Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

"DINÁMICA DEL CARBONO EN SUELOS DE UN ECOSISTEMA FORESTAL FRAGMENTADO Y EVALUACIÓN DE INDICADORES AMBIENTALES DE CAMBIO"

TESIS

Para obtener el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

ESMERALDA NAVA GUEVARA

Director de Tesis:

Dr. José Adrián Saldaña Munive

Puebla, Pue.

ABRIL 2022

A mi familia nuclear, mi Amor incondicional. Quienes son reflejo del Amor de Dios.

A quienes se fueron al encuentro de Dios confiando en que lograría mis metas: mis abuelos Blandina, Héctor y Juan, mi tío Edi guerrero y mi amado Juanito Guevara.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, mi Amor, por acompañar mi camino, por ser mi luz y mi guía. Por estar siempre conmigo.

A Juanito Guevara que durante mis años de estudiante me regaló su confianza y su amor de padre.

A mis amados padres Blanca y José, quienes siempre estuvieron al pendiente de mí y me acompañan con sus oraciones.

A mis hermanitos Rubí y Héctor, en quienes siempre encontré una fuente de diversión y desestrés.

A quienes me adoptaron para ser su amiga y compañera de aventuras, que me llenaron de alegría, motivación y que siempre creyeron en mi trabajo: Janeth, Alejandra, Brenda, Ara y Juan Pablo.

A mi asesor de tesis, el Dr. Adrián Saldaña, quien siempre creyó en mí y me apoyó incondicionalmente.

A mis queridos compañeros de laboratorio que estuvieron dispuestos a ayudarme en todos mis experimentos.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

Planteamiento del Problema 2

Justificación 4

Objetivos 5

Hipótesis 5

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO 6

I.1 El ciclo del carbono 6

I.2 El suelo, la fuente y sumidero de carbono 7

I.3 Materia orgánica del suelo (MOS) 8

I.4 Formas de carbono en el suelo 10

I.5 Cambio de vocación del suelo y prácticas agrícolas 11

I.6 Fragmentación del suelo 12

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS 14

II.1 Caracterización de las áreas de estudio en el ecosistema forestal fragmentado 14

II.2 Muestreo 19

II.2.1 Muestreo para determinación de propiedades del suelo por área 19

II.2.2 Muestreo con núcleos de suelo para determinación de formas de carbono 22

II.3 Métodos de separación 23

II.4 Análisis de laboratorio 24

II.4.1 Preparación de las muestras 25

II.4.2 Determinación de propiedades del suelo 25

II.4.3 Determinación de formas de carbono 27

II.5 Procesamiento de datos 28

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 31

III. 1 Propiedades del suelo 31

III.2 Formas de carbono en el suelo 37

III.2.1 Formas de carbono respecto a las propiedades evaluadas por profundidad 38

III.2.2 Revisión del comportamiento de las formas de carbono como indicador ambiental 43

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 57

Conclusiones 57

Recomendaciones 60

BIBLIOGRAFÍA 61

ANEXOS 71

Anexo I. Tablas de datos 71

Anexo II. Gráficos y diagramas 76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Clasificación de la porosidad total del suelo (Kaurichev, 1984).....21
Tabla 2. Muestreo con los núcleos de suelo 22
Tabla 3. Comparación de muestras a la misma profundidad 29
Tabla 4. Propiedades determinadas por área en el Cerro El Tintero, Acajete, Puebla.....31
Tabla 5. Clase textural por área.....34
Tabla 6. Porcentajes de formas de carbono por área 37
Tabla 7. Coeficiente de correlación de Pearson entre propiedades del suelo y formas de carbono 38
Tabla 7. Diferencias en las formas de carbono en cada área, respecto al tiempo 52
Tabla 9. Datos del análisis de formas de carbono 71
Tabla 10. Coeficientes de correlación entre propiedades del suelo y formas de carbono ...72
Tabla 11. Porcentajes de las formas de carbono con respecto al COT.....75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de transformación de la materia orgánica 9
Figura 2. Cerros El Tintero y El Pinal.....14
Figura 3. Fragmentación en el ecosistema forestal Cerro El Tintero Acajete, Puebla.....15
Figura 4. Densidad de vegetación cualificada mediante el NDVI 16
Figura 5. Densidad de vegetación cualificada mediante color falso.....16
Figura 6. Área conservada del Ecosistema Forestal fragmentado del Cerro El Tintero Acajete, Puebla.....18
Figura 7. Área en transición dentro del Ecosistema Forestal Fragmentado del Cerro El Tintero Acajete, Puebla.....18
Figura 8. Área dedicada a la agricultura dentro del Ecosistema Forestal Fragmentado del Cerro El Tintero Acajete, Puebla 19
Figura 9. Diagrama de la dinámica de las formas de carbono Autoría Propia (2022). 59

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Porcentaje de humedad 32
Gráfico 2. Valores de pH.....33
Gráfico 3. Porcentaje de porosidad.....35
Gráfico 4. Porcentaje de materia orgánica.....36
Gráfico 5. Porcentaje de Carbono Orgánico Total (COT) por área, tiempo 1 (T1).....44
Gráfico 6. Porcentaje de Carbono Orgánico Total (COT) por área, tiempo 2 (T2).....46
Gráfico 7. Porcentaje de Carbono soluble en agua fría (CSAF) por área, tiempo 1 (T1) 47
Gráfico 8. Porcentaje de Carbono soluble en agua fría (CSAF) por área, tiempo 2 (T2) 47
Gráfico 9. Porcentaje de Carbono soluble en agua caliente (CSAC) por área, tiempo 1 (T1) 49
Gráfico 10. Porcentaje de Carbono soluble en agua caliente (CSAC) por área, tiempo 2 (T2) 50
Gráfico 11. Porcentaje de Carbono soluble en pirofosfato (CSP) por área, tiempo 1 (T1)....51
Gráfico 12. Porcentaje de Carbono soluble en pirofosfato (CSP) por área, tiempo 2 (T2)....51
Gráfico 13. Formas de carbono en Área Conservada, tiempo 1 (T1) 53
Gráfico 14. Formas de carbono en Área Conservada, tiempo 2 (T2) 53
Gráfico 15. Formas de carbono en Área de Transición, tiempo 1 (T1).....54
Gráfico 16. Formas de carbono en Área de Transición, tiempo 2 (T2).....54
Gráfico 17. Formas de carbono en Área Agrícola, tiempo 1 (T1) 55
Gráfico 18. Formas de carbono en Área Agrícola, tiempo 2 (T2) 55
Gráfico 19. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - COT (T1).....76
Gráfico 20. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - COT (T1).....76
Gráfico 21. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - COT (T1).....76
Gráfico 22. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - COT (T1).....76
Gráfico 23. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - COT (T1).....76
Gráfico 24. Valores de COT por profundidad; AC (T1).....76
Gráfico 25. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSAF (T1) 76

Gráfico 26. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSAF (T1) 76
Gráfico 27. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSAF (T1) 76
Gráfico 28. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSAF (T1) 76
Gráfico 29. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSAF (T1) 76
Gráfico 30. Valores de CSAF por profundidad; AC (T1) 76
Gráfico 31. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSAC (T1) 77
Gráfico 32. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSAC (T1) 77
Gráfico 33. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSAC (T1) 77
Gráfico 34. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSAC (T1) 77
Gráfico 35. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSAC (T1) 77
Gráfico 36. Valores de CSAC por profundidad; AC (T1) 77
Gráfico 37. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSP (T1) 77
Gráfico 38. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSP (T1) 77
Gráfico 39. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSP (T1) 77
Gráfico 40. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSP (T1) 77
Gráfico 41. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSP (T1) 77
Gráfico 42. Valores de CSP por profundidad; AC (T1) 77
Gráfico 43. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - COT (T2) 77
Gráfico 44. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - COT (T2) 77
Gráfico 45. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - COT (T2) 77
Gráfico 46. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - COT (T2) 77
Gráfico 47. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - COT (T2) 77
Gráfico 48. Valores de COT por profundidad; AC (T2) 77
Gráfico 49. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSAF (T2) 77
Gráfico 50. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSAF (T2) 77
Gráfico 51. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSAF (T2) 77
Gráfico 52. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSAF (T2) 77
Gráfico 53. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSAF (T2) 77

Gráfico 54. Valores de CSAF por profundidad; AC (T2) 77
Gráfico 55. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSAC (T2) 77
Gráfico 56. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSAC (T2) 77
Gráfico 57. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSAC (T2) 77
Gráfico 58. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSAC (T2) 77
Gráfico 59. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSAC (T2) 77
Gráfico 60. Valores de CSAC por profundidad; AC (T2) 77
Gráfico 61. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSP (T2) 77
Gráfico 62. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSP (T2) 77
Gráfico 63. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSP (T2) 77
Gráfico 64. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSP (T2) 77
Gráfico 65. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSP (T2) 77
Gráfico 66. Valores de CSP por profundidad; AC (T2) 77
Gráfico 67. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - COT (T1) 77
Gráfico 68. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - COT (T1) 77
Gráfico 69. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - COT (T1) 77
Gráfico 70. Valores de COT por profundidad; AT (T1) 77
Gráfico 71. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSAF (T1) 77
Gráfico 72. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSAF (T1) 77
Gráfico 73. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSAF (T1) 77
Gráfico 74. Valores de CSAF por profundidad; AT (T1) 77
Gráfico 75. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSAC (T1) 77
Gráfico 76. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSAC (T1) 77
Gráfico 77. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSAC (T1) 77
Gráfico 78. Valores de CSAC por profundidad; AT (T1) 77
Gráfico 79. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSP (T1) 77
Gráfico 80. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSP (T1) 77
Gráfico 81. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSP (T1) 77

Gráfico 82. Valores de CSP por profundidad; AT (T1) 77
Gráfico 83. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - COT (T2) 77
Gráfico 84. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - COT (T2) 77
Gráfico 85. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - COT (T2) 77
Gráfico 86. Valores de COT por profundidad; AT (T2) 77
Gráfico 87. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSAF (T2) 77
Gráfico 88. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSAF (T2) 77
Gráfico 89. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSAF (T2) 77
Gráfico 90. Valores de CSAF por profundidad; AT (T2) 77
Gráfico 91. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSAC (T2) 77
Gráfico 92. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSAC (T2) 77
Gráfico 93. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSAC (T2) 77
Gráfico 94. Valores de CSAC por profundidad; AT (T2) 77
Gráfico 95. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSP (T2) 77
Gráfico 96. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSP (T2) 77
Gráfico 97. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSP (T2) 77
Gráfico 98. Valores de CSP por profundidad; AC (T2) 77
Gráfico 99. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - COT (T1) 77
Gráfico 100. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - COT (T1) 77
Gráfico 101. Valores de COT por profundidad; AA (T1) 77
Gráfico 102. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSAF (T1) 77
Gráfico 103. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSAF (T1) 77
Gráfico 104. Valores de CSAF por profundidad; AA (T1) 77
Gráfico 105. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSAC (T1) 77
Gráfico 106. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSAC (T1) 77
Gráfico 107. Valores de CSAC por profundidad; AA (T1) 77
Gráfico 108. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSP (T1) 77
Gráfico 109. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSP (T1) 77

Gráfico 110. Valores de CSP por profundidad; AA (T1) 77
Gráfico 111. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - COT (T2) 77
Gráfico 112. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - COT (T2) 77
Gráfico 113. Valores de COT por profundidad; AA (T2) 77
Gráfico 114. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSAF (T2) 77
Gráfico 115. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSAF (T2) 77
Gráfico 116. Valores de CSAF por profundidad; AA (T2) 77
Gráfico 117. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSAC (T2) 77
Gráfico 118. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSAC (T2) 77
Gráfico 119. Valores de CSAC por profundidad; AA (T2) 77
Gráfico 120. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSP (T2) 77
Gráfico 121. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSP (T2) 77
Gráfico 122. Valores de CSP por profundidad; AA (T2) 77

ABREVIATURAS

% C	Porcentaje de carbono
% H	Porcentaje de humedad
% MO	Porcentaje de materia orgánica
°C	Grados centígrados
A	Peso del agua
AA	Área agrícola
AC	Área conservada
Al	Aluminio
AT	Área en transición
$C_{12}H_{10}Ba_2NO_3S$	Indicador bario sulfonato de difenilamina
Ca	Calcio
$CaCO_3$	Carbonato de calcio
CH_4	Metano
CIS	Carbono inorgánico del suelo
cm	Centímetros
CO	Monóxido de carbono
Co	Cobalto
CO_2	Dióxido de Carbono
CO_3^{2-}	Ion carbonato
COS	Carbono orgánico del suelo
COT	Carbono orgánico total
CSAC	Carbono soluble en agua caliente
CSAF	Carbono soluble en agua fría

CSP	Carbono soluble en pirofosfato
Cu	Cobre
Da	Densidad aparente
Dr	Densidad real
Fe	Fierro
$FeSO_4$	Sulfato ferroso
g	Gramos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
H_3PO_4	Ácido fosfórico
HCO_3^-	Ion bicarbonato
K	Potasio
$K_2Cr_2O_7$	Dicromato de potasio
km	Kilómetros
km^2	Kilómetro cuadrado
Mg	Magnesio
$MgCO_3$	Carbonato de Magnesio
mm	Milímetros
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
MOS	Materia Orgánica del Suelo
msnm	Metros sobre el nivel del mar
N	Norte
NDVI	Índice normalizado de vegetación

N_{real}	Normalidad del titulante
O	Oeste
P	Fósforo
p	Valor p estadístico
PVC	Policloruro de vinilo
r	Coeficiente de correlación de Pearson
r^2	Proporción de la variación en la correlación de Pearson
S	Peso del suelo
S	Azufre
s.f.	Sin fecha
Zn	Zinc
ρ	Coeficiente de correlación de Spearman

INTRODUCCIÓN

"Nuestro planeta es como un corazón; si sufre un daño grave, todos los demás órganos vitales se verán afectados: los climas, el agua potable, la química del suelo, los microorganismos y las sociedades humanas."

- Leonardo Boff (2004)

En la actualidad nuestro planeta sufre una crisis ambiental que ha ido empeorando con el paso del tiempo. La ONU, preocupada por el estado de la Tierra en medio de esta crisis, en su Convención sobre el Desarrollo y Medio Ambiente celebrada en Río de Janeiro (1992), partiendo del Informe Bruntland (Estocolmo, 1987) acuñó el término desarrollo sostenible, definido como "aquél que atiende las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de atender sus necesidades y aspiraciones".

En este contexto, se reevaluó el desarrollo mundial y no pasaron más de diez años para que se dieran cuenta que era totalmente insostenible en todos los aspectos ambientales (Boff, 2015) incluido el suelo. Este último tomó mayor preocupación a partir de la COP21, donde nace el proyecto "4 por mil de suelos para la seguridad alimentaria y el clima", con el propósito de aumentar mundialmente la materia orgánica del suelo en 4 por 1000, o lo que es lo mismo en un 0,4% al año, a fin de compensar las emisiones planetarias de gases de efecto invernadero derivadas de fuentes antropogénicas y detener así el incremento de la concentración de CO_2 en la atmósfera (Minasny et al., 2017).

El proyecto de la COP 21 se hizo necesario por los efectos del cambio de vocación del suelo, donde se afectan los procesos naturales provocando una disminución en la producción de materia orgánica (Gauthier et al., 2009). Esta problemática se genera a partir de la extracción de vegetación y el abandono de suelos; de tal suerte que, al no haber biomasa tampoco hay incorporación de material orgánico fresco. Por lo tanto, los microorganismos

propician el agotamiento del carbono almacenado en el suelo; mismo que se emite a la atmósfera en forma de CO_2 y que ya no puede ser reciclado mediante fotosíntesis por la pérdida de cobertura. De ahí que, al regular las salidas de carbono del suelo se pueda mitigar el calentamiento global (Tang et al., 2018).

Conviene mencionar que el cambio de vocación del suelo es necesario para la subsistencia de los agricultores (Munny et al., 2021), así como la seguridad alimentaria. Sin embargo, no se ha generado de la manera más adecuada, por lo que no se hace un aprovechamiento sostenible.

Así, al hacer un uso insostenible del suelo, éste se degrada, pierde su cobertura vegetal y sus propiedades, emite CO_2 contribuyendo a los efectos del calentamiento global (Prietzel et al., 2016).

Planteamiento del Problema

La vida en el planeta Tierra es posible, entre otros aspectos, gracias a la capa superficial que la recubre llamada atmósfera, la cual está compuesta por diversos gases, entre ellos ozono, vapor de agua, óxido nitroso, metano y dióxido de carbono. Dichos gases se conocen como gases de efecto invernadero (GEI), entre los principales se encuentra el dióxido de carbono (CO_2), que representa el 60%. Éste es generado de manera natural a través del proceso de respiración de los microorganismos en el suelo y es emitido a la atmósfera debido a actividades antrópicas que propician el cambio de uso de suelo como la agricultura, deforestación e incendios forestales; además se genera por la quema de combustibles fósiles y descomposición del material orgánico proveniente del suelo.

El suelo es el depósito de carbono más activo de los ecosistemas (Yang et al., 2020), pues en él se encuentra un gran reservorio que se ha ido incorporando a través del tiempo mediante la fotosíntesis y mineralización, procesos que forman parte de su ciclo global. Sin embargo, debido al manejo inadecuado del suelo en la agricultura (de actividades como arar,

quemar, deforestar y/o dejarlos descubiertos tras su abandono), éste va perdiendo sus propiedades, de tal forma que el carbono almacenado durante años se libera a la atmósfera en forma de CO_2 y CH_4, sumándose a los demás gases de efecto invernadero y contribuyendo al calentamiento global.

En el suelo la materia orgánica (MOS) es el mayor depósito de carbono orgánico terrestre (Bankó et al., 2021); superior al carbono contenido en la atmósfera y la vegetación. De tal forma que un pequeño cambio en la MOS global generaría un impacto considerable en el contenido del CO_2 atmosférico (Lefèvre et al., 2017); por esta razón, al reducir las emisiones se contribuye a prevenir esta problemática (Zewen et al., 2020).

Es importante mencionar que gran parte de los ecosistemas del territorio nacional se han degradado o transformado en campos agrícolas, pastizales, zonas urbanas y rurales (SEMARNAT, 2018), lo que ha ocasionado su fragmentación. Por lo que, al haber un cambio de vocación del suelo, cualquiera que sea, éste tiende a cambiar de ser un sumidero a una fuente de CO_2 (Ahirwal et al., 2021).

Aunado a lo anterior, la perturbación del suelo genera desequilibrios ecológicos alterando los ciclos biogeoquímicos y contribuyendo a la pérdida de biodiversidad a pequeña y gran escala. Por esta razón es que la conservación de bosques y vegetación natural, además del buen manejo de las actividades en la agricultura, son esenciales para contribuir con el restablecimiento del suelo como sumidero de carbono, y factor esencial para mitigar el calentamiento global al devolver el equilibrio a los ecosistemas con la regeneración del ciclo de carbono.

Debido a todo esto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera las formas de carbono del suelo en las áreas de estudio identificadas se mantienen o se pierden por la fragmentación de un ecosistema?

Justificación

La génesis del suelo propicia el desarrollo de diferentes ecosistemas, y uno de los más importantes son los forestales; fundamentales por los servicios ambientales que ofrecen, entre los que se encuentran purificación del aire y agua, protección al suelo, regulación del clima, captura y retención de carbono; sin embargo, cuando los ecosistemas forestales son fragmentados para un uso diferente se altera física y químicamente su calidad (Amoakwah et al., 2020) provocando erosión, infertilidad, pérdida de productividad y emisiones de CO_2 a la atmósfera, principalmente.

México es un país rico en recursos forestales a nivel mundial, sin embargo, por su tasa de deforestación, ocupa cada vez menos superficie del territorio nacional (Galicia et al., 2007; SEMARNAT, 2018). Tal es la problemática que la superficie de bosque ha disminuido aproximadamente 420 millones de hectáreas en un periodo de 1990 a 2020 (FAO y PNUMA, 2020).

En los países latinoamericanos (Meza y Armenteras, 2018) y, puntualmente, en México se considera la agricultura como una de las principales causas de fragmentación de estos ecosistemas. La expansión de la agricultura se considera la mayor causa de reducción de la cubierta forestal natural y la fragmentación del hábitat forestal (Ahirwal et al., 2021).

Cabe mencionar que la agricultura es responsable de la tercera parte de las emisiones de GEI (Vermeulen et al., 2012), y al menos la mitad de los suelos con vocación agrícola se encuentran degradados en la actualidad (Bankó et al., 2021). De tal suerte que, al regular las prácticas agrícolas se puede aumentar el secuestro de carbono y disminuir las emisiones de CO_2.

Según el informe de la SEMARNAT (2018) en el año 2014 se estimó que el 55.6% de la superficie remanente de bosques se hallaba en fragmentos menores a 80 km^2 (unidad mínima requerida para mantener las condiciones adecuadas para la diversidad de estos ecosistemas), evidenciando que este es el ecosistema más fragmentado del país.

Considerando que estas alteraciones son parte de una problemática global que se considera una amenaza para el futuro (Munny et al., 2021), se pretende generar indicadores ambientales basados en las distintas formas de carbono almacenadas en el suelo que permitan identificar el nivel de degradación que existe en el ecosistema.

Objetivos

- General:

Evaluar la dinámica del carbono en los suelos de las áreas donde la fragmentación del ecosistema forestal permita identificar indicadores ambientales de cambio.

- Específicos:
  - Seleccionar y caracterizar las áreas de estudio en el ecosistema forestal fragmentado situado en el cerro El Tintero Acajete, Puebla.
  - Seleccionar los sitios representativos y realizar el muestreo.
  - Definir los métodos de separación de las distintas formas de carbono.
  - Establecer una relación entre las formas de carbono identificadas en las distintas áreas como evidencia de cambio, que permita generar un indicador ambiental.

Hipótesis

Las formas de carbono almacenadas en el suelo definen la tendencia de cambio en un ecosistema forestal fragmentado.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

I.1 El ciclo del carbono

El carbono es un elemento fundamental para la vida en la tierra. Es uno de los elementos más importantes en el suelo ya que forma parte de procesos asociados a su funcionalidad y capacidad para ser productivo y generar biomasa. También se encuentra en la atmósfera, principalmente como CO_2 y CH_4, y en el agua en forma de iones (HCO_3^-, CO_3^{2-}) y/o ácido carbónico (Wilkin y Brainerd, 2016); la interacción de este elemento en los distintos medios describe el llamado ciclo de carbono.

Este ciclo biogeoquímico consiste en la circulación e intercambio de carbono en el suelo, agua y aire; puede ser dividido en 2 sub-ciclos: biológico y geológico, y tiene 4 principales etapas de transformación: fotosíntesis, respiración, descomposición y combustión.

