de carbono orgánico y $1,7678 < PC_1 < 5,6529$ para contenido pobre en carbono orgánico.
- La validación al modelo de regresión lineal $\%C = 3.5725 - 0.3804 * PC_1$ indica que la variable primera componente principal es un pobre predictor en relación a nuevas observaciones debido a que explica el 15,12% de la variabilidad del porcentaje de carbono orgánico almacenado por los suelos del PNM hasta el año 2004.

OBSERVACIONES

Finalizada la presente investigación y teniendo en cuenta los procesos, desarrollo, métodos y herramientas se propone tener en cuenta las siguientes sugerencias:

- El modelo no se puede usar aún con fines prácticos.
- Desarrollar la investigación haciendo uso de imágenes satelitales con un tamaño de pixel menor al dispuesto en la plataforma Landsat 7 correspondiente a 30mx30m. Se recomienda emplear plataformas que permitan captar imágenes con tamaño de pixel 15mx15m o inferior.
- Desarrollar investigaciones similares considerando otros elementos importantes en el estudio del suelo, principalmente, el contenido de nitrógeno y/o la relación carbono/nitrógeno en los suelos de la Malinche.
- Desarrollar el modelo con mediciones del porcentaje carbono recientes en un ecosistema donde los suelos y la vegetación sean más homogéneos.

LITERATURA CITADA

- Alcalá, M., Hidalgo, C., Gutierrez, M. C. (2009). Mineralogía y retención de fosfatos en Andisoles. *Terra Latinoamericana*. 27(4), 275-286.
- Arréola, D. P. Bori, G., Valera, M. A., Torres, E., Linares, G. (2010). Calidad de suelo de los sistemas forestales: cambios en el clima y capacidad de suelo para infiltrar agua. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 26(1), 364.
- Benjamín, J. A., Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Maderas y Bosques*. 7(1), 3-12.
- Binkley, D., Fisher, R. (2013). *Ecology and management of forest soils*. United Kingdom: John Wiley and Sons.
- Billings, W. D., Golley, F., Lange, O. L., Olson, J. S. (1976). *Remote Sensing for environmental sciences*. Berlín, Germany: Springer-Verlag.
- Boldstad, P. (2019). *GIS fundamentals. A first text on Geographical information systems*. Minnesota, United States of America: XanEdu
- Botkin, D., Keller, E. (2011). *Environmental science. Earth as a living planet*. Massachussets, United States of America: John Wiley and sons.
- Brantley, S. L., White, T. S., White, A. F., Sparks, D., Richter, D., Pregitzer, K., Derry, L., Chorover, J., Chadwick, O., April, R., Anderson, S., Amundson, R. (2006). *Frontiers in Exploration of the critical zone: Report of a Workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF), October 24-26, 2005, Newar, DE, 30p.*
- Boersema, J., Reijnder, L. (2009). *Principles of environmental sciences*. Aldershot, United Kingdom: Springer.
- Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista Ciencias Agrícolas*. 33(2), 117-124.

- Burroughs, W. J. (2007). *Climate change. A multidisciplinary approach*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria UNAM*. 8(10), 1-12.
- Cabello, J., Paruelo, J. M. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas*. 17(3), 1-3
- Canadian Center for Remote Sensing. (2020). Fundamentals of Remote Sensing. Recuperado de https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- Carrasco, S. (2006). *Metodología de la investigación científica*. Lima, Perú: Editorial San Marcos.
- Castañeda, D. (2011). Impacto del cambio climático de las comunidades vegetales del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala, México (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Castellanos J. Z., Uvalle, J. X., Aguilar, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Guanajuato, México: Intagri.
- Cortés, M. Iglesias, M. (2004). *Generalidades sobre metodología de la investigación*. Ciudad del Carmen, Campeche, México: Universidad Autónoma del Carmen.
- Cheng, Q. (2010). Assessment of terrain elevation derived from satellite laser altimetry over mountains forest areas using airborne Lidar data. *Journal of photogrammetry and remote sensing*. 65, 111-122.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing. An environmental approach*. Boca ratón, Florida, United States of America: CRC Press.
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. Madrid, España: Ediciones Rialp S. A.
- Cotler, H., & Sotelo, E., & Dominguez, J., & Zorrilla, M., & Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, (83), 5-71.