El ciclo biológico se lleva a cabo de forma rápida e inicia con la fotosíntesis que realizan los organismos autótrofos (como las plantas y el fitoplancton) capturando el carbono en forma de CO_2 y usando la energía solar, para formar estructuras a partir de la glucosa (NASA, 2011a), las cuales son consumidas por otros seres vivos según la cadena trófica; de tal forma que el carbono es metabolizado y se convierte en nuevas estructuras.

El carbono fijado en las estructuras de los organismos es descompuesto por microorganismos al momento en que éstas mueren y se incorporan al suelo, convirtiéndose en materia orgánica. En este proceso de descomposición fijan parte del carbono al suelo, y otra parte la liberan al respirar. El CO_2 producto de respiración es liberado para ser usado nuevamente en la fotosíntesis o emitido a la atmósfera. Es muy notorio como el CO_2 atmosférico fluctúa entre la fotosíntesis y respiración de los organismos (Reichle, 2020).

Por su parte, el sub-ciclo geológico es más lento y se refiere al carbono que se encuentra en la atmósfera, el océano, el suelo, las rocas y en general en el interior del planeta, de forma que queda atrapado durante largos periodos de tiempo hasta su transformación.

En este sub-ciclo el carbono atmosférico fluctúa a través de la lluvia hacia la superficie terrestre y el océano; al disolverse y combinarse con las moléculas de agua (Bear et al., 2016) puede ocurrir una fijación por parte de autótrofos marinos, incorporándose a la cadena trófica de estos ecosistemas. También puede formar estructuras en especies marinas (como las conchas, caparazones y esqueletos de arrecifes) que al morir los restos se vuelven sedimentos oceánicos. Los sedimentos de carbono al fondo del océano se convierten en rocas calizas y quedan atrapados durante miles o millones de años (NASA, 2011b). Por otro lado, el carbono almacenado en el suelo por la descomposición de material orgánico, meteorización de las rocas y minerales se vuelve estable y una parte se lixivia y migra hacia el subsuelo almacenándose en forma de petróleo, carbón y/o gas natural.

También es necesario considerar que el carbono en el agua se encuentra en distintas formas orgánicas, y que cada una de estas se ocupa de modo diferente.

Finalmente, el carbono es devuelto a la atmósfera en forma de CO_2, CO y CH_4. Este proceso se debe a la liberación de carbono por erupciones volcánicas (Bear et al., 2016) y se ve acelerado por la industrialización, quema de combustibles fósiles, deforestación, entre otras fuentes antrópicas.

I.2 El suelo, la fuente y sumidero de carbono

El carbono circula entre los océanos, la atmósfera, el suelo y el subsuelo; instancias que conforman los depósitos, reservorios o almacenes de carbono (Burbano, 2018). Uno de los mayores reservorios es la litosfera de la Tierra, donde el carbono se almacena inerte (Reichle, 2020) después de haber sido transformado en el suelo.

Dicho elemento fluctúa desde la atmósfera hacia el suelo, de tal forma que convierte a este último en el llamado sumidero de carbono, pues es dentro de él que ocurre una fijación quedando (el carbono) atrapado por miles de años; la fijación de este elemento se considera

como “captura de carbono” y ocurre desde que forma parte de las estructuras del suelo y/o vegetación hasta que se devuelve a la atmósfera (Bernardus et al., 2007).

Cuando el elemento en cuestión fluctúa a la inversa, el suelo se convierte en una fuente de carbono que contribuye al calentamiento global debido al aumento de los GEI; estas fluctuaciones se agravan cuando el suelo está desprovisto de vegetación y se degrada, de tal manera que pierde masa por el trabajo metabólico de los microorganismos; además, estas pérdidas se asocian a la fragmentación por el cambio de vocación del suelo.

Cuando el CO_2 proveniente del suelo por la actividad microbiana deja de ser fotosintetizado por los autótrofos, ya que ha sido eliminada la cubierta vegetal, se suscita un inminente aumento de este gas; de tal forma que todo el carbono orgánico del suelo se va perdiendo propiciando su degradación.

El comportamiento de estas fluctuaciones está en función de las tasas de formación de biomasa y descomposición del carbono orgánico del suelo (Burbano, 2018). En este sentido, al haber una interrupción de las fluctuaciones que naturalmente se llevan a cabo por los procesos de fotosíntesis-respiración que realizan la biomasa vegetal y los microorganismos, respectivamente, se rompe la continuidad del ciclo de carbono.

I.3 Materia orgánica del suelo (MOS)

La materia orgánica del suelo es un conjunto de constituyentes orgánicos en diversas etapas de descomposición (Lefèvre et al., 2017), en general residuos orgánicos vegetales y desechos de animales. La MOS es un componente dinámico de gran importancia ya que proporciona estabilidad y porosidad al suelo; de tal forma que se puede retener, liberar y reciclar el agua y nutrientes necesarios para la subsistencia de organismos vegetales y los microrganismos.

Dentro del suelo la MO se encuentra en constante cambio; al ser depositada es fragmentada y los trozos y partículas resultantes, como formas orgánicas más sencillas, son

aprovechados por microorganismos para obtener energía y reproducirse, sin embargo, algunas partículas también son mineralizadas al instante. Esta transformación de la MOS permite la liberación de nutrientes que se fijan a las arcillas y el humus para ser aprovechadas por plantas.

Por otro lado, la MOS se humifica llevando a cabo procesos químicos, físicos y biológicos (Jordán, 2005); durante este proceso los componentes orgánicos se vuelven más complejos, de tal forma que tienen mayor estabilidad y ya no son asimilados fácilmente por los microorganismos. La estabilidad de los compuestos humificados los convierte en un eslabón del ciclo de carbono de lenta transformación.

En la Figura 1 se muestra el proceso de transformación de la materia orgánica:

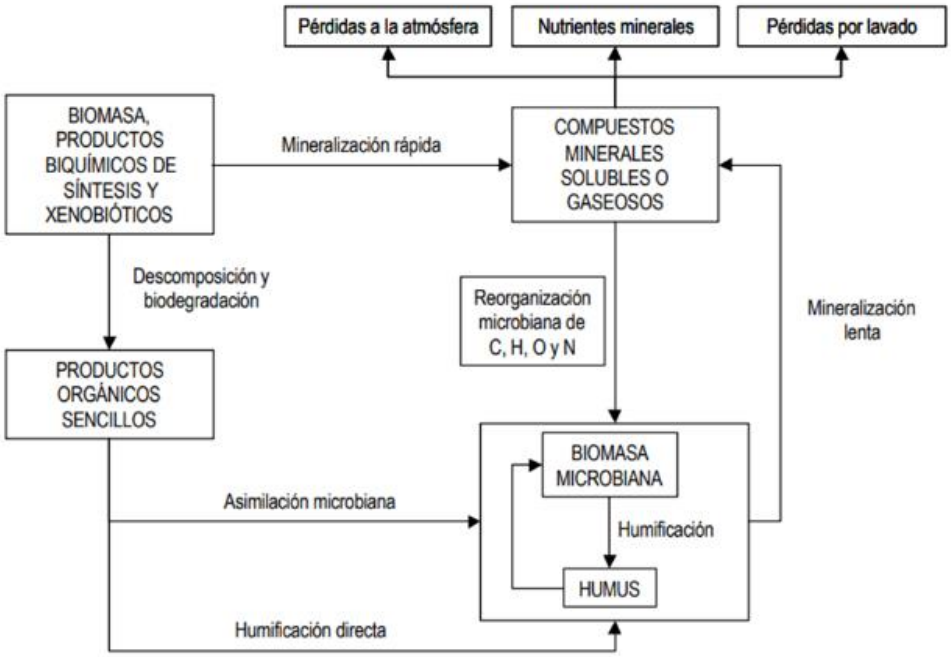


Figura 1. Esquema del proceso de transformación de la materia orgánica
Adaptado de J. Porta, et al. (2003)

La materia orgánica se puede agrupar dependiendo del grado de descomposición en fresca y transformada. Al primer grupo pertenecen aquellos residuos de plantas y animales que han sido incorporados recientemente y no han sido totalmente transformados, de tal

suerte que conservan la composición química original. El segundo grupo procede de la descomposición de la MOS fresca, en éste se encuentran las sustancias húmicas (humus y huminas) y no húmicas; estas últimas formadas por aquellos compuestos hidrocarbonados, sustancias nitrogenadas y productos transitorios resultantes de la descomposición de moléculas orgánicas complejas.

La MOS contiene de 55 a 60% de carbono en masa (Lefèvre et al., 2017), y a este carbono se le denomina carbono orgánico del suelo (COS). En suelos agrícolas, la materia orgánica suele representar del 1 – 3% de los constituyentes del suelo, mientras que, en suelos forestales, este porcentaje puede elevarse dependiendo del lugar y las condiciones climáticas. El horizonte superficial del suelo es, normalmente, el que contiene una mayor cantidad de materia orgánica, mientras que el contenido va disminuyendo progresivamente con la profundidad (Jordán, 2005).

I.4 Formas de carbono en el suelo

El carbono en el suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica (Jackson, 1964). Los procesos que se llevan a cabo en el suelo de forma natural, y en ocasiones de manera antropogénica, determinan la forma en que el carbono será secuestrado o emitido.

El carbono orgánico del suelo (COS) proviene de la materia orgánica. Para que éste se incorpore en el suelo la materia orgánica original se transforma como resultado de la actividad microbiana. El COS está disponible en el suelo dependiendo de su estabilidad química y física; de tal manera que se divide en una fracción lábil y una húmica.

La fracción lábil es una reserva activa que sirve como fuente energética para los microorganismos (Martínez et al., 2008), incluye carbono orgánico disuelto, carbono de biomasa microbiana y carbono orgánico extraído o fácilmente oxidable (Yang et al., 2020); el carbono lábil se encuentra en la parte más superficial del suelo y mantiene sus características químicas de origen (en forma de hidratos de carbono, proteínas, taninos y ácidos grasos). Al

ser la fracción más activa tiene un tiempo de rotación aproximado de 1 a 2 años (Lefèvre et al., 2017), y puede incrementar o disminuir su producción de acuerdo a la cantidad de residuos orgánicos que se adicionen.

Por su parte, la fracción húmica es la más estable, se conforma por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas; éstas últimas constituidas por compuestos químicos insolubles en medio acuoso, hidrocarburos, ésteres, ácidos y estructuras polares (Martínez et al., 2008). Esta fracción puede ser una reserva pasiva intermedia o lenta dependiendo del grado de estabilidad, es decir, si el COS se ha estabilizado en superficies minerales como las arcillas, y/o se encuentra dentro de agregados, de tal forma que no es fácilmente aprovechable por ningún organismo (Lefèvre et al., 2017), además esta característica del tipo de reserva se debe a la capacidad de resistencia del compuesto de carbono al oxígeno. Es importante resaltar que la reserva de carbono lenta es la fuente más importante del suministro de nitrógeno mineralizable y otros nutrientes.

Las fracciones de carbono con mayor grado de transformación (humificación) suelen encontrarse en los macroagregados (que contienen fracciones lentamente oxidables), y en los microagregados del suelo (fracción muy lentamente oxidable).

Por otro lado, el carbono inorgánico del suelo (CIS) proviene de las interacciones del carbono dentro de la matriz de suelo; sus formas más estables son $CaCO_3$, $MgCO_3$, CO_2, HCO_3^- y CO_3.

I.5 Cambio de vocación del suelo y prácticas agrícolas

El cambio de vocación de suelo se refiere a la transformación de la actividad del suelo, es decir, a la forma en que se usa o emplea un terreno y/o su tipo de cubierta vegetal; en este sentido la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2021) define como cambio de uso del suelo en terreno forestal a: *"la remoción total o parcial de la vegetación forestal*

de los terrenos forestales arbolados o de otros terrenos forestales para destinarlos o inducirlos a actividades no forestales".

En México, desde el año 2014, existen 69 usos de suelo entre lo que se encuentran bosques, selvas, manglares, matorrales, vegetación hidrófila, pastizales, plantaciones forestales, zonas urbanas, agricultura y cuerpos de agua (SEMARNAT, 2018); donde dichos usos pueden ser de génesis natural o inducida.

En la actualidad, la agricultura se encuentra entre los cambios de vocación de suelo que generan la mayor extensión de ecosistemas fragmentados, ocasionando el desgaste del suelo. Este cambio de vocación es resultado de la producción de alimentos para cubrir una necesidad básica del hombre, de tal manera que se busca explotar al máximo el suelo.

Las prácticas agrícolas han sufrido diversos cambios con el paso del tiempo, esto se debe principalmente a los avances tecnológicos, científicos, digitales, biotecnológicos, etcétera; gracias a estos avances se han mecanizado las tareas del suelo, se han desarrollado agroquímicos, se ha logrado eficientar el uso del agua, se han modificado genéticamente los cultivos para la obtención de alimentos de calidad, entre otros tantos beneficios. Sin embargo, el uso de algunas de estas tecnologías y la forma en cómo se combinan en las actividades agrícolas, ha provocado la contaminación y degradación del suelo, ignorando su conservación. Si se tienen malas condiciones de manejo del suelo, se puede provocar la pérdida de materia orgánica y con ello la desagregación del suelo, la pérdida de estructura, porosidad, capacidad de retención de humedad, capacidad de intercambio catiónico y de todas sus propiedades originales hasta erosionarlo y perderlo por completo; teniendo como consecuencia colateral la emisión de gases de efecto invernadero.

I.6 Fragmentación del suelo

El suelo es un ente que por su naturaleza tiene como principal función generar vida. Esta funcionalidad es posible gracias a las propiedades que adquirió con respecto a su material

parental, a las condiciones climatológicas, al relieve, a los organismos, y, sobre todo, al tiempo que le llevó formarse. De tal forma que los suelos son recursos no renovables y constituyen sistemas complejos por su heterogeneidad (Escalante, 2017). Sin embargo, el cambio de uso de suelo (INECC, 2018; SEMARNAT 2018), la deforestación, su mal manejo y exposición a la intemperie por falta de cobertura vegetal han sido de las principales causas de degradación y pérdida del suelo, así como de una problemática global: la emisión de CO_2 a la atmósfera.

En México gran parte de los ecosistemas forestales, ya sean bosques o selvas, son propiedades ejidales o comunales constituyendo el patrimonio de millones de mexicanos de todos los estratos económicos; este hecho permite visualizar que la explotación de estos recursos se vuelve cada vez más extensa, detonando el uso no sustentable del suelo (Bernardus et al., 2007). De tal forma que estas dificultades provocan, a su vez, la fragmentación de estos ecosistemas desintegrando su estructura natural, trayendo como consecuencia la extinción de especies nativas, la sobreabundancia de especies introducidas, y la alteración de los ciclos biogeoquímicos.

Se considera que la fragmentación de los ecosistemas forestales describe la división de un hábitat continuo en secciones (CONABIO, 2020); este es un concepto que engloba los procesos de eliminación de vegetación en segmentos de bosque, de ahí que se reduce la cobertura vegetal de estos ecosistemas, se expone a los organismos que habitan en él (Martínez et al., 2011), disminuye la superficie de bosque y se pierde la calidad del hábitat.

Además, a lo largo del tiempo se ha demostrado cómo la fragmentación de un ecosistema puede afectar el suelo y los factores asociados a éste, como lo son las implicaciones socioeconómicas (López et al., 2015; Olivares et al., 2019), la perdida de vegetación (Ortega et al., 2006; Trucíos et al., 2011) la seguridad alimentaria (García, 2019), el deterioro del paisaje (Fernández y Corbelle, 2017), etcétera.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1 Caracterización de las áreas de estudio en el ecosistema forestal fragmentado

El sitio de estudio se localiza en la parte central del estado de Puebla, específicamente en el Cerro El Tintero perteneciente a la comunidad de Santa Isabel Tepetzala, municipio de Acajete, Puebla.

El municipio se ubica en los paralelos 19º 00' 30" y 19º 11' 06" de latitud norte y los meridianos 97º 53' 54" y 98º 00' 00" de longitud occidental, con 176.79 km de extensión territorial y una altitud que fluctúa entre los 2,280 - 3,260 msnm. Este pertenece a la cuenca del río Atoyac, y presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, teniendo una temperatura media anual de 15.2°C, y 886 mm de precipitación promedio.

El Cerro El Tintero, es una formación morfológica derivada de La Malinche, cuya cubierta se conforma por un bosque de pino-encino, donde predomina la especie Quercus, y cuyo suelo es de tipo arenosol (INEGI, s.f.). Este debe su nombre a la forma de su cumbre, y se ubica sobre las coordenadas 19º 09' 50'' latitud norte y 97º 55' 27'' longitud oeste; está unido al Cerro del Pinal en dirección de norte a sur (INAFRED, s.f.).

Figura 2. Cerros El Tintero y El Pinal
Obtenida de Google Earth Pro (2019)

Este es un ecosistema que ha sido impactado por la agricultura, hecho que determina la fragmentación del mismo; distinguiéndose tres áreas: la conservada donde existe una dinámica natural sin alteración en la cubierta vegetal, el área en transición donde la vegetación es limitada a especies arbustivas y/o herbáceas, y el área agrícola caracterizada por algún tipo de monocultivo introducido que puede estar o no presente.

A través de la revisión de imágenes satelitales se diferenciaron áreas con distinta densidad de vegetación, para su identificación espacial.

Figura 3. Fragmentación en el ecosistema forestal Cerro El Tintero Acajete, Puebla. Obtenida de Google Earth Pro (2019)

En las Figura 2 y 3, tomadas de Google Earth Pro, se observa que hay superficie donde la tonalidad es café, lo que indica ausencia de vegetación, por ello se determinó que la vocación en esta área es agrícola. En cierta superficie la saturación y luminosidad son bajas, de tal forma que se le considera como área de transición; por otro lado, en la superficie con alta saturación, y cuya tonalidad es uniforme, se considera sitio de elevada densidad de vegetación, lo que indica que se trata de un área conservada.

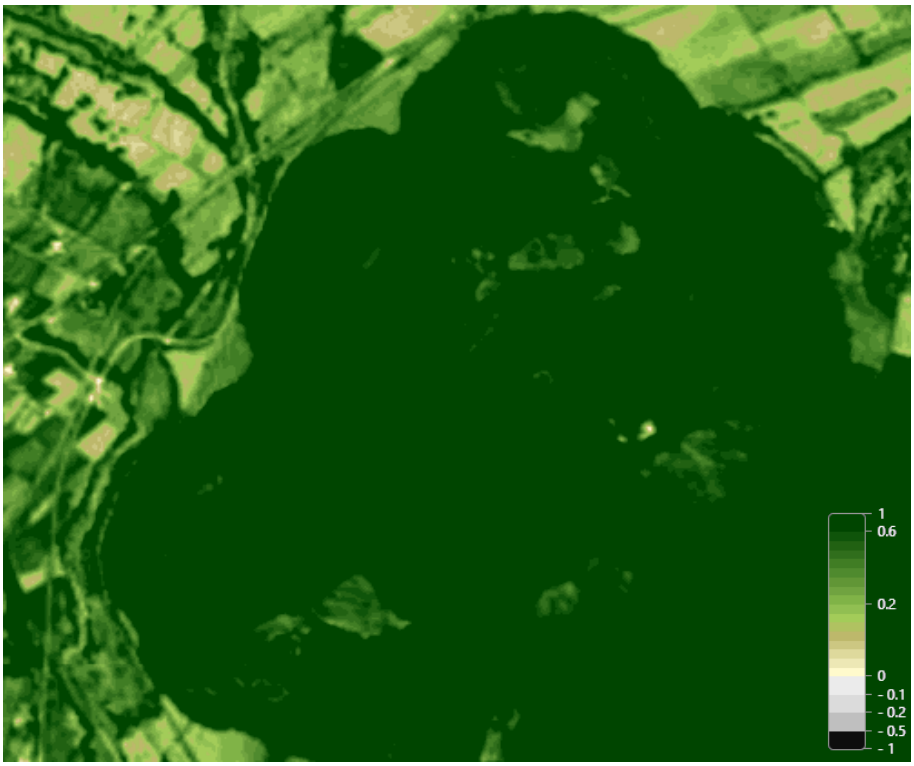


Figura 4. Densidad de vegetación cualificada mediante el NDVI
Obtenida de EO Browser (2019)

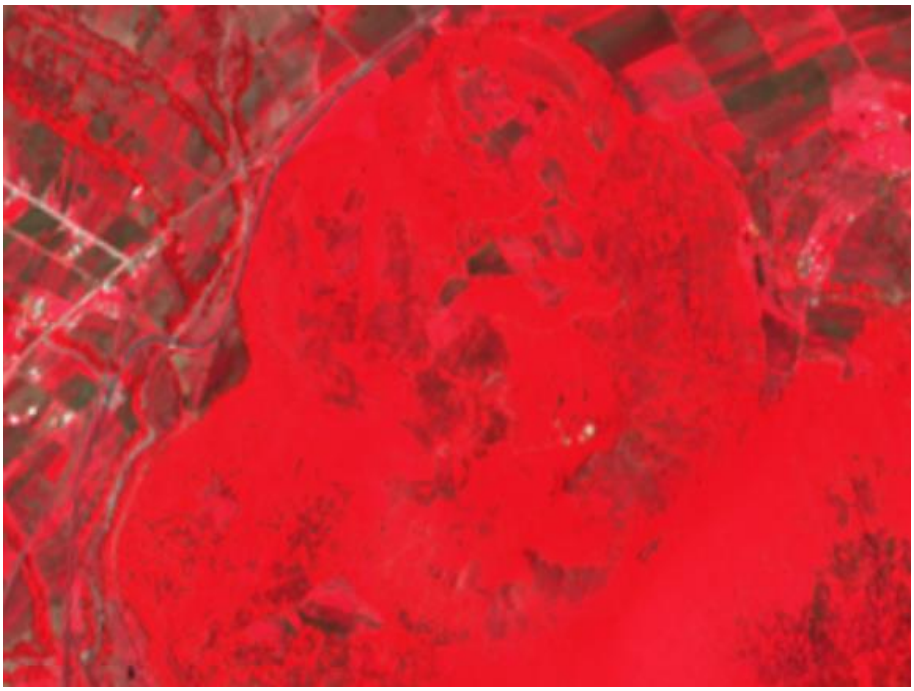


Figura 5. Densidad de vegetación cualificada mediante color falso
Obtenida de EO Browser (2019)

Para identificar con mayor precisión cada área de estudio se usaron imágenes satelitales (Figura 4 y 5) en el mismo mapa con dos tipos de capas, la del índice normalizado de vegetación (por sus siglas en inglés NDVI) y falso color, en la plataforma de EO Browser.

En el mapa con la capa NDVI se cuantifica la vegetación a partir de una valoración colorimétrica; donde los valores más cercanos a -1 son sitios que corresponden a cuerpos de agua, los cercanos a cero (-0.1 y 0.1) corresponden a zonas sin vegetación, y los valores positivos indican presencia de vegetación, de tal forma que los valores positivos pequeños corresponden a herbáceas y/o arbustos, y los valores más cercanos a 1 corresponden especies mayores (EO Browser, s.f.). Tomando en cuenta lo precedente, en la Figura 4 se pueden observar los sitios cuya densidad de vegetación se valora con 1 correspondiendo al área conservada, zonas de baja densidad de vegetación (con valores de 0.2 a 0.6), es decir, las áreas de transición; además de pequeñas superficies que tienden a cero, es decir, las áreas totalmente modificadas (áreas agrícolas).

Por su parte, el mapa a falso color se emplea para evaluar la densidad de vegetación usando bandas del infrarrojo cercano, ya que las plantas reflejan bandas infrarroja y verde, mientras que absorben el rojo (EO Browser, s.f.). Así, en las imágenes de este tipo, se observa el crecimiento de vegetación más denso en color rojo oscuro (NASA, 2014), y a medida que disminuye la saturación se infiere una densidad de vegetación menor; en cuanto al suelo descubierto, la tonalidad se torna grisácea-canela. En la Figura 5, se puede observar que la mayor parte de la superficie del Cerro El Tintero se encuentra inalterada, sin embargo, la disminución en la saturación del color indica una menor densidad en parte de esta que corresponde al área en transición; por su parte, donde la tonalidad cambió a gris-canela se considera suelo modificado y correspondiente al área agrícola.

Una vez identificadas, se realizó una visita de campo para distinguir las características de cada área y de esta forma describir sus similitudes y diferencias.

- Área conservada: se caracteriza por una cubierta vegetal diversa, donde hay presencia de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas; el suelo tiene un color

oscuro, es estable, firme y profundo, además, posee una manta de hojarasca que lo recubre. Estas características permiten predecir que esta área tiene un suelo inalterado en su dinámica, maduro y productivo.

Figura 6. Área conservada del Ecosistema Forestal fragmentado del Cerro El Tintero Acajete, Puebla
Autoría Propia (2019).

- Área en transición: esta área se caracteriza por su cubierta vegetal donde no existen especies arbóreas, pero sí arbustivas y herbáceas; el suelo está totalmente cubierto y tiene un color oscuro, sin embargo, la estabilidad y firmeza han sido modificadas, y la profundidad disminuye en el primer horizonte, cabe destacar que estudios previamente realizados demuestran que esta pérdida ocurre en superficies modificadas por actividades antropogénicas.

Figura 7. Área en transición dentro del Ecosistema Forestal Fragmentado del Cerro El Tintero Acajete, Puebla
Autoría Propia (2019).

- Área agrícola: está caracterizada por una cubierta vegetal parcial que fue inducida por labores agrícolas para obtener beneficios comerciales o para el consumo propio; la cubierta en el momento de la visita correspondía a residuos de maíz, el color del suelo es muy claro, no hay estabilidad ya que la consistencia es frágil; además, dada la degradación por el cambio de vocación éste ha perdido parte de su horizonte activo y con ello profundidad. Al labrar el suelo se generó una mezcla de este horizonte, de tal forma que se produjo homogeneidad de sus características a cierta profundidad; dicha aseveración se comprobó con estudios de laboratorio.

Figura 8. Área dedicada a la agricultura dentro del Ecosistema Forestal Fragmentado del Cerro El Tintero Acajete, Puebla
Autoría Propia (2019).

II.2 Muestreo

El muestreo se realizó en el mes de noviembre, donde las lluvias fueron escasas y el frio más intenso; la temperatura oscilaba alrededor de los 14°C.

II.2.1 Muestreo para determinación de propiedades del suelo por área

Se recolectaron muestras de cada área para caracterizarlas mediante análisis de laboratorio; éstas se tomaron por profundidades, de tal forma que se tomaron muestras

hasta los 50 cm en el área conservada, 30 cm en el área de transición, y 20 cm en el área agrícola, tomándose las muestras a cada 10 cm de profundidad. A cada muestra se le determinaron los siguientes parámetros:

- Humedad: alude al contenido de ag ua que hay en el suelo; este parámetro puede ser expresado en términos de porcentaje de peso mediante la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{Peso\ de\ agua\ en\ la\ muestra}{Peso\ de\ la\ muestra\ seca} \times 100 \qquad \textit{Ecuación 1}$$

- pH: es un indicador de acidez o alcalinidad en la solución del suelo, éste incide en la velocidad y calidad de los procesos de humificación y mineralización.

- Textura: se define así a la composición granulométrica de la fracción inorgánica del suelo; es decir, al conjunto de arena, limo y arcilla.

  La arena es la fracción más grande (2 - 0.02 mm) y le sigue el limo (0.02 - 0.002 mm), ambas son producto del fraccionamiento físico de la roca, no tienen capacidad de agregación y su capacidad de intercambio catiónico es muy baja por lo que no interaccionan con otros compuestos, sino que solo conforman el esqueleto del suelo. Por su parte, las arcillas son la fracción más pequeña (< 0.002 mm) y se origina a partir de la meteorización mediante la alteración química del material original; éstas se comportan como coloides cargados eléctricamente (Jaramillo J., 2002) por lo que tienen la capacidad de agregarse favoreciendo la estabilidad estructural, además, tienen alta capacidad de intercambio catiónico lo que permite la interacción con iones dentro del suelo.

- Porosidad: se refiere al espacio en el suelo que no está ocupado por sólidos, sino por líquidos y gases; es decir, el porcentaje total de espacios entre estos. Ésta depende del arreglo de los sólidos y su composición, de tal manera que se tiene micro y macro porosidad; según Kaurichev (1984) una buena porosidad total tiende al 50% y se clasifica como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1.Clasificación de la porosidad total del suelo (Kaurichev, 1984)

Porosidad total (%)	Apreciación cualitativa
>70	Excesiva
55 – 70	Excelente
50 – 55	Satisfactoria
40 – 50	Baja
< 40	Muy baja

Para obtener el valor de este parámetro se necesita determinar la densidad real (Dr), es decir la de los sólidos del suelo, y la densidad aparente (Da), que se refiere a los sólidos más la fase gaseosa (poros). Para ello se usa la siguiente ecuación:

$$Porosidad\ total = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) \times 100 \qquad \textit{Ecuación 2}$$

Donde: **Da** es la densidad aparente

Dr es la densidad real

- Porcentaje de materia orgánica: se refiere a los restos de biomasa que existen dentro del suelo; el valor de este parámetro se obtiene a través del método propuesto por Walkley y Black en 1934. La ecuación general para obtener el valor porcentual es la siguiente:

$$\%MO = \frac{5 - (ml\ de\ FeSO_4 \times N_{real})}{suelo} \times 0.69 \qquad \textit{Ecuación 3}$$

Donde: **suelo** es el peso de la muestra de suelo

ml de $FeSO_4$ es la cantidad de titulante gastado por muestra de suelo

N_{real} es la normalidad del titulante ($FeSO_4$)

La N_{real} se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$N_{real} = \frac{10 \times 0.5}{ml\ de\ FeSO_4\ gastados\ en\ el\ blanco} \qquad \textit{Ecuación 4}$$

II.2.2 Muestreo con núcleos de suelo para determinación de formas de carbono

La selección de sitios de muestreo para la determinación de formas de carbono se realizó tomando en cuenta las áreas seleccionadas en la primera etapa; recolectando muestras en las tres áreas: conservada, de transición y agrícola. De cada una de estas se eligieron dos sitios con las mismas características, y, a su vez, se tomaron muestras por duplicado para tener mayor precisión en los resultados.

Dadas las características observadas en las áreas de estudio se determinó hacer el muestreo a distintas profundidades, ya que, al haber alteración en la cubierta vegetal, degradación de la matriz de suelo y la mezcla del primer horizonte por actividades agrícolas, la profundidad podría cambiar en las diferentes áreas, variando como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Muestreo con los núcleos de suelo

Área	Identificación de la Muestra y su duplicado		Profundidad (cm)	Coordenadas del sitio
Área Conservada 1	$AC1_{11}$	$AC1_{12}$	10	19°09’33.1” N 097°54’48.3” O
	$AC1_{21}$	$AC1_{22}$	20	
	$AC1_{31}$	$AC1_{32}$	30	
	$AC1_{41}$	$AC1_{42}$	40	
	$AC1_{51}$	$AC1_{52}$	50	
Área Conservada 2	$AC2_{11}$	$AC2_{12}$	10	19°07’38.2” N 097°55’18.3” O
	$AC2_{21}$	$AC2_{22}$	20	
	$AC2_{31}$	$AC2_{32}$	30	
	$AC2_{41}$	$AC2_{42}$	40	
	$AC2_{51}$	$AC2_{52}$	50	
Área en transición 1	$AT1_{11}$	$AT1_{12}$	10	19°09’17.0” N 097°54’58.8” O
	$AT1_{21}$	$AT1_{22}$	20	
	$AT1_{31}$	$AT1_{32}$	30	
Área en transición 2	$AT2_{11}$	$AT2_{12}$	10	19°09’25.4” N 097°55’20.0” O
	$AT2_{21}$	$AT2_{22}$	20	
	$AT2_{31}$	$AT2_{32}$	30	
Área Agrícola 1	$AA1_{11}$	$AA1_{12}$	10	19°09’45.4” N 097°95’20.1” O
	$AA1_{21}$	$AA1_{22}$	20	
Área Agrícola 2	$AA2_{11}$	$AA2_{12}$	10	19°09’45.5” N 097°55’19.3” O
	$AA2_{21}$	$AA2_{22}$	20	

Las muestras se recolectaron en núcleos de suelo para mantenerlas inalteradas el mayor tiempo posible; para ello se usaron tubos de PVC de dos pulgadas de diámetro y 10 cm de largo. Una vez recolectados se envolvieron en bolsas de polietileno para evitar el derrame de la muestra, y se preservaron en caja para su transporte. Ya en el laboratorio, se conservaron en estufa a temperatura constante de 16°C, de tal forma que se uniformaran las condiciones.

II.3 Métodos de separación

Las formas de carbono dentro del suelo son muy variadas, sin embargo, pueden agruparse según su solubilidad. Para este trabajo se usaron distintas metodologías con la intención de separarlas según los estudios que han realizado diversos autores; y posteriormente hacer la cuantificación del porcentaje de carbono (%C) a través del método de Walkley y Black (1934) basado en la oxidación incompleta del carbono orgánico por una mezcla oxidante de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y acentuada por el calor de la dilución acuosa de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido fosfórico (H_3PO_4).

Por cuestiones prácticas se optó por extraer el carbono de las siguientes formas:

- Carbono Orgánico Total (COT)

El COT es la suma de todas las formas de carbono presentes en el suelo, desde las más lábiles hasta las más complejas; sirve como punto de referencia para realizar la cuantificación de las formas de carbono.

- Carbono soluble en agua fría (CSAF) y soluble en agua caliente (CSAC)

El CSAF es la fracción de carbono presente en el suelo fresco (primeros 30 cm normalmente), se encuentra libre de agregación por lo que su actividad con el medio es muy rápida; consiste principalmente de carbohidratos derivados de raíces, microorganismos y aminoácidos. Sirve como sustrato y fuente de carbono para los microorganismos. Esta fracción tiene gran importancia en cuanto a la estabilización y preservación del COS, pues su

ausencia o disminución puede afectar procesos del suelo, el flujo de CO_2 a la atmósfera, así como la calidad de aguas superficiales y subterráneas (Ćirić et al., 2016). Es la fracción de carbono disponible en el sustrato del suelo (Gauthier et al., 2009), que, por sus características, se encuentra parcialmente estable y se pierde por lavado más que por mineralización.

CSAC es un subgrupo de COS fácilmente descomponible que contiene las formas de carbono más lábiles estrechamente relacionadas con los microorganismos del suelo y la microagregación, por lo que al alterar las condiciones de suelo se pierde de manera rápida por mineralización (Ghani et al, 2003; Bankó et al., 2021). Esta fracción es rica en polisacáridos amorfos provenientes de exudados microbianos y vegetales (Feller et al., 1991); además se compone de carbohidratos, compuestos nitrogenados, principalmente amidas (Leinweber et al., 1995).

- Carbono soluble en pirofosfato (CSP)

El carbono soluble en pirofosfato contiene formas de carbono complejas relacionadas con formas de fierro y aluminio libres (Barral et al., 1997; Rodríguez et al., 2004); tales como los complejos organometálicos, además de óxidos y aluminosilicatos. En las superficies de estos complejos se adsorbe la materia orgánica (Barral et al., 1997) que, en contacto con el pirofosfato, se vuelve soluble pudiéndose cuantificar como carbono.

II.4 Análisis de laboratorio

Para el análisis de laboratorio se obtuvieron submuestras de cada núcleo de suelo, a fin de que se mantuviera preservada el resto de la muestra; posteriormente se hizo la preparación de las mismas para su análisis. Cabe destacar que las submuestras fueron tomadas el mismo día de la salida de campo para analizarlas en el menor tiempo posible y obtener los valores más cercanos a su estado original.

II.4.1 Preparación de las muestras

- *Secado:* Se colocaron las submuestras en charolas previamente etiquetadas, y se secaron durante un día a temperatura ambiente y bajo sombra para evitar la alteración y contaminación de las mismas.
- *Tamizado y pesado:* Una vez secas, las muestras se tamizaron con un tamiz del número 10 para dejar pasar las 3 fracciones de suelo: arena, limo y arcilla. Una vez tamizadas las muestras, se pesaron en una balanza analítica y se almacenaron para su análisis.

II.4.2 Determinación de propiedades del suelo

- *Humedad:* para obtener el valor porcentual en primer lugar se pesaron las muestras de suelo húmedo; después fueron sometidas a un proceso de secado durante 24 horas; una vez secas se pesaron en balanza analítica para finalmente procesar los resultados mediante la ecuación 1.
- *pH:* para determinarlo se usó el método potenciométrico, donde se ocupó una suspensión de suelo en agua (1:2.5) y un potenciómetro calibrado con solución buffer pH 7.
- *Textura:* en esta determinación se usaron 50 gramos de suelo con previa eliminación de materia orgánica mediante peróxido de hidrógeno; el suelo tratado se colocó en un vaso, al cual se le añadió oxalato y metasilicato de sodio para ponerlo en agitación durante algunos minutos, después de agitar la muestra se agregó a una probeta de un litro, añadiendo agua hasta su aforo y agitando mecánicamente durante un minuto, a los 40 segundos se registra la lectura con el hidrómetro y la temperatura, se repite el mismo procedimiento a las 2 horas.

  Para realizar los cálculos se usan las ecuaciones 5, 6, 7 y 8; y una vez obtenida la combinación porcentual se define la textura mediante el método del triángulo textural.

$$\%\ limos + \%\ arcillas = \frac{primera\ lectura}{g\ de\ suelo} \times 100 \qquad Ecuación\ 5$$

$$\%\ de\ arena = 100 - (\%\ limos + \%\ arcillas) \qquad Ecuación\ 6$$

$$\%\ de\ arcilla = \frac{segunda\ lectura}{g\ de\ suelo} \times 100 \qquad Ecuación\ 7$$

$$\%\ limos = 100 - (\%\ arena + \%\ arcillas) \qquad Ecuación\ 8$$

- *Porosidad:* para determinar esta propiedad se obtuvieron la densidad real y la densidad aparente.

  Para la determinación de la *densidad real* se usó un picnómetro a peso constante al que se le agregaron 5 gramos de suelo para ser pesado; posteriormente, se añadió agua y se agitó suavemente hasta eliminar las burbujas de aire, se aforó y se pesó. También se registró el peso del picnómetro solo con agua hasta aforo.

  Para obtener los resultados se introdujeron los valores a la ecuación 9, y antes de sustituir se restó el peso del picnómetro.

$$Dr = \frac{S}{S+A-(s+a)} \qquad Ecuación\ 9$$

  Donde: S es el peso del suelo

  A es el peso del agua

  (s + a) es el peso del suelo más agua

  La *densidad aparente* se obtuvo mediante la ecuación 10; se usó una probeta de 10 ml a la que se agregó suelo de acuerdo al volumen, proporcionando 10 golpes suaves sobre la mesa, para alcanzar el estado de agregación natural, y posteriormente añadir más suelo hasta aforar a 10 ml registrando el peso. Para hacer los cálculos se restó el peso de la probeta.

$$Da = \frac{Peso\ del\ suelo}{Volumen} \qquad Ecuación\ 10$$

- *Porcentaje de materia orgánica:* para esta determinación se usaron muestras de suelo de 0.5 gramos; a cada una se le añadieron 5 mililitros de dicromato de potasio (1N) y 10 mililitros de ácido sulfúrico, se agitaron y posteriormente se dejaron en reposo durante 30 minutos; pasado el tiempo de reposo se agregaron 100 mililitros de agua destilada y 5 de ácido fosfórico; después se les agregaron unas gotas de indicador bario sulfonato de difenilamina ($C_{12}H_{10}Ba_2NO_3S$) y se titularon con sulfato ferroso (0.05N). Además, se hizo la determinación del blanco para obtener la N_{real} que se usa en la ecuación 3.

II.4.3 Determinación de formas de carbono

Para hacer la determinación de las formas de carbono presentes en el suelo, se realizaron las extracciones de cada forma adaptadas de metodologías usadas por otros autores (Ghani et al., 2003; Rodríguez et al., 2004).

- *Carbono soluble en agua fría (CSAF):*

  Para determinar el CSAF se diluyó suelo en agua desionizada, posteriormente se agitó durante 30 minutos, se centrifugó por otros 20 minutos y se filtró con una membrana de 45 µm para obtener el extracto de carbono soluble en agua fría (temperatura ambiente). Los restos de suelo se guardan para obtener el carbono soluble en agua caliente; y el extracto se analiza por el método de Walkley y Black para obtener el porcentaje de carbono soluble en agua fría.

- *Carbono soluble en agua caliente (CSAC):*

  El sedimento sobrante de la metodología para obtener el CSAC se disolvió en agua desionizada, se agitó alrededor de 10 segundos y se sometió a baño maría durante 16 horas; posteriormente, para obtener el extracto, se repitió el procedimiento de centrifugación y filtrado ocupados para la obtención de CSAC; una vez obtenido el extracto fue analizado por el mismo método para obtener el %CSAC.

- *Carbono soluble en pirofosfato (CSP):*

  Para obtener el CSP se realizó una dilución de suelo en pirofosfato de sodio hidratado, se agitó durante 25 minutos, se centrifugó durante 5 minutos más y posteriormente se decantó hasta obtener el extracto para analizarlo y así obtener el porcentaje de las formas de CSP. Cabe resaltar que el dicromato usado para esta determinación se diluyó hasta una normalidad 0.5 N.

II.5 Procesamiento de datos

- Propiedades del suelo

Para la determinación de las propiedades del suelo se analizaron un total de 50 muestras por triplicado. Los resultados obtenidos para la caracterización del suelo en cada área se tabularon y graficaron en función de la profundidad para ser comparados por áreas.

- Formas de carbono en el suelo

En cuanto a los resultados obtenidos para las formas de carbono, se concentraron en tablas y se procesaron mediante la ecuación 3 para obtener el porcentaje de materia orgánica; dicho valor al sustituirlo en la ecuación 11 permite obtener el porcentaje de carbono. Sin embargo, en lo que se refiere a la determinación de las formas complejas (CSP); una vez obtenido el porcentaje de carbono, se sustituyó el valor en la ecuación 12 como una equivalencia por la diferencia de normalidad en el dicromato de potasio usado.

$$\%Carbono = \frac{\%MO}{1.724} \qquad \textit{Ecuación 11}$$

$$\%CSP = \%Carbono \times 0.05 \qquad \textit{Ecuación 12}$$

Para obtener los porcentajes de formas de carbono en el suelo se analizaron un total de 40 núcleos, de los que se obtuvieron 320 submuestras en total. De éstas, 160 corresponden a las cuatro formas de carbono determinadas (COT, CSAF, CSAC, CSP), las cuales se procesaron inmediatamente después del muestreo (Tiempo 1) de tal manera que al ser

analizadas se encontraran los resultados más aproximados a la realidad. Las 160 submuestras restantes se analizaron después de haber sido conservadas en estufa durante una semana a temperatura constante (Tiempo 2). El total de resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9, Anexo I. Tablas de datos.

En la siguiente tabla se muestra cómo se compararon los resultados; de tal manera que para cada forma de carbono se promediaran los 4 datos obtenidos por profundidad en la misma área. Así, de las 320 submuestras (160 por cada tiempo), a 80 se les determino el %COT, 80 el %CSAF, 80 el %CSAC y 80 el %CSP.

Tabla 3. Comparación de muestras a la misma profundidad

Área	Profundidad (cm)	Muestras comparadas para cada forma de carbono	Resultado representativo para cada forma de carbono
Conservada	10	$AC1_{11}$, $AC1_{12}$, $AC2_{11}$, $AC2_{12}$	AC_1
	20	$AC1_{21}$, $AC1_{22}$, $AC2_{21}$, $AC2_{22}$	AC_2
	30	$AC1_{31}$, $AC1_{32}$, $AC2_{31}$, $AC2_{32}$	AC_3
	40	$AC1_{41}$, $AC1_{42}$, $AC2_{41}$, $AC2_{42}$	AC_4
	50	$AC1_{51}$, $AC1_{52}$, $AC2_{51}$, $AC2_{52}$	AC_5
Transición	10	$AT1_{11}$, $AT1_{12}$, $AT2_{11}$, $AT2_{12}$	AT_1
	20	$AT1_{21}$, $AT1_{22}$, $AT2_{21}$, $AT2_{22}$	AT_2
	30	$AT1_{31}$, $AT1_{32}$, $AT2_{31}$, $AT2_{32}$	AT_3
Agrícola	10	$AA1_{11}$, $AA1_{12}$, $AA2_{11}$, $AA2_{12}$	AA_1
	20	$AA1_{21}$, $AA1_{22}$, $AA2_{21}$, $AA2_{22}$	AA_2

Para promediar los datos se rechazaron los valores atípicos, de tal manera que, al hacer un análisis en función del tiempo y por áreas de estudio, hubiera representatividad en los datos. Las comparaciones se hicieron a través de graficas lineales y diagramas de caja y bigote (ANEXO II. Gráficos y diagramas).

Todos los datos se procesaron en los programas Excel 2010, OriginPro 8 y Minitab 19.1, donde se obtuvieron los gráficos y las correlaciones de Pearson y Spearman. De tal forma que se usaron para:

1) Relacionar las formas de carbono con las propiedades del suelo.

Para el análisis de datos se usó la correlación de Pearson y de Spearman con un intervalo de confianza del 95%, donde las formas de carbono a cada profundidad se compararon con las propiedades evaluadas. Fue necesario el uso de ambas correlaciones para tomar en cuenta el nivel de asociación de los datos, además de la significancia. En algunos casos donde $p > 5$ se usaron gráficas de dispersión para comprender el nivel de linealidad de los datos.