- Comisión Nacional del Agua. (2005). *Percepción Remota. Fundamentos de Teledetección*. Recuperado de <http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>
- Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] (2018). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe de resultados 2009-2014*. Jalisco, México.
- Contreras, J. M., Molina, E., Arteaga, P. (2007). *Introducción a la programación estadística con R para profesores*. Recuperado de <https://www.ugr.es/~batanero/pages/ARTICULOS/libroR.pdf>
- Cunningham, W. P., Cunningham, M. A. (2010). *Environmental science. A Global Concern*. New York, United States of America: Mc Graw-Hill.
- De la Fuente, S. (2011). *Análisis factorial*. Facultad de ciencias económicas y empresariales. Madrid, España: UAM.
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trexler, M. C., Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*. 263, 185-190.
- Elachi, C., van Zyl, J. (2006). *Introduction to the physics and techniques of remote Sensing*. New Jersey, United States of America: John Wiley and Sons.
- Enger, E., Smith, B. (2010). *Environmental science. A study of interrelations*. New York, United States of America: Mc Graw-Hill.
- Escalante, B. (2001). *Remote sensing applications*. Rijeka, Croatia: Intech.
- Fassbender, H., Bornemisza, E. (1994). *Química de suelos con énfasis en los suelos de América Latina*. San José, Costa Rica: IICA.
- Franklin, S. (2001). *Remote sensing for sustainable forest management*. Florida, United States of America: Lewis publishers.
- Galicia, L., Gamboa, A. M., Cram, S., Vergara, B., Peña, V., Saynes, V., Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica de carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*. 34, 1-29.

- Gallardo, J. (2007). El ciclo del Carbono y la dinámica en los sistemas forestales. En Azolla, J.A., Bogino, S.M., Bravo, F., Bravo-Oviedo, A., Broto, M., Cámara, A...Vallejo, R. *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático* (pp.43-64). Barcelona, España: Fundación Gas Natural.
- Gallardo, J. (2004). El ciclo biogeoquímico (y secuestro) de carbono. *Apuntes de Ciencia y Tecnología*. 10, 40-49.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema climático de Koppen. Ciudad de México, México: UNAM
- Grebner, D. L., Bettinger, P., Siry, J. P. (2013). *Introduction to Forestry and Natural Resources*. San Diego, USA: Elsevier.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2015). Cambio climático 2014. Informe de síntesis. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático* (008). Recuperado de <http://www.ideam.gov.co>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2000). Síntesis geográfica del estado de Puebla. 4 Clima. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222949/702825222949_7.pdf
- Hardy, J. T. (2003). *Climate change. Cause, effects and solutions*. Wiltshire, Great Britain: John Wiley & sons.
- Hernández, J., Tirado, D., Beltrán, R. (2014). *Captura de carbono en los suelos*. Boletín científico de ciencias básicas e ingenierías. Pachuca, Hidalgo: ICBI.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. United States of America: Academic Press.

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2015). *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*. Recuperado de https://www.inecc.gob.mx/dialogos/dialogos1/images/documentos/2015_indc_esp.pdf
- Instituto Nacional de Estadística, geografía e información. (2007). *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II, escala 1:250000*. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx
- Instituto Nacional de estadística, geografía e información. (1986). Síntesis geográfica de Tlaxcala. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220716/702825220716_1.pdf
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2015). *Semana de la Ciencia y la Tecnología. Jornada de puertas abiertas*. Recuperado de <http://inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20Tacuaremb%C3%B3/2015/EI%20Suelo%2020%20de%20mayo.pdf>
- Jandl, R. (2005). Secuestro de carbono en bosques. *Revista Forestal Iberoamericana*. 1(1), 57-62.
- Janzen, H. H. (2004). Carbon cycling in earth systems. A soil science perspective. *Ecosystems and Environment*. 104, 399-417.
- Jaramillo, V. (2004). El ciclo global del carbono. En Martínez, J., Fernández, A. (Ed.), *Cambio climático. Una visión desde México*. (pp.77-85). México D.F., México: SEMARNAT-INE
- Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Medellín, Colombia: UNAL.
- Jolliffe, I. (1972). Discarding variables in a Principal component analysis. II. Real data. *Journal of Royal Statistical Society. Applied statistics*. 22(1), 21-31.
- Lal, R. (2004). Soil carbón sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123, 1-22.
- Lal, R. Sobecki, T. M., Livari, T., Kimble, J. M. (2004). Soil degradation in the United States. Extent, Severity and Trends. Florida, United States of America: CRC Press.