2) Comparar las formas de carbono en cada área.

Para relacionar las formas de carbono se usaron gráficas de barras. En primer lugar, se realizó una comparación de cada forma de carbono (incluyendo el COT) en todas las áreas; de tal manera que se revisaran las cantidades por profundidad comparando entre áreas. En segundo lugar, se compararon las formas de carbono (CSAF, CSAC y CSP) en conjunto por cada área; de tal forma que en una gráfica se colocaron las cantidades de las formas para determinar las variaciones respecto del porcentaje total. Y de esta forma advertir el cambio para elegir el o los indicadores ambientales.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III. 1 Propiedades del suelo

Los resultados de las propiedades determinadas en las áreas de estudio se presentan a continuación:

Tabla 4. Propiedades determinadas por área en el Cerro El Tintero, Acajete, Puebla

Propiedad	Profundidad	Área Conservada (AC)	Área Transición (AT)	Área Agrícola (AA)
Humedad	10	20.59	19.68	16.43
	20	19.48	11.63	12.62
	30	20.09	9.60	-
	40	16.73	-	-
	50	22.15	-	-
pH	10	5.32	6.11	6.46
	20	6.03	6.35	6.60
	30	6.05	6.51	-
	40	6.16	-	-
	50	6.11	-	-
Textura	10	Franca	Franca	Franco-arenosa
	20	Franco-arenosa	Franco-arenosa	Franco-arenosa
	30	Franco-arenosa	Franco-arenosa	-
	40	Franco-arenosa	-	-
	50	Franco-arenosa	-	-
Porosidad	10	67.96	67.41	59.72
	20	64.58	62.98	61.32
	30	64.85	58.60	-
	40	68.18	-	-
	50	66.34	-	-
Materia orgánica	10	5.22	8.36	3.31
	20	2.98	3.02	3.24
	30	2.76	1.88	-
	40	2.47	-	-
	50	1.98	-	-

La humedad en el área conservada tiene variaciones poco significativas en los primeros treinta centímetros, posteriormente desciende (30 – 40 cm) y vuelve a incrementar (40 – 50 cm) obedeciendo a la cantidad de arcillas presentes a esas profundidades, siendo 3.6% y 5.6% respectivamente; de tal forma que hay un aumento en la cantidad de arcillas con la profundidad como consecuencia de la migración de las mismas, como sucede en el trabajo de Datta et al., (2015) donde las partículas finas se encontraron en mayor proporción en las zonas más profundas obedeciendo a la traslocación de éstas desde los horizontes superficiales, y la subsiguiente iluviación. En el área de transición la humedad disminuye bruscamente desde la superficie hasta los 30 cm, esto se debe al descenso de microporosidad y al aumento de macroporosidad, ya que predomina la fracción arenosa (50% - 60%); así como se atribuye a la pérdida de agregación que corresponde a la disminución de materia orgánica, generando un descenso en la cantidad de arcillas que va del 9.6% al 5.2% por profundidad. En cuanto al área agrícola la humedad también disminuye desde la superficie hasta los 20 cm. En estas dos últimas áreas, la disminución de humedad es consecuencia de actividades antropogénicas como la extracción de materiales y actividades agrícolas; pues en comparación con el área conservada los niveles de humedad son bajos aún por profundidad (Gráfico 1).

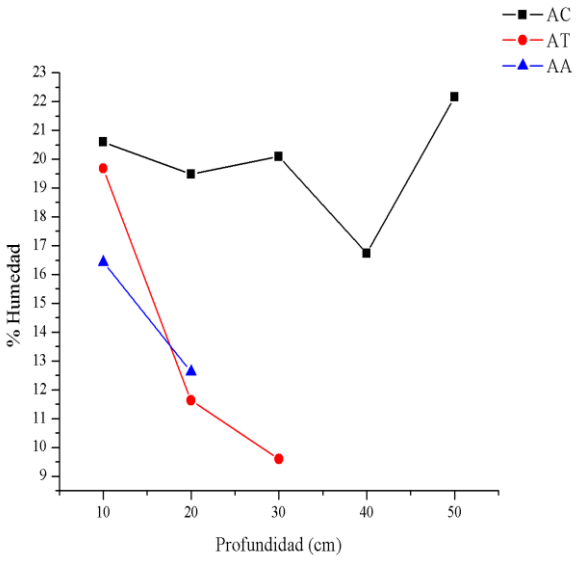


Gráfico 1. Porcentaje de humedad

El pH en el suelo del área conservada, aumenta a mayor profundidad. En los primeros 10 cm la acidez es muy alta, resultado de la cantidad de materia orgánica a esta profundidad, que en su descomposición genera acidez debido al proceso de nitrificación donde se liberan protones (Martínez et al., 2008); esta acidez contrarresta el efecto de los cationes alcalinos de tal forma que puede haber un exceso de Al, Co, Cu, Fe, Mn y Zn, así como deficiencia de Ca, K, N, Mg, Mo, P y S derivado de la cantidad de arcillas, así como de la lignina en la materia orgánica (Porta et al., 2003). Carrasco (1992) atribuye la elevada acidez a los ácidos carboxílicos y fenólicos, que se comportan como ácidos débiles, contenidos en la MOS. De los 10 a 50 cm de profundidad la acidez disminuye, así como lo hace la materia orgánica derivando en la pérdida de agregación, el aumento de porosidad y con ello el lavado de iones alcalinos que se acumulan a cierta profundidad (Gurumurthy et al., 2009; Kumar et al., 2012). En este rango de profundidad, como resultado de los valores de pH, se considera una máxima disponibilidad de nutrientes (Porta et al., 2003). Por su parte, las áreas en transición y agrícola tienen un pH más elevado, con una acidez menor (ver Gráfico 2); como resultado del lavado de iones alcalinos, algo similar a lo que ocurre en el área conservada a partir de los 10 cm de profundidad. Munny et al, (2021) también encontraron una relación de aumento del pH en el suelo con la profundidad.

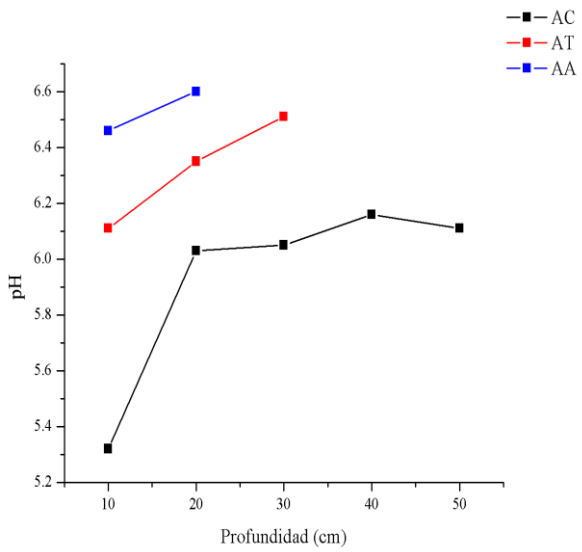


Gráfico 2. Valores de pH

La textura en las áreas conservada y de transición es franca en la parte más superficial y se vuelve franco-arenosa a mayor profundidad, cabe destacar que la arena predomina con porcentajes en un intervalo del 50% al 78% (ver Tabla 5); además la cantidad de arcillas disminuye con la profundidad en ambas áreas como resultado de la migración al interior del suelo (en el área conservada de 13.6% a 3.6%, y en el área de transición de 9.6% a 5.2%). El área agrícola es franco-arenosa con una distribución del tamaño de partículas uniforme desde la superficie hasta los 20 cm de profundidad, donde el porcentaje de arena es elevado; el porcentaje de limos se encuentra por debajo del que contienen las áreas conservada y de transición, y la cantidad de arcillas es baja, en comparación con estas mismas áreas. De tal forma que la macroporosidad en esta área es mayor y aunque favorece el laboreo se corre el riesgo de erosión hídrica y eólica, así como la disminución de la capacidad de retención de agua y nutrientes (Porta et al., 2003).

Tabla 5. Clase textural por área

Área	Profundidad	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clase textural
Conservada	10	42	44.4	13.6	Franca
	20	78	16.4	5.6	Franco-arenosa
	30	62	32.4	5.6	Franco-arenosa
	40	68	28.4	3.6	Franco-arenosa
	50	64	30.4	5.6	Franco-arenosa
Transición	10	50	40.4	9.6	Franca
	20	56	36.8	7.2	Franco-arenosa
	30	60	34.8	5.2	Franco-arenosa
Agrícola	10	68	26.4	5.6	Franco-arenosa
	20	68	26.4	5.6	Franco-arenosa

La porosidad en el área conservada se encuentra en un intervalo de 64% a 68% lo que indica una buena estructuración del espacio poroso, justificando la clase textural y la capacidad de retención de humedad de este suelo. Con respecto al área de transición, el

porcentaje de porosidad disminuye (68% a 58%) a mayor profundidad, por ello la retención de humedad se ve afectada; en cuanto al suelo dedicado a la agricultura, la porosidad aumenta ligeramente de una profundidad a otra. Según Kaurichev (1984) todos estos porcentajes se clasifican en niveles de porosidad total excelente y satisfactoria; sin embargo, el que la porosidad total sea excelente no define una proporción adecuada de macro y micro porosidad, por lo que se debe tomar en cuenta la textura y los valores porcentuales de cada fracción.

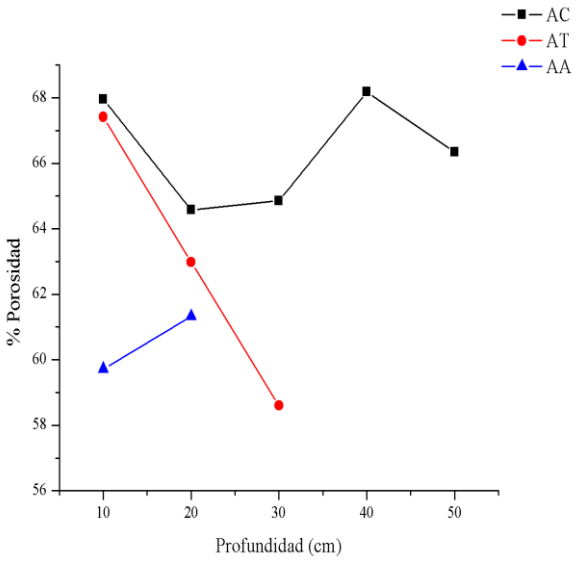


Gráfico 3. Porcentaje de porosidad

Por lo que se refiere a la materia orgánica, en el área conservada la parte más superficial contiene la mayor cantidad de ésta y va disminuyendo con la profundidad como se muestra en el Gráfico 4; esta disminución puede atribuirse a la actividad microbiana en la superficie y por las cantidades de materia orgánica fresca incorporada, lo que va mermando a mayor profundidad. En el área en transición la materia orgánica también disminuye en función de la profundidad; sin embargo, en comparación con el área conservada su porcentaje superficial es significativamente mayor dado que el tipo de vegetación (especies menores como arbustos y herbáceas) se incorpora al suelo en menos tiempo del que lo hace la vegetación en el área conservada (consistente de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas),

generando una dinámica más acelerada, de modo que la actividad microbiana aumenta por la disponibilidad de nutrientes. Por su parte, en el área agrícola la cantidad de materia orgánica comparada con las otras áreas disminuye notoriamente en la superficie ya que, al estar desprovisto de vegetación, el suelo no tiene fuente de abastecimiento de materia orgánica, y, por lo tanto, los microorganismos consumen las reservas disminuyendo su valor porcentual; según lo descrito por Jaramillo (2002) el cambio de cobertura produce disminución de ésta. Además, según Wardle (1992) el cultivo acelera la respiración microbiana aumentando la pérdida de MOS.

En síntesis, en el área conservada las propiedades del suelo se encuentran en un estado ideal para el ecosistema, dado que son las condiciones adquiridas por su génesis. Por el contrario, el área de transición se encuentra en una etapa de regeneración, donde el suelo intenta recuperar sus condiciones de origen de manera natural. En cuanto al área agrícola, se encuentra en constante cambio por las alteraciones debidas a la labranza del suelo, lo que progresivamente genera una haploidización (Porta et al., 2003) y la pérdida de productividad (Ghani et al., 2003).

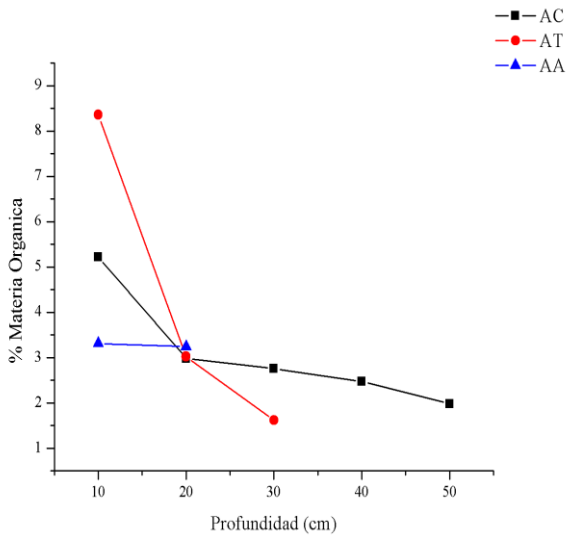


Gráfico 4. Porcentaje de materia orgánica

III.2 Formas de carbono en el suelo

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos a través del análisis estadístico con comparaciones gráficas para determinar un valor promedio representativo del conjunto de datos a la misma profundidad en cada área; éstos se usaron para realizar todas las comparaciones necesarias del presente trabajo.

Tabla 6. Porcentajes de formas de carbono por área

Tiempo	Área	Profundidad	% COT	Formas de carbono		
				% CSAF	% CSAC	% CSP
1	Conservada	10	3.03	0.30	0.72	0.71
		20	1.73	0.25	0.63	0.46
		30	1.60	0.29	0.48	0.37
		40	1.43	0.25	0.43	0.42
		50	1.15	0.29	0.38	0.29
	Transición	10	4.85	0.46	0.64	0.33
		20	1.75	0.55	0.51	0.33
		30	1.09	0.33	0.45	0.26
	Agrícola	10	1.92	0.25	0.53	0.50
		20	1.88	0.30	0.82	0.41
2	Conservada	10	5.58	0.45	0.77	0.75
		20	2.11	0.45	0.45	0.63
		30	1.65	0.40	0.38	0.54
		40	1.50	0.45	0.19	0.46
		50	1.11	0.40	0.25	0.42
	Transición	10	5.44	0.29	0.87	0.67
		20	1.73	0.19	0.43	0.39
		30	1.07	0.19	0.33	0.33
	Agrícola	10	2.30	0.19	0.19	0.50
		20	1.95	0.38	0.29	0.33

COT - Carbono Orgánico Total, CSAF - Carbono Soluble en Agua Fría, CSAC - Carbono Soluble en Agua Caliente, CSP – Carbono Soluble en Pirofosfato

III.2.1 Formas de carbono respecto a las propiedades evaluadas por profundidad

En la Tabla 7 se muestran los resultados de la correlación de Pearson entre las propiedades y formas de carbono por área; cabe resaltar que también se tomaron en cuenta datos de la correlación de Spearman, cuyos resultados se encuentran en la Tabla 10, Anexo I.

Tabla 7. Coeficiente de correlación de Pearson entre propiedades del suelo y formas de carbono

Propiedad	Área	% COT	% CSAF	% CSAC	% CSP
Humedad	Conservada	0.094	**0.753**	0.051	-0.083
	Transición	**1.000**	0.077	**0.993**	**0.656**
	Agrícola	**1.000**	**-1.000**	**-1.000**	**1.000**
pH	Conservada	**-0.974**	-0.569	**-0.819**	**-0.922**
	Transición	**-0.978**	-0.289	**-0.996**	**-0.803**
	Agrícola	**-1.000**	**1.000**	**1.000**	**-1.000**
Textura (% arcillas)	Conservada	**0.939**	0.650	**0.780**	**0.865**
	Transición	**0.963**	0.349	**0.988**	**0.839**
	Agrícola	-	-	-	-
Textura (% limos)	Conservada	0.637	**0.810**	0.239	0.536
	Transición	**0.987**	0.243	**0.999**	0.773
	Agrícola	-	-	-	-
Textura (% arenas)	Conservada	-0.762	**-0.808**	-0.413	-0.664
	Transición	**-0.978**	-0.289	**-0.996**	-0.803
	Agrícola	-	-	-	-
Porosidad	Conservada	0.355	0.098	0.024	0.438
	Transición	**0.948**	0.394	**0.979**	**0.864**
	Agrícola	**-1.000**	**1.000**	**1.000**	**-1.000**
Materia orgánica	Conservada	**1.000**	0.414	**0.895**	**0.976**
	Transición	**1.000**	0.083	**0.993**	**0.661**
	Agrícola	**1.000**	**-1.000**	**-1.000**	**1.000**

- Humedad

La humedad en el área conservada correlaciona directamente con el CSAF ($r = 0.753$, $p > 0.05$), es decir, si la humedad aumenta también lo hace el CSAF, y viceversa; sin embargo, los valores se asocian solo en un 57%. Las demás formas de carbono en esta área no se relacionan con esta propiedad. Teniendo en cuenta que el CSAF se encuentra disuelto en la solución del suelo, se esperaba afinidad con la humedad de forma similar a lo que ocurre en el trabajo de Gauthier et al., (2009) donde su dinámica tiene estrecha correlación con esta propiedad en suelos forestales nativos y de plantación.

En el área de transición el CSAF es la única forma de carbono que no correlaciona con la humedad, condición que pudo presentarse por la modificación de otras propiedades; las demás formas correlacionan directamente: COT ($r = 1$, $p \leq 0.05$), CSAC ($r = 0.99$, $p \leq 0.05$) y CSP ($r = 0.65$, $p > 0.05$), aunque la asociación es muy débil con esta última, y su nivel de significancia es mayor a 0.05.

El COT en el área conservada no correlaciona con la humedad, pero en el área de transición la afecta de forma directa con respecto a la profundidad; lo que sucede en este ultimo caso puede derivarse de la influencia que tiene la materia orgánica en la disponibilidad de agua (Anaya et al., 2016), ya que la cantidad de COT es superior en el área de transición sobre la conservada. Lo anterior corresponde a que dentro del área de transición el reciclamiento de carbono es más dinámico dada la incorporación de biomasa con estructuras mas sencillas.

Wang et al., (2020) reportan que el CSAC no se relaciona con la humedad, condición que se cumple en el área conservada, pero que es contradictoria en el área en transición.

En el caso del área agrícola las relaciones entre humedad y formas de carbono son lineales dado que solamente se muestrearon 2 profundidades: donde el COT y CSP correlacionan directamente, es decir, al disminuir el parámetro con la profundidad también disminuyen las formas; y el CSAF y CSAC correlacionan inversamente, es decir que, a mayor profundidad, mientras disminuye la humedad las formas aumentan.

- pH

El pH en las áreas conservada y de transición correlaciona inversamente con el COT ($r = -0.974$, $p \leq 0.05$; $r = -0.978$, $p > 0.05$), el CSAC ($r = -0.819$, $p \leq 0.05$; $r = -0.996$, $p > 0.05$) y con el CSP ($r = -0.922$, $p \leq 0.05$; $r = -0.803$, $p > 0.05$), aunque en el área en transición con una significancia mayor a 0.05; en cuanto al CSAF no depende del pH pues sus valores de correlación son muy bajos. En el área agrícola el comportamiento de los datos indica que el pH correlaciona indirectamente con el COT y CSP, y directamente con el CSAF y CSAC.

En todas las áreas hay una correlación indirecta del COT con el pH, dado que el COT proviene de la MOS que influye en los niveles de pH; así al haber mayor cantidad de MOS el suelo tiende a la acidificación. La misma correlación indirecta ocurre en todas las áreas con el CSP; de tal forma que al aumentar la acidez es mayor la concentración de esta forma.

En las áreas conservada y de transición se tiene una relación indirecta del pH con el CSAC, contrario a lo que sucede en el área agrícola. Este hecho corresponde a la influencia que tiene el pH sobre la MOS y la biota del suelo (Geissen y Morales, 2006) cuya actividad puede aumentar o disminuir respecto al valor de este parámetro.

- Textura

Las formas de carbono se correlacionaron con los valores texturales por fracción (arcillas, limos y arenas). Cabe destacar que en el área agrícola la textura se mantiene con la profundidad, es por ello que no presenta una correlación con las formas de carbono.

El porcentaje de arcillas se asocia directamente con el COT en las áreas conservada y de transición ($r = 0.939$, $p \leq 0.05$; $r = 0.963$, $p > 0.05$) habiendo mayor afinidad de datos en esta última área según el resultado obtenidos mediante el coeficiente de Spearman ($\rho = 1$), aun cuando la significancia supera 0.05. El CSAC y CSP correlacionan con esta fracción más fuertemente en el área de transición ($r = 0.988$, $p > 0.05$; $r = 0.839$, $p > 0.05$) que en la conservada ($r = 0.780$, $p > 0.05$; $r = 0.865$, $p > 0.05$), sin embargo, el nivel de significancia es superior a 0.05.

El porcentaje de limos en el área conservada solamente correlaciona con el CSAF ($r = 0.810$, $p > 0.05$; $\rho = 0.95$, ≤ 0.05); en cambio, en el área en transición existe correlación con el COT y CSAC ($r = 0.99$, $p > 0.05$; $r = 0.99$, $p \leq 0.05$). Las arenas correlacionan de manera similar que los limos, pero de forma inversa; en el área conservada con el CSAF ($r = -0.808$, $p > 0.05$), y en el área de transición con el COT y CSAC ($r = -0.98$, $p > 0.05$; $r = -0.99$, $p > 0.05$).

En los resultados obtenidos de los estudios de Sharma et al., (2014) y Geraei et al., (2016) el CT está débilmente correlacionado con la textura del suelo, estos autores observaron que el COS aumenta cuando la textura se vuelve más fina. Schöning y Kögel-Knabner (2006); Munny et al., (2021) y Bellè et al., (2021) reportan que las arcillas se relacionan favorablemente con el COS, hallazgos que se alinean a los resultados obtenidos en las áreas conservada y de transición de este estudio.

El CSAF en el área conservada correlaciona con los limos directamente y con las arenas inversamente; en relación a este hecho, Weigel et al., (2011) y Ćirić et al., (2016) indican que el CSAF tiende a relacionarse mayormente con las fracciones gruesas (arenas), por el contrario, Franzluebbers (1999) reportó correlaciones directas entre esta forma de carbono y las arcillas.

Lützow et al., (2006) atribuyen la estabilización del carbono complejo a la presencia de arcillas y limos; para este trabajo la cantidad de arcillas juega un papel importante en la cantidad de CSP, tanto en el área conservada como la de transición. Geraei et al., (2016) reportan que CSP correlaciona significativamente con la textura, ya que puede estar unido a las arcillas y/o limos en forma de complejos organominerales.

- Porosidad

La porosidad en el área conservada no correlaciona con ninguna forma de carbono, en cambio en el área de transición hay correlación directa con el CT, CSAC y CSP ($r = 0.95$, $r = 0.98$, $r = 0.86$; $p > 0.05$), aunque el valor de significancia supera el 0.05; por su parte el área agrícola correlaciona inversamente con el COT y el CSP, y directamente con el CSAF y CSAC.

- Materia Orgánica

El porcentaje de materia orgánica en todas las áreas se correlaciona perfecta y directamente con el COT puesto que de un dato deriva el otro. El CSAC también se correlaciona con la MOS en todas las áreas, pero de manera inversa en el área agrícola ($r = 0.895$, $p \leq 0.05$; $r = 0.99$, $p > 0.05$; $r = -1$, $p \leq 0.05$); es decir, en esta última área a mayor profundidad la MOS disminuye mientras el CSAC aumenta. El CSAF solamente se correlaciona con la MOS en el área agrícola, y lo hace de forma inversa. Finalmente, el CSP está asociado a la cantidad de MOS por profundidad en el área conservada ($r = 976$, $p \leq 0.05$) y agrícola ($r = 1$, $p \leq 0.05$).

La materia orgánica es una propiedad muy compleja, y debido a su dinámica es considerada un indicador fino en la matriz del suelo (Trimble et al., 2018). En esta matriz la MOS sufre un proceso natural de mineralización que se intensifica cuando las cantidades de ésta aumentan, generando un incremento de las fracciones lábiles (Jensen et al., 2019). Además, en el área conservada, un punto a favor del aumento de la MOS reside en el mantillo (capa de orgánicos como la hojarasca) que es la principal fuente de depósitos lábiles (Uselman et al., 2012; Balaria y Johnson, 2013). En efecto, los datos obtenidos en este trabajo muestran una asociación directa en el aumento de la fracción más lábil (CSAC) con respecto del incremento en la MOS, tal es el caso en las áreas conservada y de transición. Sin embargo, en el área agrícola la asociación es indirecta, pues entre mayor es la cantidad de MOS menor es la porción de CSAC. En este sentido se sospecha que la población de microorganismos ha disminuido dadas las condiciones de labranza como el volteo del suelo, quema (Wang et al., 2020), barbecho y falta de cobertura vegetal que ocasiona aumento de temperatura y modifica las condiciones de supervivencia de los microorganismos; razón por la cual la mineralización se ha visto limitada.

III.2.2 Revisión del comportamiento de las formas de carbono como indicador ambiental

En el pasado, distintos autores han abordado los efectos que origina el cambio de vocación del suelo sobre las formas de carbono que existen en éste (Ghani et al., 2003; Ćirić et al., 2016). Esta situación deriva de la explotación de ecosistemas naturales cuando hay un cambio de vocación del suelo pasando de un ecosistema forestal a uno fragmentado por la agricultura. Es así como se han alterado las características naturales del suelo limitando el crecimiento de vegetación y provocando la liberación de CO_2 a la atmósfera (Ahirwal et al., 2021).

Las formas de carbono solubles en agua caliente y fría representan el COS lábil; el CSAC contiene fracciones más lábiles que las de CSAF, por lo que en adelante se usarán los términos “lábiles primarias” y “lábiles secundarias” para distinguirlas. Cabe resaltar que las formas lábiles son las más sensibles a los cambios del uso del suelo, por lo que en el pasado se han usado como indicadores ambientales (Ghani et al., 2003). Las formas de carbono solubles en pirofosfato, en cambio, son formas complejas, estables y más resistentes a la descomposición; conviene recordar que estas formas son complejos organometálicos unidos a Fe y Al.

III.2.2.1 Comparación de cada forma de carbono en todas las áreas

- COT, Carbono Orgánico Total

En el T1 el COT disminuye con la profundidad en todas las áreas. El mismo resultado lo obtuvieron Niu et al., (2021).

En las áreas conservada y de transición el COT su comportamiento es igual con respecto a la profundidad. En el área conservada la disminución es significativa de los 10 a 20 cm; a mayor profundidad es menor. Sin embargo, en el área de transición la disminución es muy drástica ya que a mayor profundidad el COT se reduce a la mitad. Por su parte, en el área

agrícola, aunque hay disminución es poco significativa; esta condición puede deberse al manejo del suelo, donde hay una mezcla de los horizontes respecto a la profundidad.

Como se observa en el Gráfico 5, en los primeros 10 cm de profundidad el área con mayor cantidad de COT es la de transición, después la conservada y finalmente la agrícola. De los 10 a los 20 cm de profundidad no hay una variación significativa del COT ($\sigma = \pm 0.08$) entre las áreas. Y de los 20 a 30 cm la cantidad de COT en las áreas conservada y de transición disminuye con respecto a la profundidad.

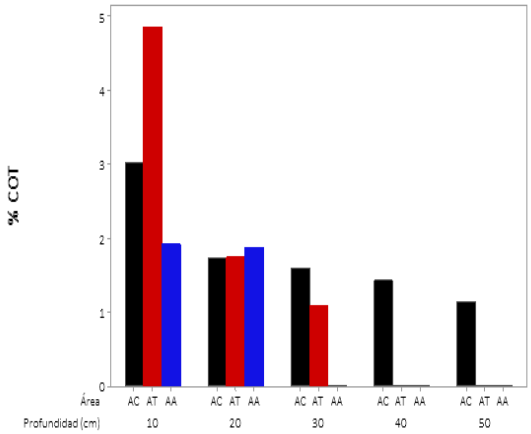


Gráfico 5. Porcentaje de Carbono Orgánico Total (COT) por área, tiempo 1 (T1)

Como sucede con la materia orgánica, estas variaciones pueden ser resultado de la modificación de la vegetación en cada área, de manera que la actividad microbiana también cambia. Murphy et al., (1998) reportaron que la capa más superficial del suelo contiene la mayor concentración de biomasa microbiana; a su vez, los suelos conservados contienen la mayor cantidad (Ghani et al., 2003). En este sentido, al haber una menor cantidad de MOS en las áreas de manejo agrícola, la población microbiana pudo ser efactada y por lo tanto, el consumo de carbono podría estar incrementado.

Por otro lado, las diferencias más notables se observan en la parte más superficial, donde la disminución del COT puede explicarse por la exposición del suelo con la atmósfera, teniendo en cuenta la diferencia en cobertura vegetal. Esta situación se origina por el cambio

de vocación del suelo (Geraei et al., 2016) que permite la liberación de carbono afectando las reservas de COT (Munny et al., 2021; Yimer et al., 2006).

Ghani et al., (2003); Selassie y Ayanna (2013); Ahirwal et al., (2021); Munny et al., (2021) y Malepfane et al., (2022), reportaron que en los suelos conservados hay mayor cantidad de COT que en los de vocación agrícola, y también que en aquellos con distintos tipos de vegetación (Bellè et al., 2021), tal como sucede en el presente trabajo. Esto se debe a que en el área conservada la tasa de incorporación de MOS, de donde proviene el COT, es continua y diversa; en cambio en el área agrícola el suelo perdió esa diversidad y cobertura por lo que la tasa de incorporación de MOS disminuyó.

Adicionalmente, hay que considerar que la estabilización y permanencia del carbono dentro del suelo depende de la protección física dentro de los agregados del suelo (Kaiser y Asefaw Berhe, 2014). Esta protección se modifica cuando hay alteración en las propiedades del suelo (Six et al., 2002; Kaiser y Asefaw Berhe, 2014) lo que, como ya se abordó anteriormente, sucede en las áreas de transición y agrícola.

En el Tiempo 2 el COT también desciende con la profundidad en todas las áreas. Como se observa en el Gráfico 6, en los primeros 10 cm de las áreas conservada y de transición la cantidad de COT es muy elevada comparada tanto con el área agrícola, como con las cantidades presentes a mayor profundidad. Además, de los 10 a 20 cm las disminuciones van en el orden: conservada > agrícola > transición; y la variación es más significativa que en el tiempo 1 ($\sigma = \pm 0.19$). Si se comparan los porcentajes de COT en función del tiempo, en las áreas conservada y agrícola el COT aumenta. Esto también sucede en los primeros 10 cm del área de transición, posteriormente disminuye.

De lo anterior, se puede intuir que, como expresan Murphy et al., (1998), la mayor cantidad de microorganismos se encuentra en la parte más superficial. Que la biomasa microbiana disminuye drásticamente en la superficie cuando la vocación es agrícola. Y que al exponer el suelo a una temperatura constante durante una semana hay aumento del COT

que puede deberse a la muerte de los microorganismos por disminución de la humedad (Zewen et al., 2020).

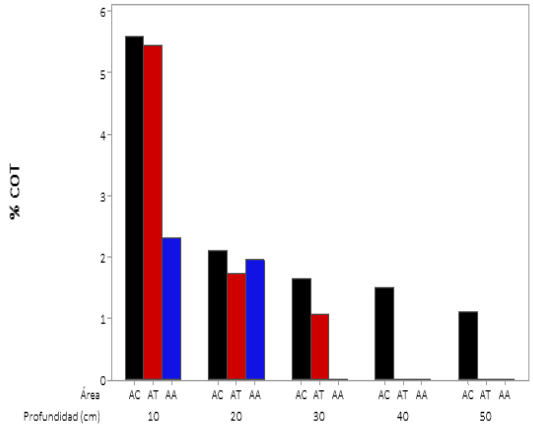


Gráfico 6. Porcentaje de Carbono Orgánico Total (COT) por área, tiempo 2 (T2)

- CSAF, Carbono soluble en Agua Fría

El CSAF proviene del carbono orgánico disuelto (Gauthier et al., 2009). Éste, depende de factores ambientales como la temperatura, precipitación y vegetación, y de factores antrópicos como el uso del suelo con vocación agrícola (Chantigny, 2003).

En el área conservada el CSAF se comporta de forma sinusoidal, de manera que las variaciones son leves con la profundidad y se tiene un comportamiento continuo; esto puede deberse a la distribución uniforme de estas partículas en la solución del suelo. El área de transición tiene un comportamiento parabólico, en ésta el contenido de CSAF es superior que en las otras dos áreas; además la cantidad máxima se encuentra de los 10 a 20 cm. En el área agrícola hay un aumento por profundidad, pero comparada con los primeros 20 cm del área conservada el comportamiento es inverso (Gráfico 7). Esta condición puede ser generada por la mezcla de horizontes durante las labores agrícolas; además de la actividad microbiana que es superior en la parte más superficial.

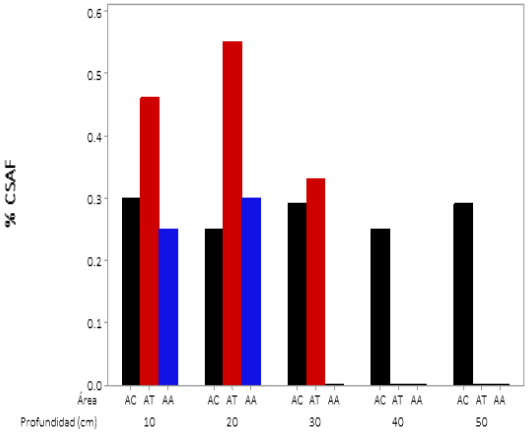


Gráfico 7. Porcentaje de Carbono Soluble en Agua Fría (CSAF) por área, tiempo 1 (T1)

En las áreas conservada y agrícola, el comportamiento del CSAF es similar con el paso del tiempo. En el área de transición, al comparar el T1 y T2, se observa disminución. En cuanto a las cantidades de CSAF, aumentan en el área conservada, disminuyen en el área de transición y en el área agrícola disminuyen en la parte más superficial y aumentan de los 10 a 20 cm de profundidad (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Gráfico 8. Porcentaje de Carbono Soluble en Agua Fría (CSAF) por área, tiempo 2 (T2)

Ćirić et al., (2016) y Corvasce et al., (2006), reportan que tanto en suelos inalterados como en aquellos usados para la agricultura el CSAF presenta un comportamiento descendente respecto a la profundidad, contrario a lo que sucede en el presente estudio,

donde las variaciones presentan un comportamiento sinusoidal en el área conservada, parabólico en la de transición, y en aumento en la agrícola.

En relación con las diferencias entre áreas, en el cambio de vocación de Conservada a Agrícola no hay un cambio en la cantidad, sino más bien en profundidad ya que las porciones se comportan de manera inversa. Lo anterior es contrario a lo reportado por Geraei et al., (2016), ya que informa que el CSAF tiende a disminuir en suelos agrícolas.

En cuanto al tiempo de incubación y bajo condiciones controladas Gauthier et al., (2009) informan que el CSAF disminuye más del 50% después de haberse incubado el suelo (que en su estudio fue de 98 días). En la presente investigación, el tiempo de incubación fue de una semana, y los resultados arrojaron que solamente en el área de transición hay disminución. De tal suerte que el CSAF, como indicador podría usarse para identificar las áreas que se encuentran en transición; y diferenciarlas de las agrícolas que han sido abandonadas recientemente.

- CSAC, Carbono soluble en Agua Caliente

Ćirić et al., (2016); Geraei et al., (2016); Hamkalo y Bedernichek (2014), encontraron que el CSAC es más sensible al cambio de vocación por actividades agrícolas que el CSAF, de tal suerte que puede ser usado como un indicador temprano de la calidad del suelo (Bankó et al., 2021; Haynes, 2005). Cabe resaltar que la sensibilidad puede originarse porque el CSAC tiene una tasa de biodegradabilidad más alta que el CSAF (Geraei et al., 2016).

En el tiempo 1 el porcentaje de CSAC en las áreas conservada y de transición disminuye gradualmente con la profundidad; aunque en la primera el porcentaje es más elevado. Por su parte, en el área agrícola hay un aumento con la profundidad. En los primeros 10 cm el porcentaje de CSAC en cada área disminuye en el siguiente orden: conservada > transición > agrícola. Sin embargo, de los 10 a 20 cm el área agrícola no sigue esta tendencia, sino que hay un aumento de hasta un 50%; además de que, en esta área y a esta profundidad se encuentra la mayor cantidad de CSAC de todas las áreas (Gráfico 9). La situación puede ser resultado de la fertilidad autóctona del suelo, ya que durante la producción de cultivos se

genera una ganancia de fracciones lábiles (Soussana et al., 2004). Además, al no haber incorporación de MOS y exposición de microorganismos durante las actividades agrícolas (como barbecho, volteo del suelo y abandono) la mineralización se pudo ver afectada.

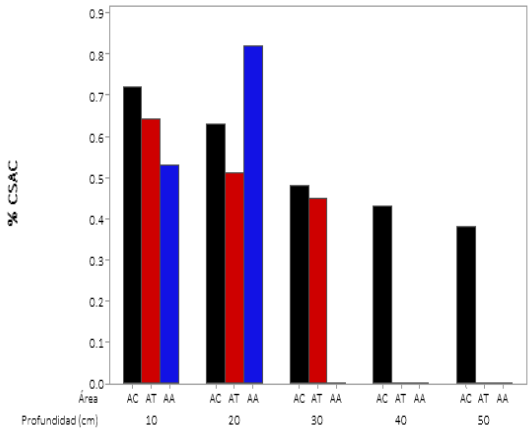


Gráfico 9. Porcentaje de Carbono soluble en agua caliente (CSAC) por área, tiempo 1 (T1)

En cuanto a las diferencias entre áreas, Ćirić et al., (2016) hallaron disminución sustancial comparando entre los suelos conservados y agrícolas. En este trabajo, esta aseveración se cumple en los primeros 10 cm, pero de los 10 a los 20 cm se contradice. Dicha contradicción podría ser resultado de la concentración de biomasa microbiana en la superficie (Murphy et al., 1998), o del movimiento que sufre el suelo durante las actividades agrícolas (como es el volteo del suelo).

En el tiempo 2 el CSAC sigue la misma tendencia respecto de la profundidad en todas las áreas. Sin embargo, con el paso del tiempo, en las áreas de transición y conservada en los primeros 10 cm de profundidad hay un aumento de esta forma de carbono y a partir de los 10 cm hay una disminución. Mientras que en el área agrícola hay disminución drástica (Gráfico 10).

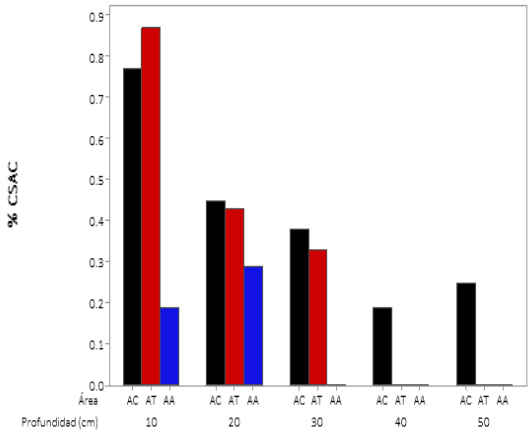


Gráfico 10. Porcentaje de Carbono soluble en agua caliente (CSAC) por área, tiempo 2 (T2)

Según lo reportado por Ćirić et al., (2016) en los suelos conservados el CSAC disminuye con la profundidad, tal como sucede en este trabajo. Además, señalan que no hay variaciones significativas en suelos sometidos a la agricultura; contrario a lo que sucede en este trabajo en dicha área, ya que, en vez de disminuir con la profundidad, aumenta.

El CSAC, se podría usar como indicador de la pérdida de carbono lábil en condiciones de exposición a temperaturas elevadas. Además de considerarlo como un indicador de pérdida en la parte más superficial del suelo.

- CSP, Carbono soluble en Pirofosfato

En el tiempo 1 todas las áreas tienen una disminución del CSP conforme a la profundidad. Al realizar la comparación entre áreas, el porcentaje de CSP disminuye en el orden: conservada > agrícola > transición. En esta última área, en los primeros 20 cm se mantiene la cantidad y posteriormente disminuye un 20% (Gráfico 11). Las diferencias entre las áreas pueden ser originadas por la cantidad de MOS incorporada y la diversidad de la misma; ya que al haber un cambio de vocación para introducir un monocultivo se genera pérdida de agregación (Wang et al., 2021). Al haber pérdida de agregación, en las dos últimas áreas puede ocurrir una disminución de los complejos organometálicos en la parte más superficial porque éstos se iluviaron en horizontes más profundos (Dorronsoro, s.f.).

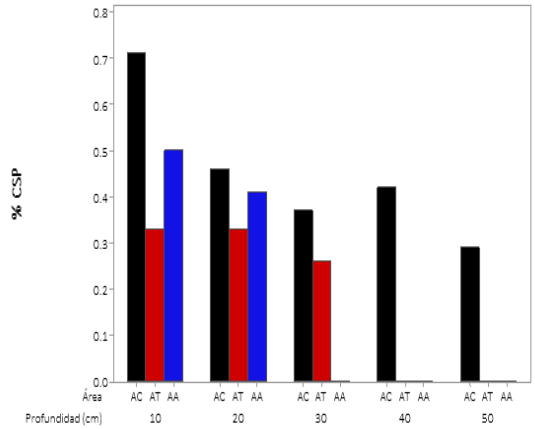


Gráfico 11. Porcentaje de Carbono soluble en pirofosfato (CSP) por área, tiempo 1 (T1)

El comportamiento del CSP es similar en todas las áreas en función del tiempo. No obstante, en las áreas conservada y de transición hay un aumento de estas formas; en el área agrícola desde la parte superficial hasta los 10 cm se mantiene la porción y de los 10 a 20 cm hay disminución (Gráfico 12).

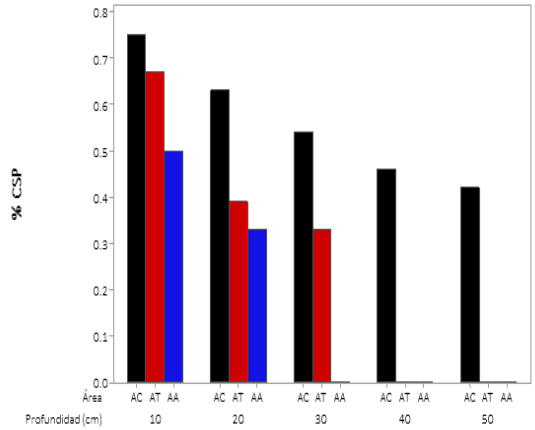


Gráfico 12. Porcentaje de Carbono soluble en pirofosfato (CSP) por área, tiempo 2 (T2)

La cantidad de formas complejas en el área de transición es menor que en las otras áreas, condición que puede estar dada por la acelerada dinámica de transformación del carbono por parte de los microorganismos. Además, es probable que no haya CSP por las bajas cantidades de Al y Fe que permitan la formación de éstas.

El CSP, más que ser un indicador de pérdida de carbono complejo, puede usarse para indicar la recuperación del suelo con vocación agrícola. Además, indica la pérdida o asociación de metales en el suelo, como fierro y aluminio. Dichos metales provienen de la incorporación de MOS, y al disminuir tanto la diversidad como la cantidad de ésta, los complejos no pueden formarse. Además, hay que tomar en cuenta que, al cambiar la vocación y uso del suelo, las condiciones se modifican de forma que disminuye la producción de los mismos, aun cuando estos existan.

III.2.2.2 Comparación de las formas de carbono por área

Para comparar los cambios respecto al tiempo se decidió promediar las formas de carbono en cada área, como se muestra en la siguiente tabla de datos.

Tabla 8. Diferencias en las formas de carbono en cada área, respecto al tiempo

Área	Forma de carbono	Total, de la forma de carbono		Comportamiento (T1 - T2)	% de diferencia (T1 - T2)
		T1	T2		
Conservada	% CSAF	0.276	0.430	aumento	35.81
	% CSAC	0.528	0.408	disminución	22.73
	% CSP	0.450	0.560	aumento	19.64
Transición	% CSAF	0.447	0.223	disminución	50.11
	% CSAC	0.533	0.543	aumento	1.84
	% CSP	0.307	0.463	aumento	33.69
Agrícola	% CSAF	0.275	0.285	aumento	3.51
	% CSAC	0.675	0.240	disminución	64.44
	% CSP	0.455	0.415	disminución	8.79

- Área conservada

En el T1 las formas de carbono primarias, es decir, las más lábiles (CSAC) se encuentran en mayor proporción, seguidas de las formas complejas (CSP) y de las formas lábiles secundarias (CSAF). Conforme pasa el tiempo (T2) las formas complejas y las lábiles

secundarias aumentan (19.64% y 35.81%, respectivamente), y las formas lábiles primarias disminuyen poco más del 20%; de tal suerte que la tasa de cada forma de carbono respecto al tiempo se encuentra en el orden CSP > CSAF > CSAC.