- León, R., Aguilar, A. (1987). Materia Orgánica. En Aguilar, A., Etchevers, J. D., Castellanos, J. Z (Ed.), *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo*. (pp.84-91). México: Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo.
- Licona, E. (2011). Experiencia especial en San Miguel Canoa, Puebla. *Escritos Revista del Centro de Ciencias del Lenguaje*. 44(2011), 107-134.
- Linares, G., Valera, M. A. García, A. B. (2007). Enfoques frecuentista y bayesiano en la determinación del carbono orgánico en suelos. *Rev Mex de Agro*. 3(3), 111-120.
- Linares, G., Tenorio, M. G., Torres, E., Oroza, A. (2017). Estimación del carbono orgánico en suelos por teledetección y modelos de regresión. *Revista Latinoamericana el ambiente y las ciencias*. 8(18), 26-40.
- Llaguno, J. (2007). *Emisiones del gas efecto invernadero “dióxido de carbono” en los suelos forestales del volcán la Malinche, Estado de Puebla* (Tesis de licenciatura). Benemérita Univesidad Autónoma de Puebla, Puebla.
- Lorenz, K., Lal, R. (2010). *Carbon sequestration in forest ecosystems*. New York, Unites States of America: Springer.
- Marín, M., Silva, V., Linares, G., Ticante, J., López, M. (2007). Patrones espaciales de hongos ectomicorrizicos del Parque Nacional Malinzi en Puebla y la preservación de su micelio. Recuperado de <https://studylib.es/doc/7677672/preservacin-del-micelio-de-los-hongos-ectomicorrzicos--re...>
- Martinez, E. (1992). Recursos naturales, biodiversidad, conservación y uso sustentable. *Botánica y Fitosociología*. (1), 11-18.
- Martinez, J., Martín, M. P. (2010). Guía didáctica de teledetección y medio ambiente. Red nacional de teledetección ambiental. Recuperado de http://www.aet.org.es/files/guia_teledeteccion_medio-ambiente_pliego.pdf
- Mc Daniel, P. A., Lowe, D. J., Arnalds, O., Ping, C. L. (2012). Andisols. En Huang, P. M., Li, Y., Sumner, M. E. (Eds.) *Handbook of Soil Sciences*. (pp. 33.29-33.48). Boca Raton, FL: CRC Press (Taylor & Francis).