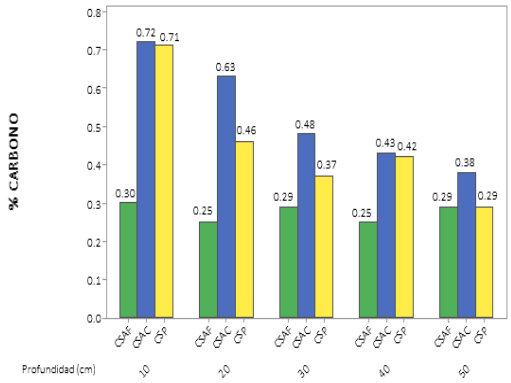


Gráfico 13. Formas de carbono en Área Conservada, tiempo 1 (T1)

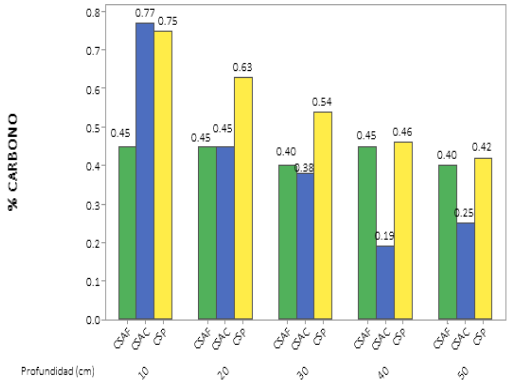


Gráfico 14. Formas de carbono en Área Conservada, tiempo 2 (T2)

De lo anterior se puede advertir que, con el paso del tiempo, en un entorno natural que se expone a ciertas condiciones de temperatura, disminuyen las formas más lábiles y aumentan las complejas. Obviando que los microorganismos, expuestos a una temperatura mayor que la de su ambiente natural, aprovechan el carbono más simple porque hay una gran reserva.

Con todo y lo anterior, es importante considerar que, con el paso del tiempo y el cambio de propiedades dadas las nuevas condiciones, los microorganismos pueden sobrevivir o morir. Los primeros se adaptarán y podrán reproducirse, los otros al no adaptarse sufren el decaimiento y se convierten en materia orgánica fresca. De este nuevo material de incorporación se obtienen los complejos organometálicos, al enlazarse químicamente con minerales como Al y Fe (Dorronsoro, s.f.). Además, la ganancia de carbono disuelto en la solución del suelo (CSAF) se debe a la incorporación de raíces y microorganismos que con la temperatura y oxidación se transforman en carbohidratos simples.

- Área de transición

En esta área en el T1 las formas complejas (CSP) son las que se encuentran en menor proporción. Las formas lábiles secundarias (CSAF) se encuentran en segunda posición de abundancia. Y las formas más lábiles (CSAC) son las que predominan.

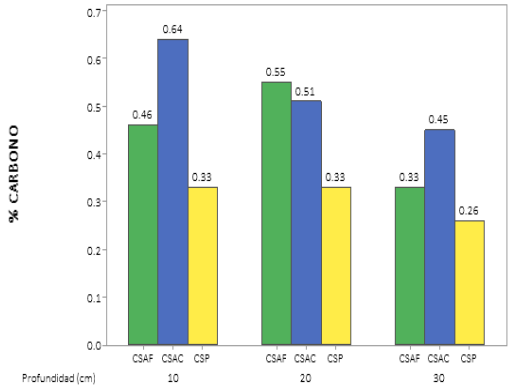


Gráfico 15. Formas de carbono en Área de Transición, tiempo 1 (T1)

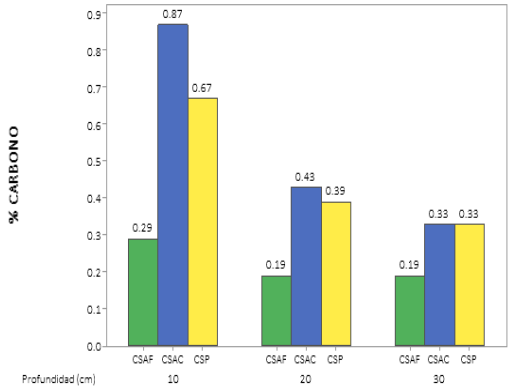


Gráfico 16. Formas de carbono en Área de Transición, tiempo 2 (T2)

Los resultados anteriores demuestran que en esta área la tasa de formas de carbono complejas es menor que la de las lábiles. Esta situación puede deberse a que, a diferencia del área conservada, la tasa de incorporación de MOS es menor y las condiciones de formación de los complejos organominerales no son propicias. Al haber reciclamiento de especies herbáceas y arbustivas que han crecido en esta área después de su abandono, y que tienen estructuras químicamente más sencillas, hay predominancia de formas lábiles. Por otro lado, puede suceder que los microorganismos estén usando las formas complejas y como parte de su descomposición procedan las formas lábiles que ahora se encuentran disponibles (CSAC) o disueltas en la solución del suelo (CSAF). Además, cabe considerar la probable disminución o disponibilidad de iones minerales como el aluminio y fierro, sin los cuales no se pueden formar los complejos solubles en pirofosfato.

En el T2 las formas lábiles secundarias sufren una disminución drástica del 50%, además son éstas las que se encuentran en menor proporción, seguidas de las complejas que en comparación con T1 aumentan poco más del 30%. En cuanto a las formas más lábiles, son

las que predominan; con el paso del tiempo éstas sufren un aumento que se considera despreciable al compararlas con la modificación que sufren las otras formas.

Al respecto de lo anterior, conviene suponer que con el paso del tiempo y la temperatura constante la humedad cambió. De tal forma que el CSAF que se encontraba disuelto en la solución del suelo se aprovechó por los microorganismos antes que el CSAC. Además, Geraei et al., (2016) reportan que el CSAF es más sensible en los suelos de pastizales, por lo que podría haber cierta relación entre el área de Transición con estos. Dicha relación se deriva de la cubierta vegetal con estructuras más sencillas y fácilmente descomponibles.

En cuanto al CSP aumentó debido a la formación de complejos organominerales. Y a la preferencia de aprovechamiento de las formas lábiles, que son de estructura más sencilla y fácilmente descomponible.

- Área agrícola

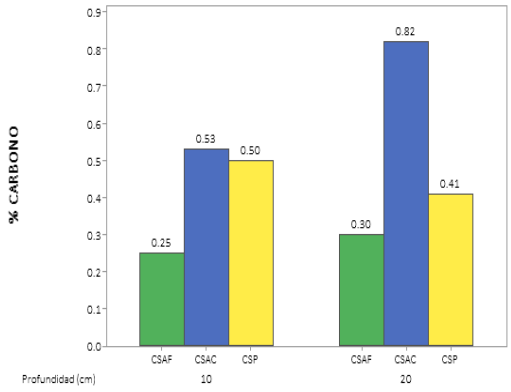


Gráfico 17. Formas de carbono en Área Agrícola, tiempo 1 (T1)

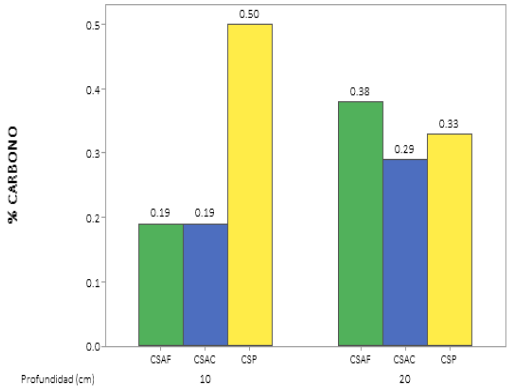


Gráfico 18. Formas de carbono en Área Agrícola, tiempo 2 (T2)

En esta área las formas lábiles tienen comportamiento inverso comparado con lo que sucede en las otras dos áreas; es decir, en vez de disminuir con la profundidad aumentan. Pero las formas complejas sí tienen el mismo comportamiento de disminución respecto de la profundidad.

En el T1 y T2, las formas de carbono se encuentran en orden de disminución porcentual como en el área conservada: CSAC > CSP > CSAF y CSP > CSAF > CSAC, respectivamente. Como es evidente, al pasar el tiempo las formas más lábiles disminuyen drásticamente (hasta un 64.44%). Las formas restantes con el paso del tiempo no tienen una alteración significativa.

En su estudio, Geraei et al., (2016) reportan que el contenido de CSP es mayor en el área agrícola que en el área conservada. Sin embargo, en el presente estudio el CSP solo es mayor en el área agrícola comparada con la de transición, no con la conservada.

El cambio de vocación del suelo, especialmente el de uso agrícola conduce al agotamiento de las reservas de COS en todas sus formas; esta situación es generada por procesos de oxidación o mineralización, lixiviación o translocación, y erosión por escorrentía de agua o viento (Lal, 2002). Al agotarse las reservas se emite CO_2 que en suelos agrícolas es mayor debido a las diferencias en la vegetación y actividad microbiana (Ahirwal et al., 2021).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- En el área conservada se encuentra la mayor diversidad de vegetación, con todo tipo de especies (arbóreas, arbustivas y herbáceas); además, es la única que contiene un mantillo de hojarasca.
- El área de transición perdió diversidad, y contiene algunas especies arbustivas y herbáceas cubriendo el suelo.
- En el área agrícola el suelo se encuentra descubierto en mayor proporción, y solamente contiene restos de monocultivo.
- El área conservada mantiene las propiedades adquiridas por su génesis, el área de transición se encuentra en una etapa de recuperación de las propiedades que perdió por el cambio de vocación, y el área agrícola apunta a un estado continuo de pérdida de propiedades.
- Las propiedades del suelo correlacionan con el carbono de forma distinta en cada área:
    - En el área agrícola las formas de carbono correlacionan con la humedad, pH, porosidad y materia orgánica dado que solo hay datos en dos profundidades. La textura no se correlaciona porque no hay cambios en la proporción de las fracciones con la profundidad.
    - El COT, CSAC y CSP se asocian con la humedad en el área de transición. En la conservada se asocia el CSAF.
    - En todas las áreas el COT, CSAC y CSP se asocian con pH y materia orgánica. Cuando hay relación directa de estas formas con el pH la relación es inversa con la materia orgánica, y viceversa.
    - En las áreas conservada y de transición el COT, CSAC y CSP correlacionan con las arcillas.

- En el área conservada ninguna forma de carbono está asociada a la porosidad; en cambio en el área de transición el COT, CSAC y CSP se asocian a esta propiedad.

Conclusiones de los indicadores ambientales

- Con la disminución de material orgánico entre áreas, la forma generalizada de carbono (COT) disminuye; lo cual podría indicar que la actividad microbiana promueve o reduce la formación de alguna forma de carbono.
- El CSAF puede considerarse un indicador de recuperación de formas complejas como el CSP, ya que en las áreas que sufrieron un cambio de vocación las formas complejas se mantienen o incrementan y el carbono secundario disminuye; además, esta forma es la de mayor pérdida en el área de transición.
- El CSAC se puede usar como indicador de la pérdida de carbono lábil en la parte más superficial del suelo. Sin embargo, en el área de transición, el aprovechamiento del carbono lábil primario genera recuperación del carbono complejo.
- En todas las áreas se puede observar que, de las formas mayormente disponibles, se encuentra en mayor proporción el CSAC que el CSAF.
- El CSP es un indicador de recuperación en el suelo, ya que su estabilidad permite su conservación en el área agrícola, así como su aumento en las áreas conservada y de transición. Además, puede usarse como indicador de estabilización de fierro y aluminio.
- Como resultado del comportamiento de cada forma se obtuvo el siguiente diagrama (Figura 9), donde las flechas indican las rutas de cada forma de carbono.

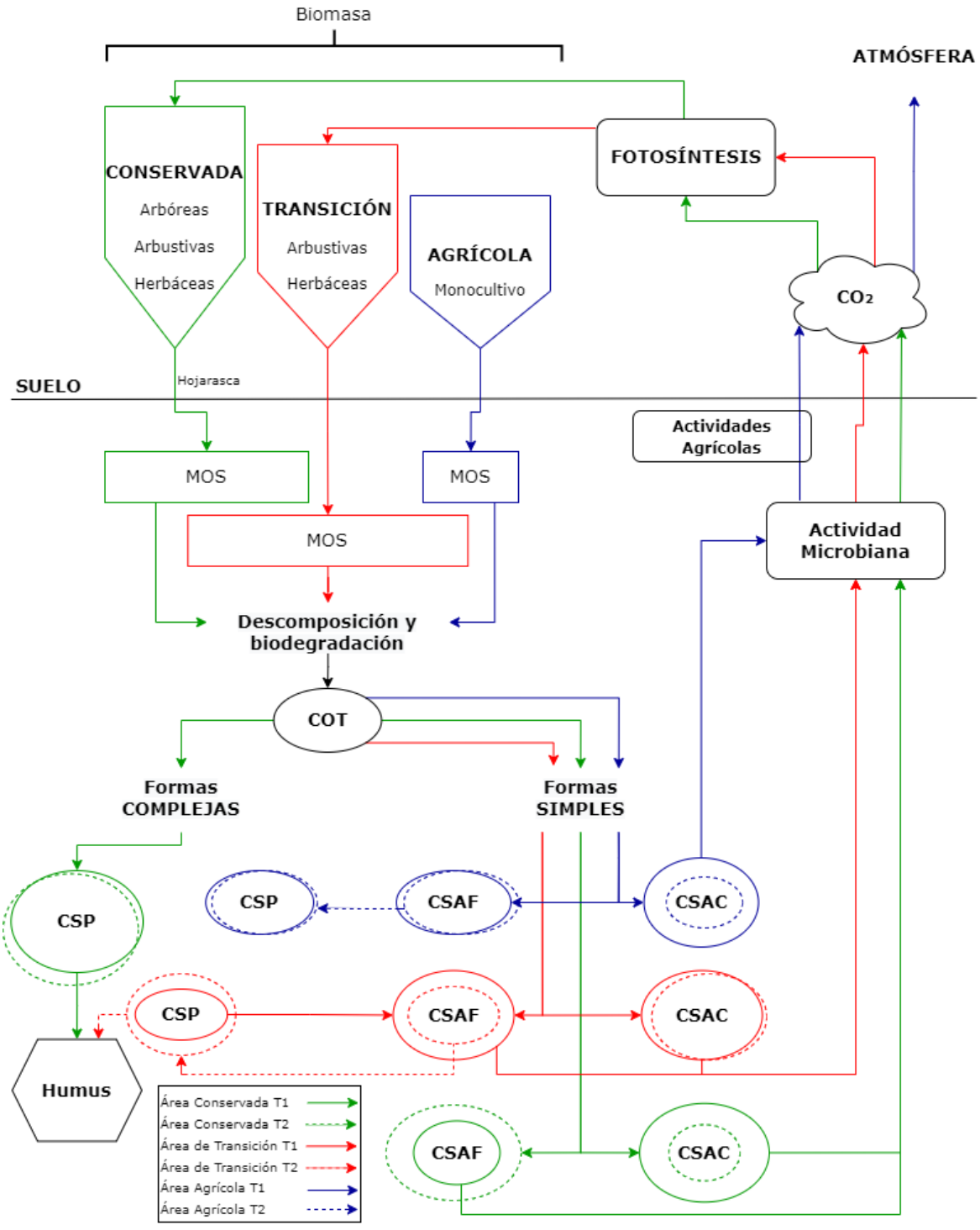


Figura 9. Diagrama de la dinámica de las formas de carbono
Autoría Propia (2022).

Recomendaciones

- Es necesario continuar con la investigación donde se identifiquen y cuantifiquen más formas de carbono para comprender una dinámica más integral.
- Se recomienda medir el CO_2 que se produce y emite por área, para establecer un indicador ambiental que asocie las formas de carbono con las emisiones y revisar su contribución al calentamiento global.
- Como resultado de la investigación la recuperación del suelo es posible y se puede favorecer de manera natural, tomando medidas que aceleren la dinámica de transformación de orgánicos para devolver al suelo su eficiencia como sumidero de carbono:
    - Favoreciendo la cobertura vegetal mediante la incorporación de especies herbáceas básicas para su reproducción y aportación de compuestos orgánicos en periodos cortos.
    - Fomentar la actividad microbiológica a través de las distintas formas de carbono que pueden obtenerse de una dinámica de recuperación de suelo a través del rescate de sus propiedades.

BIBLIOGRAFÍA

Ahirwal, J., Kumari, S., Kumar Singh, A., Kumar, A., & Kumar Maiti, S. (2021). Changes in soil properties and carbon fluxes following afforestation and agriculture in tropical forest. *Ecological Indicators*.

Amoakwah, E., Rahman, M., Nketia, K., Djouaka, R., Didenko, N., & Islam, K. (2020). Impact of deforestation and subsequent land-use change on soil quality. *Eurasian Journal of Soil Science*, 150-160.

Anaya, C. A., Mendoza, M., Rivera, M., Páez, R., & Olivares-Martínez, D. (2016). Contenido de carbono orgánico y retención de agua en suelos de un bosque de niebla en Michoacán, México. *Agrociencia, 50*, 251-269.

Balaria, A., & Johnson, C. E. (2013). Compositional characterization of soil organic matter and hot-water-extractable organic matter in organic horizons using a molecular mixing model. *Journal of Soils and Sediments*, págs. 1032–1042.

Bankó, L., Tóth, G., L. Marton, C., & Hoffmann, S. (2021). Hot-water extractable C and N as indicators for 4p1000 goals in a temperate-climate long-term field experiment: A case study from Hungary. *Ecological Indicators, 126*.

Barral, M., Arias, M., & Díaz-Fierros, F. (1997). Influencia del hierro y el aluminio en el contenido de materia orgánica del suelo. *Nova Acta Científica Compostelana (Bioloxía)*, 137-146.

Bear, R., Rintoul, D., Snyder, B., Smith-Caldas, M., Herren, C., & Horne, E. (2016). *Principles of Biology.*

Bellè, S.-L., Riotte, J., Sekhar, M., Ruiz, L., Schiedung, M., & Abiven, S. (2021). Soil organic carbon stocks and quality in small-scale tropical, sub-humid and semi-arid watersheds under shrubland and dry deciduous forest in southwestern India. *Geoderma*.

Bernardus, H. J., Masera, O., & Tomás, H. (2007). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Obtenido de LOS BOSQUES Y SELVAS COMO SUMIDEROS DE CARBONO: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/bernardus.html#top

Boff, L. (2004). *Ética Planetaria: Para un consenso mínimo entre los humanos.* México: Ediciones Dabar.

Boff, L. (2015). *La Tierra está en nuestras manos. Una nueva visión del planeta y de la humanidad.* Petrópolis, Brasil: Sal Terrae.

Burbano Orjuela, B. O. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 82-96.

Carrasco, M. (1992). El suelo como sistema químico. En U. d. Chile, *Suelos, una visión actuializada del recurso* (Vol. 38, págs. 89-120). Chile: Publicaciones Miscelaneas Agrícolas.

Chantigny, M. H. (2003). Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. *Geoderma, 113*(3-4), 357-380.

Ćirić, V., Belić, M., Nešić, L., Šeremešić, S., Pejić, B., Bezdan, A., & Manojlović, M. (2016). The sensitivity of water extractable soil organic carbon fractions to land use in three soil types. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1654-1664.

CONABIO. (23 de Junio de 2020). *Biodiversidad Mexicana*. Obtenido de Fragmentación: https://www.biodiversidad.gob.mx/region/fragmentacion

Corvasce, M., Zsolnay, A., D'Orazio, V., Lopez, R., & Miano, T. (2006). Characterization of water extractable organic matter in a deep soil profile. *Chemosphere, 62*(10), 1583-1590.

Datta, A., Basak, N., Chaudhari, S., & Sharma, D. (2015). Soil properties and organic carbon distribution under different land uses in reclaimed sodic soils of North-West India. *Geoderma Regional, 4*, 134-146.

Dorronsoro, C. (s.f.). *INTRODUCCIÓN A LA EDAFOLOGÍA.* España: Universidad de Granada, Departamento de Edafología y Química Agrícola. Obtenido de introducción a la edafología.

EO Browser. (s.f.). Recuperado el 3 de Octubre de 2021, de Sentinelhub: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=6&lat=18.61501&lng=-99.7998&themeId=DEFAULT-THEME&toTime=2021-10-12T21%3A18%3A05.487Z

Escalante, A. E. (2017). Sistemas productivos: microorganismos, suelos y sostenibilidad. *Oikos*= (18), 24-27.

FAO, & PNUMA. (2020). *The State of the World's Forests 2020.* Roma, Italia: Forests, biodiversity and people.

Feller, C., Francois, C., Villemin, G., Portal, J.-M., Toutain, F., & Morel, J.-L. (1991). *Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique* (Vol. 312). Paris: Comies Rendus de l'Academie des Sciences de.

Fernández Nogueira, D., & Corbelle Rico, E. (2017). Cambios en los usos de suelo en la Península Ibérica: un meta-análisis para el período 1985-2015. *Biblio3W. Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales, XXII*(1215).

Franzluebbers, A. (1999). Potential C and N mineralization and microbial biomass from intact and increasingly disturbed soils of varying texture. *Soil Biology & Biochemistry, 31*(8), 1083-1090.

Galicia, L., García Romero, A., Gómez-Mendoza, L., & Ramírez, M. (2007). Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 50-60.

García, L. (2019). *Ciencia UNAM.* Obtenido de Aumento poblacional, una amenaza a los bosques y selvas: http://ciencia.unam.mx/leer/888/aumento-poblacional-una-amenaza-a-los-bosques-y-selvas

Gauthier, A., Amiotte-Suchet, P., Nelson, P., Lévêque, J., Zeller, B., & Hénault, C. (2009). Dynamics of the water extractable organic carbon pool during mineralisation in soils from a Douglas fir plantation and an oak-beech forest - an incubation experiment. *Springer Science + Business Media B.V.*, 465-479.

Geissen, V., & Morales, G. (2006). Fertility of tropical soils under different land use systems-a case study of soils in Tabasco, Mexico. *Applied Soil Ecology, 31*(1-2), 169-178.

Geraei, D., Hojati, S., Landi, A., & Cano, A. (2016). Total and labile forms of soil organic carbon as affected by land use change in southwestern Iran. *Geoderma Regional*, 29-37.

Ghani, A., Dexter, M., & Perrott, K. (2003). Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry, 35*(9), 1231-1243.

Gurumurthy, K., Kumar, M., & Prakasha, H. (2009). Changes in physico chemical properties of soils under different land use systems. *Karnataka J. Agric*, 1107-1109.

Hamkalo, Z., & Bedernichek , T. (2014). Total, cold and hot water extractable organic carbon in soil profile: impact of land-use change. *Zemdirbyste-Agriculture, 101*(2), 125-132.

Haynes, R. J. (2005). Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. *Advances in Agronomy, 85*, 221-268.

INAFRED. (s.f.). *Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México*. Obtenido de ACAJETE: http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21001a.html

INECC. (2018). *INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE GASES Y COMPUESTOS DE EFECTO INVERNADERO 1990-2015.* Resumen Informativo, Ciudad de México.

INEGI. (s.f.). *DATOS, Edafología*. Recuperado el 11 de Octubre de 2021, de INEGI: https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/

Jackson, M. L. (1964). *Análisis químico de suelos (Traducido por J. Beltrán).* Barcelona, España: Ediciones Omega, S. A.

Jaramillo J., D. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo.* Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias.

Jensen, J., Schjønning, P., Watts, C., Christensen, B., Peltre, C., & Munkholm, L. (2019). Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. *Geoderma, 337*, 834-843.

Jordán, A. (2005). *Manual de edafología.* Sevilla: Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.

Kaiser, M., & Asefaw Berhe, A. (2014). How does sonication affect the mineral and organic constituents of soil aggregates? - A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 479-495.

Kaurichev , I., Panov, N., Stratonóvich, M., Grechin, I., Sávich, V., Ganzhara, N., & Mershin, A. (1984). *Prácticas de Edafología.* Rusia: MIR MOSCÚ.

Kumar, R., Rawat, K., & Yadav, B. (2012). Vertical Distribution of Physico-Chemical Properties under Different Topo-sequence in Soils of Jharkhand. *Journal of Agricultural Physics, 12*, 63-69.

Lal, R. (2002). Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Enviromental Pollution* , 353-362.

Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto.* Roma, Italia: FAO.

Leinweber, P., Schulten, H., & Korschens, M. (1995). *Hot water extracted organic matter: Chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment* (Vol. 20). Biol. Fertil. Soils.

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Última reforma 26 de abril de 2021). (2003). México, CDMX, México: DOF.

López Vazquez, V. H., Balderas Plata, M. A., Chávez Mejía, M. C., Juan Pérez, J. I., & Gutiérrez Cedillo, J. G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *Ciencia, 22*(2), 136-144.

Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science , 57*(4), 426-445.

Malepfane, N., Muchaonyerwa, P., Hughes, J., & Zengeni, R. (2022). Land use and site effects on the distribution of carbon in some humic soil profiles of KwaZulu-Natal, South Africa. *Heliyon, 7*.

Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal, 8*(1), 68-96.

Martínez, I., Belinchón, R., Otárola, M. G., Aragón, G., Prieto, M., & Escudero, A. (2011). Efectos de la fragmentación de los bosques sobre los líquenes epífitos en la Región Mediterránea. *Ecosistemas, 20*(2-3), 54-67.

Meza, M., & Armenteras, D. (2018). Land use and vegetation structure in forest remnants Land use and vegetation structure in forest remnants. *Colombia Forestal, 21*(2).

Minasny, B., Malone, B., McBratney, A., Angers, D., Arrouays, D., Chambers, A., . . . Winowiecki, L. (15 de abril de 2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma, 292*, 59-86.

Munny, N. N., Khan, M. Z., & Hanif, M. (2021). Vertical distribution of soil properties and organic carbon under different land use systems in saline soils of Bangladesh. *Environmental Challenges*.

Murphy, D., Sparling, G., & Fillery, I. (1998). Stratification of microbial biomass C and N and gross N mineralisation with soil depth in two contrasting Western Australian agricultural soils. *Australian Journal of Soil Research, 36*(1), 45 - 56.

NASA a. (16 de Junio de 2011). *Earth Observatory*. Obtenido de The Fast Carbon Cycle: https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page3.php

NASA b. (16 de Junio de 2011). *Earth Observatory*. Obtenido de The Slow Carbon Cycle: https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page2.php

NASA. (4 de marzo de 2014). Earth observatory. *How to Interpret Common False Color Images*. Obtenido de https://earthobservatory.nasa.gov/features/FalseColor/page6.php

Niu, X., Liu, C., Jia, X., & Zhu, J. (2021). Changing soil organic carbon with land use and management practices in a thousand-year cultivation region. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 322*.

Olivares Campos, B., López Beltrán, M., & Lobo Luján, D. (2019). Cambios de usos de suelo y vegetación en la comunidad agraria Kashaama, Anzoátegui, Venezuela: 2001-2013. *Revista Geográfica de América Central, 63*(2), 269-291.

Ortega Castellanos, C. A., Villavicencio García, R., Gallegos Rodríuez, A., & Santiago Pérez, A. L. (2006). Análisis de la fragmentación forestal del área de protección de flora y fauna "Sierra de Quila" en el estado de Jalisco, utilizando sistemas de información geográfica (SIG). *Avances en la Investigación Científica en el CUCBA*, 135-140.

Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Roquero de Laburu, C. (2003). *EDAFOLOGÍA Para la agricultura y el medio ambiente* (Tercera ed.). México: Ediciones Mundi-Prensa.

Prietzel, J., Zimmermann, L., Schubert, A., & Christophel, D. (2016). Organic matter losses in German Alps forest soils since the 1970s most likely caused by warming. *Nature Geoscience*, 543–548.

Reichle, D. E. (2020). *The Global Carbon Cycle and Climate Change.* Elsevier.

Rodríguez, A., Arbelo, C., Notario, J., Mora, J., Guerra, J., & Armas, C. (2004). Contenido y formas de carbono orgánico en andosoles forestales: aproximación a su dinámica. *EDAFOLOGIA, 11*(1), 67-102.

Schöning, I., & Kögel-Knabner, I. (2006). Chemical composition of young and old carbon pools throughout Cambisol and Luvisol profiles under forests. *Soil Biology and Biochemistry, 38*(8), 2411-2424.

Selassie , Y., & Ayanna , G. (2013). Effects of Different Land Use Systems on Selected Physico-Chemical Properties of Soils in Northwestern Ethiopia. *Journal of Agricultural Science*, 112-120.

SEMARNAT. (2018). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2018.* Mèxico. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Informe2018GMX_web.pdf

Sharma, V., Hussain, S., Sharma, K., & Arya, V. (2014). Labile carbon pools and soil organic carbon stocks in the foothill Himalayas under different land use systems. *Geoderma, 232-234*, 81-87.

Six, J., Conant, R., Paul, E., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*(241), 155–176.

Soussana, J.-F., oiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., & Arrouays, D. (2004). Carbon cycling and sequestration opportunities intemperate grasslands. *Soil Use and Management*, 219-230.

Tang, H., Xiao, X., Tang, W., Li, C., Wang, K., & Li, W. (2018). Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on soil organic carbon and carbon management index under a double-cropping rice system in Southern China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 49*(16), 1976-1989.

Trimble, B., Calderon, F., Poulson, S., & Verburg, P. (2018). Conversion of a Semiarid Nevada Soil to Irrigated Agriculture Preferentially Removes Labile Carbon. *Soil Syst., 2*(38).

Trucíos Caciano, R., Estrada Ávalos, J., Cerano Paredes, J., & Rivera González, M. (2011). Interpretación del cambio en vegetación y uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 359-367.

Uselman, S., Qualls, R., & Lilienfein, J. (2012). Quality of soluble organic C, N, and P produced by different types and species of litter: Root litter versus leaf litter. *Soil Biology and Biochemistry, 54*, 57-67.

Vermeulen, S., Campbell, B., & Ingram, J. (2012). Climate Change and Food Systems. *Annual Review of Environment and Resources, 37*, 195-222 .

Wang, D., Abdullah, K., Xu, Z., & Wang, W. (2020). Water extractable organic C and total N: The most sensitive indicator of soil labile C and N pools in response to the prescribed burning in a suburban natural forest of subtropical Australia. *Geoderma*, 1-12.

Wang, F., Zhang, X., Neal, A., Crawford, J., Mooney, S., & Bacq-Labreuil, A. (2021). Evolution of the transport properties of soil aggregates and their relationship with soil organic carbon following land use changes. *Soil & Tillage Research*.

Wardle, D. (1992). A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological Reviews*, 321-358.

Weigel, A., Eustice, T., Antwerpen, R., Naidoo, G., & Schulz, E. (2011). Soil organic carbon (SOC) changes indicated by hot water extractable carbon (HWEC). *Proc S Afr Sug Technol Ass*(84), 210-222.

Wilkin, D., & Brainerd, J. (2016). *The Carbon Cycle - Advanced.* CK-12.

Yang, Y., Liu, H., Dai, Y., Tian, H., Zhou, W., & Lv, J. (2020). Soil organic carbon transformation and dynamics of microorganisms under different organic amendments. *Science of the Total Environment, 750*.

Yimer, F., Ledin, S., & Abdelkadir, A. (2006). Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia. *Geoderma, 135*, 335-344.

Zewen, J., Lifeng, P., & Minghung, W. (2020). Systematic relationship between soil properties and organic carbon mineralization based on structural equation modeling analysis. *Journal of Cleaner Production*.

ANEXOS

Anexo I. Tablas de datos

Tabla 9. Datos del análisis de formas de carbono

Muestra		Tiempo 1				Tiempo 2			
		% CT	% CSAF	% CSAC	% CSP	% CT	% CSAF	% CSAC	% CSP
AC1	11	2.63	0.15	0.58	0.67	5.26	0.15	0.77	0.83
	12	3.69	0.45	1.15	0.83	6.08	0.00	0.77	0.83
	21	1.43	0.00	0.77	0.50	2.30	0.45	0.77	0.67
	22	2.18	0.30	0.58	0.50	2.00	0.30	2.12	0.50
	31	2.03	0.15	0.38	0.42	1.41	0.00	0.38	0.50
	32	0.98	0.30	0.77	0.38	1.56	0.45	0.77	0.50
	41	1.20	0.30	0.38	0.33	1.19	0.00	0.19	0.50
	42	0.75	0.00	0.38	0.33	1.04	0.45	0.38	0.33
	51	0.60	0.15	0.19	0.33	0.74	0.45	0.19	0.33
	52	0.75	0.15	0.38	0.17	0.74	0.00	0.19	0.33
AC2	11	2.63	0.30	0.77	0.67	2.45	0.45	0.77	0.50
	12	3.16	0.30	0.38	0.67	5.41	0.45	0.38	0.83
	21	1.58	0.42	0.96	0.50	2.30	0.45	0.38	0.67
	22	1.73	0.28	0.19	0.33	1.85	0.45	0.19	0.67
	31	1.66	0.28	0.38	0.33	1.85	0.30	0.38	0.50
	32	1.73	0.42	0.38	0.33	1.78	0.45	0.19	0.67
	41	1.81	0.28	0.38	0.50	1.85	0.45	0.19	0.50
	42	1.96	0.42	0.58	0.50	1.93	0.15	0.19	0.50
	51	1.43	0.42	0.58	0.33	1.48	0.45	0.58	0.50
	52	1.81	0.42	0.38	0.33	1.48	0.30	0.38	0.50
AT1	11	2.18	0.28	0.58	0.24	3.26	0.38	0.58	0.50
	12	4.36	0.42	0.96	0.33	3.63	0.38	0.58	0.50
	21	3.23	0.42	0.38	0.33	1.85	0.00	0.38	0.33
	22	0.90	0.28	0.38	0.33	1.26	0.00	0.58	0.33
	31	0.90	0.28	0.38	0.50	0.89	0.19	0.38	0.50
	32	1.28	0.28	0.58	0.28	1.26	0.57	0.38	0.17

Muestra		Tiempo 1				Tiempo 2			
		% CT	% CSAF	% CSAC	% CSP	% CT	% CSAF	% CSAC	% CSP
AT2	11	6.70	0.56	2.31	0.42	8.41	0.19	1.15	0.83
	12	6.17	0.56	0.38	0.33	6.44	0.19	1.15	0.83
	21	1.73	0.74	0.96	0.33	1.67	0.19	0.38	0.50
	22	1.13	0.74	0.77	0.50	2.12	0.19	0.38	0.83
	31	1.28	0.44	0.38	0.33	1.06	0.00	0.38	0.33
	32	0.90	0.59	1.15	0.17	1.06	0.19	0.19	0.33
AA1	11	2.11	0.30	0.58	0.67	2.08	0.00	0.19	0.50
	12	1.88	0.30	0.38	0.50	2.89	0.19	0.19	0.50
	21	2.41	0.15	0.77	0.50	2.52	0.38	0.19	0.33
	22	1.81	0.00	0.77	0.50	1.85	0.19	0.00	0.33
AA2	11	1.81	0.15	0.58	0.33	2.27	0.19	0.19	0.33
	12	1.88	0.75	0.58	0.50	1.97	0.38	0.38	0.50
	21	2.03	0.90	1.15	0.31	2.05	0.38	0.96	0.50
	22	1.28	0.45	0.58	0.33	1.36	0.00	0.38	0.33

Tabla 10. Coeficientes de correlación entre propiedades del suelo y formas de carbono

Propiedad	Área	Coeficiente de correlación	% COT	% CSAF	% CSAC	% CSP
Humedad	Conservada	r	0.094	0.753	0.051	-0.083
		r^2	0.009	0.568	0.003	0.007
		ρ	-0.100	0.791	-0.100	-0.300
	Transición	r	1.000	0.077	0.993	0.656
		r^2	1.000	0.006	0.985	0.430
		ρ	1.000	0.500	1.000	0.866
	Agrícola	r	1.000	-1.000	-1.000	1.000
		ρ	1.000	-1.000	-1.000	1.000

Propiedad	Área	Coeficiente de correlación	% COT	% CSAF	% CSAC	% CSP
pH	Conservada	r	-0.974	-0.569	-0.819	-0.922
		r^2	0.948	0.324	0.671	0.849
		ρ	-0.900	-0.527	-0.900	-0.700
	Transición	r	-0.978	-0.289	-0.996	-0.803
		r^2	0.956	0.084	0.991	0.645
		ρ	-1.000	-0.500	-1.000	-0.866
	Agrícola	r	-1.000	1.000	1.000	-1.000
		ρ	-1.000	1.000	1.000	-1.000
Textura (% arcillas)	Conservada	r	0.939	0.650	0.780	0.865
		r^2	0.882	0.422	0.609	0.749
		ρ	0.671	0.825	0. 671	0.447
	Transición	r	0.963	0.349	0.988	0.839
		r^2	0.927	0.122	0.976	0.703
		ρ	1.000	0.500	1.000	0.866
	Agrícola	r	-	-	-	-
		ρ	-	-	-	-
Textura (% limos)	Conservada	r	0.637	0.810	0.239	0.536
		r^2	0.406	0.656	0.057	0.287
		ρ	0.300	0.949	0.300	0.100
	Transición	r	0.987	0.243	0.999	0.773
		r^2	0.974	0.059	0.998	0.598
		ρ	1.000	0.500	1.000	0.866
	Agrícola	r	-	-	-	-
		ρ	-	-	-	-
Textura (% arenas)	Conservada	r	-0.762	-0.808	-0.413	-0.664
		r^2	0.581	0.652	0.170	0.440
		ρ	-0.300	-0.949	-0.300	-0.100

Propiedad	Área	Coeficiente de correlación	% COT	% CSAF	% CSAC	% CSP
	Transición	r	-0.978	-0.289	-0.996	-0.803
		r^2	0.956	0.084	0.991	0.645
		ρ	-1.000	-0.500	-1.000	-0.866
	Agrícola	r	-	-	-	-
		ρ	-	-	-	-
Porosidad	Conservada	r	0.355	0.098	0.024	0.438
		r^2	0.126	0.010	0.001	0.192
		ρ	-0.200	0.158	-0.200	0.100
	Transición	r	0.948	0.394	0.979	0.864
		r^2	0.899	0.156	0.958	0.747
		ρ	1.000	0.500	1.000	0.866
	Agrícola	r	-1.000	1.000	1.000	-1.000
		ρ	-1.000	1.000	1.000	-1.000
Materia orgánica	Conservada	r	1.000	0.414	0.895	0.976
		r^2	1.000	0.171	0.802	0.952
		ρ	1.000	0.316	1.000	0.900
	Transición	r	1.000	0.083	0.993	0.661
		r^2	1.000	0.007	0.987	0.437
		ρ	1.000	0.500	1.000	0.866
	Agrícola	r	1.000	-1.000	-1.000	1.000
		ρ	1.000	-1.000	-1.000	1.000

r - coeficiente de correlación de Pearson, r^2 - proporción de la variación en la correlación de Pearson, ρ - coeficiente de correlación de Spearman

Tabla 11. Porcentajes de las formas de carbono con respecto al COT

Área	Profundidad	T1 (%)			T2 (%)		
		CSAF	CSAC	CSP	CSAF	CSAC	CSP
Conservada	10	9.90	23.76	23.43	8.06	13.80	13.44
	20	14.45	36.42	26.59	21.33	21.33	29.88
	30	18.13	30.00	23.13	24.24	23.03	32.73
	40	17.48	30.07	29.37	30.00	12.67	30.67
	50	25.22	33.04	25.22	36.04	22.52	37.84
Transición	10	9.48	13.20	6.80	5.33	15.99	12.32
	20	31.43	29.14	18.86	10.98	24.86	22.54
	30	30.28	41.28	23.85	17.76	30.84	30.84
Agrícola	10	13.02	27.60	26.04	8.26	8.26	21.74
	20	15.96	43.62	21.81	19.49	14.87	16.92

Anexo II. Gráficos y diagramas

- Área conservada

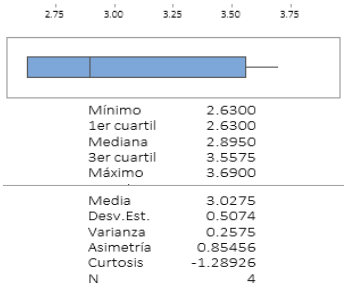


Gráfico 19. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - COT (T1)

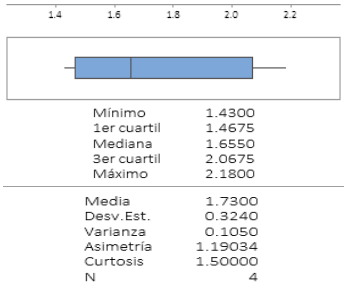


Gráfico 20. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - COT (T1)

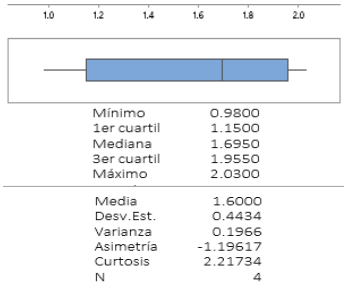


Gráfico 21. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - COT (T1)

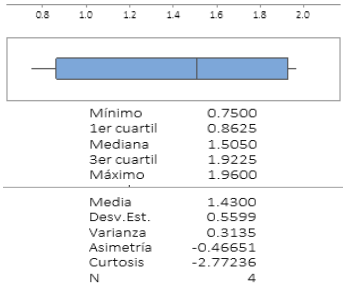


Gráfico 22. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - COT (T1)

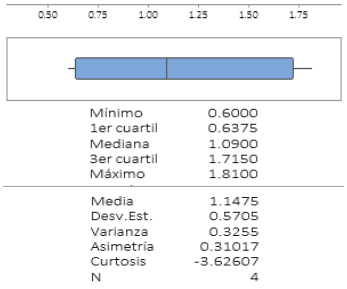


Gráfico 23. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - COT (T1)

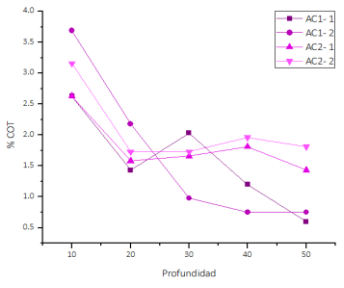


Gráfico 24. Valores de COT por profundidad; AC (T1)

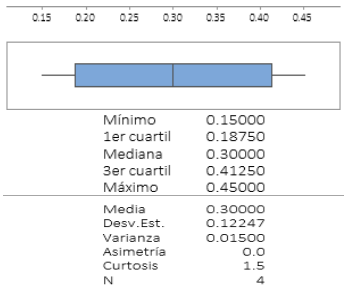


Gráfico 25. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSAF (T1)

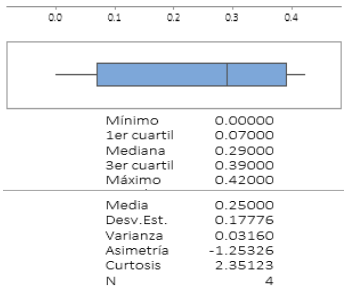


Gráfico 26. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSAF (T1)

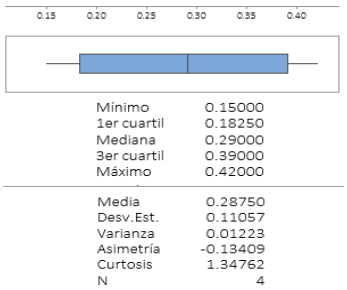


Gráfico 27. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSAF (T1)

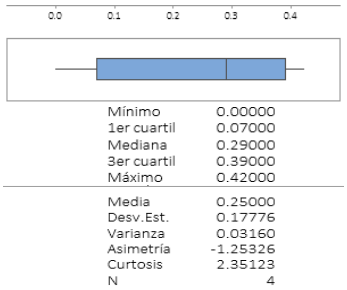


Gráfico 28. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSAF (T1)

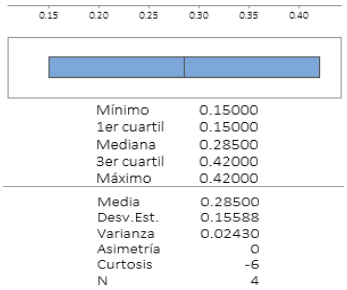


Gráfico 29. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSAF (T1)

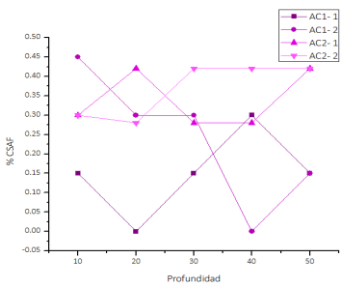
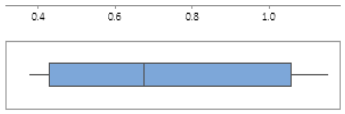
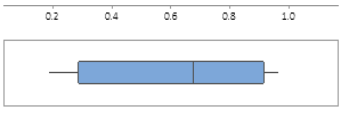


Gráfico 30. Valores de CSAF por profundidad; AC (T1)



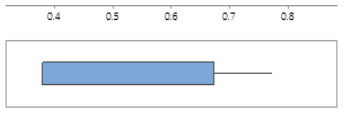
Mínimo	0.38000
1er cuartil	0.43000
Mediana	0.67500
3er cuartil	1.05500
Máximo	1.15000
Media	0.72000
Desv.Est.	0.32792
Varianza	0.10753
Asimetría	0.710554
Curtosis	0.319957
N	4

Gráfico 31. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSAC (T1)