- Monreal, C. M., Etchevers, J. D., Acosta, M., Hidalgo, C., Padilla, J., López, R.M., Jimenez, L., Velasquez, A. (2005). A method for measuring above and below ground C stocks in hillside landscapes. *Canadian Journal of Soil Science*. 85, 523-530.
- Montgomery, D., Peck, E., Vining, G. (2006). *Introducción al análisis de regresión de regresión*. México D.F. México. Compañía editorial continental.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2002). Captura de Carbono para un mejor en los suelos para un mejor manejo de la Tierra. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>
- Ortiz, R. (2015). Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología. *Revista Eubacteria*. 34, 51-64.
- Paruelo, J. (2008) La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*. 17(3), 4-22.
- Pérez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo, P. F., Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico del suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 19(1), 157-173.
- Pérez, C., Muñoz, A. L. (2006). *Teledetección. Nociones y aplicaciones*. España: Universidad de Salamanca.
- Pittock, A. B. (2009). *Climate change. The science, impacts and solutions*. Collingwood, Australia: Csiro Publishing.
- Porta, J., López, M., Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Quintana, F. (2016). Dinámica, escalas y dimensiones del cambio climático. *Revista de Ciencias Sociales. BUAP*. 10(41), 180-200.
- Rackley, S. (2010). *Carbon capture and storage*. Elsevier. Burlington, MA USA.
- Rodeghiero, M., Heinemeyer, A., Bellamy, P. (2010). Determination of Soil carbón stocks and changes. En Kutsch, W., Bahn, L., Heinemyer, M. A. (Eds.) *Soil Carbon Dynamics. An Integrated Metodology*. (pp. 49-75). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Rodriguez, A., Arbelo, C. D., Notario, J. S., Mora, J. L., Guerra, J. A., Armas, C. M. (2004). Contenido y formas de carbono orgánico en andisoles forestales: Aproximación a su dinámica. *Edafología*. 11(1), 67-102.
- Ruíz, J., Gómez, G. (2010). Estudio mastofaunístico del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala, México. *Therya*. 1(2), 97-110.
- Sacristán, F. (2006). La teledetección satelital y los sistemas de protección satelital. *Rev Aquatic*. 24(2006), 13-41.
- Sánchez, L., Reyes, O. (2015). Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe. Una revisión general. CEPAL. Santiago de Chile, Chile.
- Sánchez Espinosa, J., & Rubiano Sanabria, Y. (2015). Procesos específicos de formación en Andisoles, Alfisoles y Ultisoles en Colombia. *Revista EIA*, 12 (2), 85-97.
- Sánchez, M., Prager, M., Naranjo, R., Sanclemente, O. (2012). El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. *Agroecología*. 7(1), 19-34.
- Scott, N. A., Tate, K. R., Giltrap, D. J., Smith, C., Wilde, R. H., Newsome, P. F. J., Davis, M. R. (2002). Monitoring land-use change effects on soil carbon in New Zeland: Quantifying baseline soil carbon stocks. *Environmental Pollution*. 116, S167-S186.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2014). Inventario estatal forestal. Puebla. 2013.SEMARNAT-CONAFOR, México D.F., México.
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy, a basic system of soil classification form making and interpreting soil surveys*. Washington, USA: Soil Conservation Service.
- Tillery, B., Enger, E., Rose, F. (2013). *Integrated Sciences*. New York, Unites States of America.
- Tillery, B., Enger, E., Ross, F. (2001). *Integrated science*. United States of America: Mc Graw Hill Higher Education.
- Trujillo, J. M., Mahecha, J. D., Torres, M. A. (2018). El recurso suelo. un análisis de sus funciones, capacidad de uso e indicadores de calidad. *Rev de Investigación Agraria y Ambiental*. 9(2), 30-37.

- Tsai, C. C., Chen, Z. S., Kao, C. I., Ottner, F., Kao, S. J., Zehetner, F. (2010). Pedogenic development of volcanic ash soils along a climosequence in Northern Taiwan. Contents list available. *Geoderma*. (83), 127-181.
- Ussiri, D., Lal, R. (2017). *Carbon sequestration for climate change, mitigation and adaptation*. Springer International Publishing. Gewerbestrasse, Switzerland.
- Valera, M. A., Llaguno, J., Linares, G., Torres, E. (2009). Evaluación del secuestro de carbono en suelos de la Malinche, estado de Puebla. *Saberes compartidos*.3, 14-20.
- Valera, M. A., Ríos, A., Coyotl, A., Linares, G., Tenorio, M. G., Sampedro, M. L. (2015). El suelo como almacén de carbono: criterios para calidad de carbono secuestrado en suelos. *Revista latinoamericana el ambiente y las ciencias*. 6(11), 44-55.
- Vela, G., Vasques, B., Rodrigues M. L., Dominguez, I. V. (2007). Caracterización edáfica de sitios con regeneración natural de *Pinus Moctezumae* Lamb. En el volcán la Malinche, México. *Agrociencia*. 41(4), 371-383.
- Wang, G., Weng, Q. (2014). *Remote Sensing of Natural Resources*. Boca Raton. USA: CRC Press.
- Werner, G., Mielich, G., Aeppli, H. (1976). Mapa de suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores. Instituto de edafología y conservación de suelos Universidad Justus Liebig de Giessen. República Federal de Alemania.
- Weng, Q. (2010). *Remote Sensing and GIS integration. Theories, methods and applications*. New York, United States of America: Mc Graw Hill.
- Wilding, L. P. (2000). Classification of Soil. En Sumner, M. E. (Ed.) *Handbook of Soil Science*. (pp. 175-183). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Wong, J., Villers, M. (2006). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones científicas*. 62(2007), 87-103.
- Zambrano, A., Franquis, F., Infante, A. (2004). Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales. *Rev. For. Lat.* 35, 11-20.
- Zinck, A. (2005). Suelos información y sociedad. *Gaceta Ecológica*. 76, 7-22.