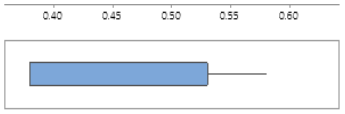
Mínimo	0.19000
1er cuartil	0.28750
Mediana	0.67500
3er cuartil	0.91250
Máximo	0.96000
Media	0.62500
Desv.Est.	0.32889
Varianza	0.10817
Asimetría	-0.782581
Curtosis	0.416406
N	4

Gráfico 32. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSAC (T1)



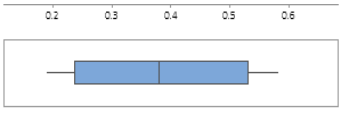
Mínimo	0.38000
1er cuartil	0.38000
Mediana	0.38000
3er cuartil	0.67250
Máximo	0.77000
Media	0.47750
Desv.Est.	0.19500
Varianza	0.03803
Asimetría	2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 33. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSAC (T1)



Mínimo	0.38000
1er cuartil	0.38000
Mediana	0.38000
3er cuartil	0.53000
Máximo	0.58000
Media	0.43000
Desv.Est.	0.10000
Varianza	0.01000
Asimetría	2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 34. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSAC (T1)



Mínimo	0.19000
1er cuartil	0.23750
Mediana	0.38000
3er cuartil	0.53000
Máximo	0.58000
Media	0.38250
Desv.Est.	0.15924
Varianza	0.02536
Asimetría	0.09416
Curtosis	1.50493
N	4

Gráfico 35. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSAC (T1)

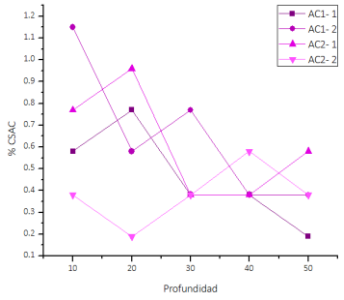
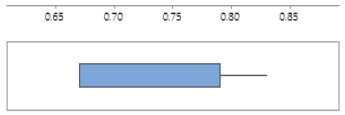
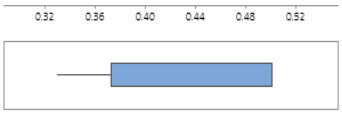


Gráfico 36. Valores de CSAC por profundidad; AC (T1)



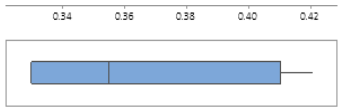
Mínimo	0.67000
1er cuartil	0.67000
Mediana	0.67000
3er cuartil	0.79000
Máximo	0.83000
Media	0.71000
Desv.Est.	0.08000
Varianza	0.00640
Asimetría	2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 37. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSP (T1)



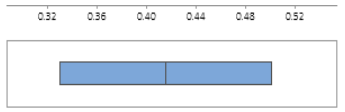
Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.37250
Mediana	0.50000
3er cuartil	0.50000
Máximo	0.50000
Media	0.45750
Desv.Est.	0.08500
Varianza	0.00722
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 38. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSP (T1)



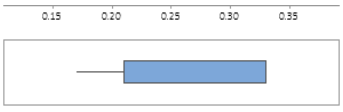
Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.33000
Mediana	0.35500
3er cuartil	0.41000
Máximo	0.42000
Media	0.36500
Desv.Est.	0.04359
Varianza	0.00190
Asimetría	0.67617
Curtosis	-2.23269
N	4

Gráfico 39. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSP (T1)



Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.33000
Mediana	0.41500
3er cuartil	0.50000
Máximo	0.50000
Media	0.41500
Desv.Est.	0.09815
Varianza	0.00963
Asimetría	-0
Curtosis	-6
N	4

Gráfico 40. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSP (T1)



Mínimo	0.17000
1er cuartil	0.21000
Mediana	0.33000
3er cuartil	0.33000
Máximo	0.33000
Media	0.29000
Desv.Est.	0.08000
Varianza	0.00640
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 41. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSP (T1)

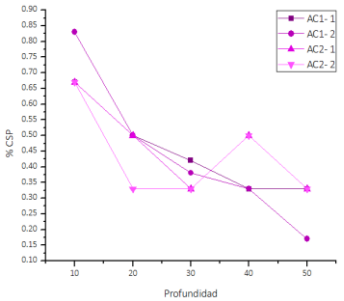
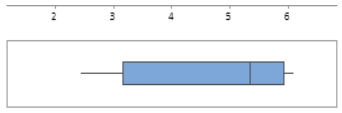
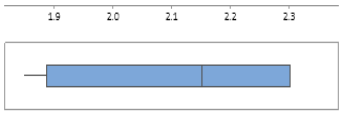


Gráfico 42. Valores de CSP por profundidad; AC (T1)



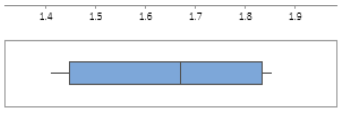
Mínimo	2.4500
1er cuartil	3.1525
Mediana	5.3350
3er cuartil	5.9125
Máximo	6.0800
Media	4.8000
Desv.Est.	1.6067
Varianza	2.5815
Asimetría	-1.69671
Curtosis	3.18869
N	4

Gráfico 43. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - COT (T2)



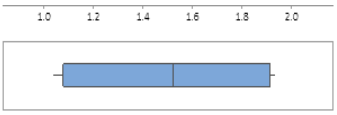
Mínimo	1.8500
1er cuartil	1.8875
Mediana	2.1500
3er cuartil	2.3000
Máximo	2.3000
Media	2.1125
Desv.Est.	0.2250
Varianza	0.0506
Asimetría	-0.37037
Curtosis	-3.90123
N	4

Gráfico 44. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - COT (T2)



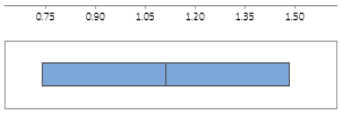
Mínimo	1.4100
1er cuartil	1.4475
Mediana	1.6700
3er cuartil	1.8325
Máximo	1.8500
Media	1.6500
Desv.Est.	0.2022
Varianza	0.0409
Asimetría	-0.35151
Curtosis	-2.98361
N	4

Gráfico 45. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - COT (T2)



Mínimo	1.0400
1er cuartil	1.0775
Mediana	1.5200
3er cuartil	1.9100
Máximo	1.9300
Media	1.5025
Desv.Est.	0.4528
Varianza	0.2050
Asimetría	-0.06720
Curtosis	-5.31048
N	4

Gráfico 46. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - COT (T2)



Mínimo	0.7400
1er cuartil	0.7400
Mediana	1.1100
3er cuartil	1.4800
Máximo	1.4800
Media	1.1100
Desv.Est.	0.4272
Varianza	0.1825
Asimetría	0
Curtosis	-6
N	4

Gráfico 47. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - COT (T2)

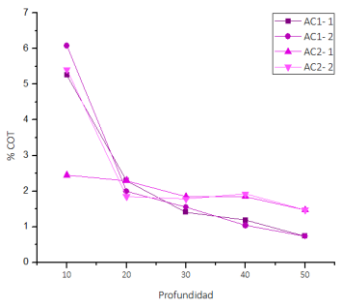
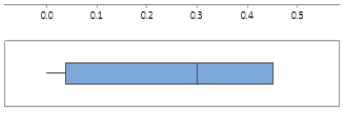
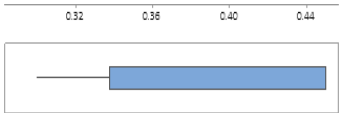


Gráfico 48. Valores de COT por profundidad; AC (T2)



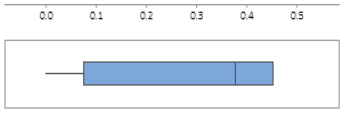
Mínimo	0.00000
1er cuartil	0.03750
Mediana	0.30000
3er cuartil	0.45000
Máximo	0.45000
Media	0.26250
Desv.Est.	0.22500
Varianza	0.05062
Asimetría	-0.37037
Curtosis	-3.90123
N	4

Gráfico 49. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSAF (T2)



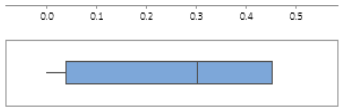
Mínimo	0.30000
1er cuartil	0.33750
Mediana	0.45000
3er cuartil	0.45000
Máximo	0.45000
Media	0.41250
Desv.Est.	0.07500
Varianza	0.00563
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 50. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSAF (T2)



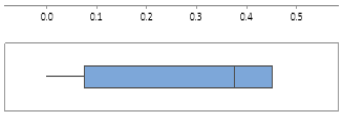
Mínimo	0.00000
1er cuartil	0.07500
Mediana	0.37500
3er cuartil	0.45000
Máximo	0.45000
Media	0.30000
Desv.Est.	0.21213
Varianza	0.04500
Asimetría	-1.41421
Curtosis	1.50000
N	4

Gráfico 51. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSAF (T2)



Mínimo	0.00000
1er cuartil	0.03750
Mediana	0.30000
3er cuartil	0.45000
Máximo	0.45000
Media	0.26250
Desv.Est.	0.22500
Varianza	0.05063
Asimetría	-0.37037
Curtosis	-3.90123
N	4

Gráfico 52. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSAF (T2)



Mínimo	0.00000
1er cuartil	0.07500
Mediana	0.37500
3er cuartil	0.45000
Máximo	0.45000
Media	0.30000
Desv.Est.	0.21213
Varianza	0.04500
Asimetría	-1.41421
Curtosis	1.50000
N	4

Gráfico 53. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSAF (T2)

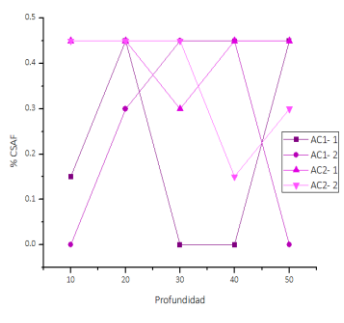
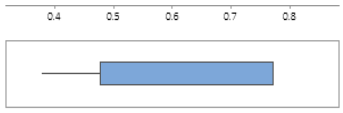
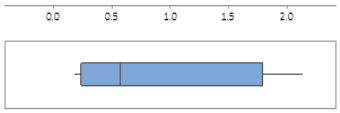


Gráfico 54. Valores de CSAF por profundidad; AC (T2)



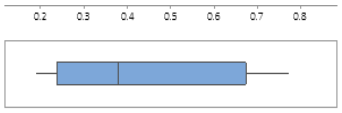
Mínimo	0.38000
1er cuartil	0.47750
Mediana	0.77000
3er cuartil	0.77000
Máximo	0.77000
Media	0.67250
Desv.Est.	0.19500
Varianza	0.03802
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 55. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSAC (T2)



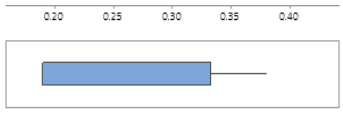
Mínimo	0.19000
1er cuartil	0.23750
Mediana	0.57500
3er cuartil	1.78250
Máximo	2.12000
Media	0.86500
Desv.Est.	0.87080
Varianza	0.75830
Asimetría	1.56908
Curtosis	2.40504
N	4

Gráfico 56. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSAC (T2)



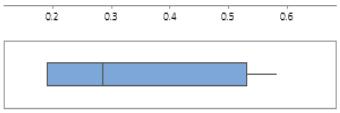
Mínimo	0.19000
1er cuartil	0.23750
Mediana	0.38000
3er cuartil	0.67250
Máximo	0.77000
Media	0.43000
Desv.Est.	0.24372
Varianza	0.05940
Asimetría	1.16184
Curtosis	2.27090
N	4

Gráfico 57. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSAC (T2)



Mínimo	0.19000
1er cuartil	0.19000
Mediana	0.19000
3er cuartil	0.33250
Máximo	0.38000
Media	0.23750
Desv.Est.	0.09500
Varianza	0.00903
Asimetría	2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 58. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSAC (T2)



Mínimo	0.19000
1er cuartil	0.19000
Mediana	0.28500
3er cuartil	0.53000
Máximo	0.58000
Media	0.33500
Desv.Est.	0.18628
Varianza	0.03470
Asimetría	0.89729
Curtosis	-1.06681
N	4

Gráfico 59. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSAC (T2)

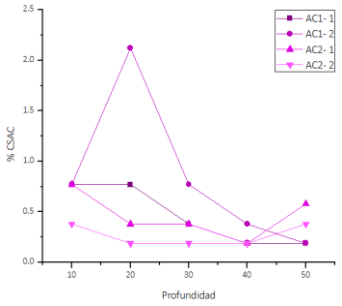
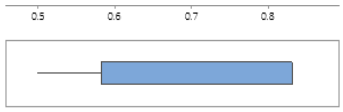
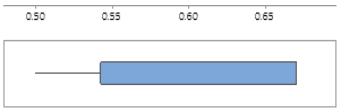


Gráfico 60. Valores de CSAC por profundidad; AC (T2)



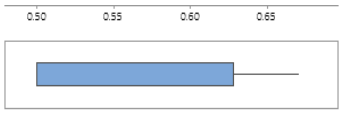
Mínimo	0.50000
1er cuartil	0.58250
Mediana	0.83000
3er cuartil	0.83000
Máximo	0.83000
Media	0.74750
Desv.Est.	0.16500
Varianza	0.02722
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 61. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AC - CSP (T2)



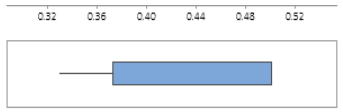
Mínimo	0.50000
1er cuartil	0.54250
Mediana	0.67000
3er cuartil	0.67000
Máximo	0.67000
Media	0.62750
Desv.Est.	0.08500
Varianza	0.00723
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 62. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AC - CSP (T2)



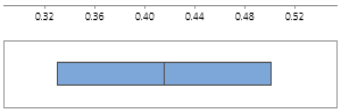
Mínimo	0.50000
1er cuartil	0.50000
Mediana	0.50000
3er cuartil	0.62750
Máximo	0.67000
Media	0.54250
Desv.Est.	0.08500
Varianza	0.00723
Asimetría	2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 63. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSP (T2)



Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.37250
Mediana	0.50000
3er cuartil	0.50000
Máximo	0.50000
Media	0.45750
Desv.Est.	0.08500
Varianza	0.00722
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 64. Diagrama de caja y bigote; 40 cm, AC - CSP (T2)



Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.33000
Mediana	0.41500
3er cuartil	0.50000
Máximo	0.50000
Media	0.41500
Desv.Est.	0.09815
Varianza	0.00963
Asimetría	-0
Curtosis	-6
N	4

Gráfico 65. Diagrama de caja y bigote; 50 cm, AC - CSP (T2)

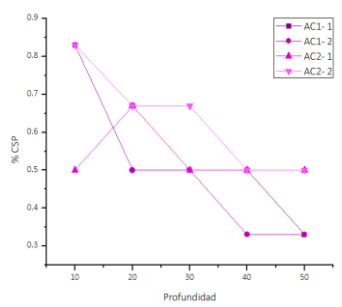
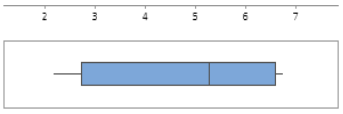


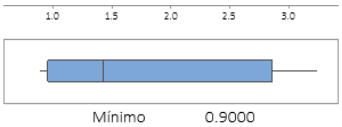
Gráfico 66. Valores de CSP por profundidad; AC (T2)

- Área de transición



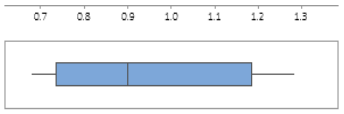
Mínimo	2.1800
1er cuartil	2.7250
Mediana	5.2650
3er cuartil	6.5675
Máximo	6.7000
Media	4.8525
Desv.Est.	2.0440
Varianza	4.1780
Asimetría	-0.828611
Curtosis	-0.947200
N	4

Gráfico 67. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - COT (T1)



Mínimo	0.9000
1er cuartil	0.9575
Mediana	1.4300
3er cuartil	2.8550
Máximo	3.2300
Media	1.7475
Desv.Est.	1.0484
Varianza	1.0992
Asimetría	1.39646
Curtosis	1.64982
N	4

Gráfico 68. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - COT (T1)



Mínimo	0.68000
1er cuartil	0.73500
Mediana	0.90000
3er cuartil	1.18500
Máximo	1.28000
Media	0.94000
Desv.Est.	0.24927
Varianza	0.06213
Asimetría	0.92977
Curtosis	1.98850
N	4

Gráfico 69. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - COT (T1)

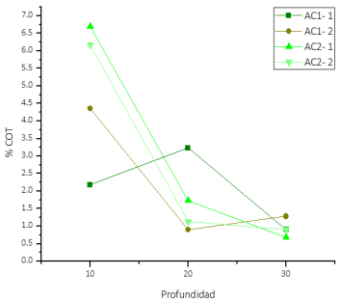
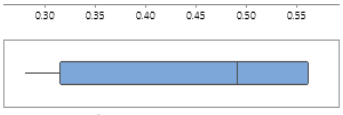
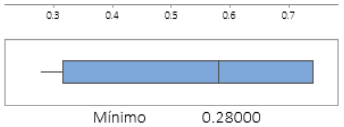


Gráfico 70. Valores de COT por profundidad; AT (T1)



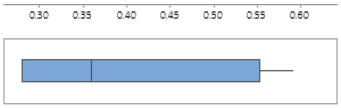
Mínimo	0.28000
1er cuartil	0.31500
Mediana	0.49000
3er cuartil	0.56000
Máximo	0.56000
Media	0.45500
Desv.Est.	0.13404
Varianza	0.01797
Asimetría	-0.85456
Curtosis	-1.28926
N	4

Gráfico 71. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSAF (T1)



Mínimo	0.28000
1er cuartil	0.31500
Mediana	0.58000
3er cuartil	0.74000
Máximo	0.74000
Media	0.54500
Desv.Est.	0.23231
Varianza	0.05397
Asimetría	-0.30486
Curtosis	-4.26650
N	4

Gráfico 72. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSAF (T1)



Mínimo	0.28000
1er cuartil	0.28000
Mediana	0.36000
3er cuartil	0.55250
Máximo	0.59000
Media	0.39750
Desv.Est.	0.14886
Varianza	0.02216
Asimetría	0.80152
Curtosis	-1.56733
N	4

Gráfico 73. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSAF (T1)

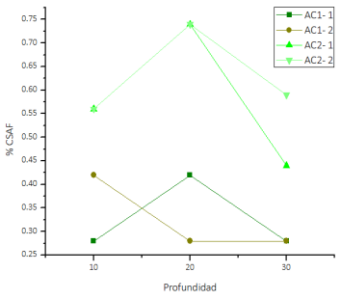
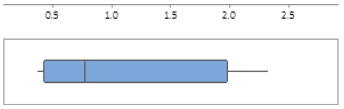
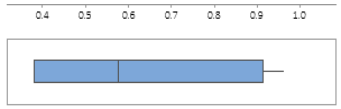


Gráfico 74. Valores de CSAF por profundidad; AT (T1)



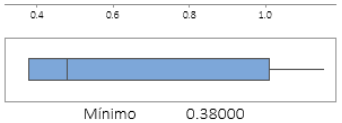
Mínimo	0.3800
1er cuartil	0.4300
Mediana	0.7700
3er cuartil	1.9725
Máximo	2.3100
Media	1.0575
Desv.Est.	0.8690
Varianza	0.7551
Asimetría	1.56885
Curtosis	2.42386
N	4

Gráfico 75. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSAC (T1)



Mínimo	0.38000
1er cuartil	0.38000
Mediana	0.57500
3er cuartil	0.91250
Máximo	0.96000
Media	0.62250
Desv.Est.	0.29056
Varianza	0.08442
Asimetría	0.35687
Curtosis	-3.97628
N	4

Gráfico 76. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSAC (T1)



Mínimo	0.38000
1er cuartil	0.38000
Mediana	0.48000
3er cuartil	1.00750
Máximo	1.15000
Media	0.62250
Desv.Est.	0.36409
Varianza	0.13256
Asimetría	1.63249
Curtosis	2.50037
N	4

Gráfico 77. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSAC (T1)

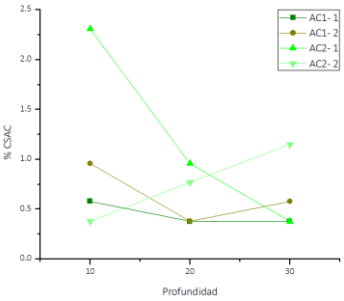
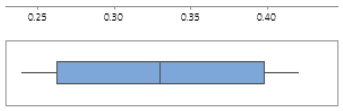


Gráfico 78. Valores de CSAC por profundidad; AT (T1)

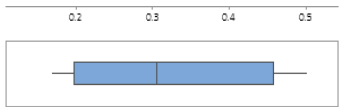


Mínimo	0.24000
1er cuartil	0.26250
Mediana	0.33000
3er cuartil	0.39750
Máximo	0.42000
Media	0.33000
Desv.Est.	0.07348
Varianza	0.00540
Asimetría	-0.0
Curtosis	1.5
N	4

Gráfico 79. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSP (T1)

Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.33000
Mediana	0.33000
3er cuartil	0.45750
Máximo	0.50000
Media	0.37250
Desv.Est.	0.08500
Varianza	0.00722
Asimetría	2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 80. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSP (T1)



Mínimo	0.17000
1er cuartil	0.19750
Mediana	0.30500
3er cuartil	0.45750
Máximo	0.50000
Media	0.32000
Desv.Est.	0.13736
Varianza	0.01887
Asimetría	0.61587
Curtosis	1.09545
N	4

Gráfico 81. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSP (T1)

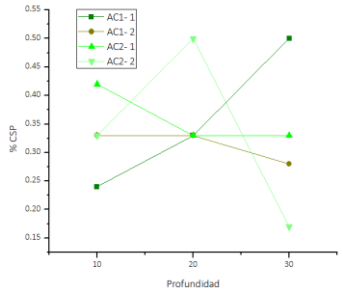
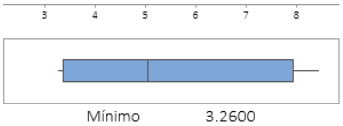
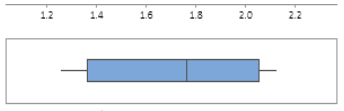


Gráfico 82. Valores de CSP por profundidad; AT (T1)



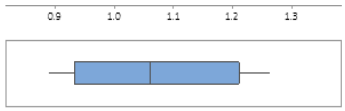
Mínimo	3.2600
1er cuartil	3.3525
Mediana	5.0350
3er cuartil	7.9175
Máximo	8.4100
Media	5.4350
Desv.Est.	2.4392
Varianza	5.9498
Asimetría	0.51338
Curtosis	-2.92108
N	4

Gráfico 83. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - COT (T2)



Mínimo	1.2600
1er cuartil	1.3625
Mediana	1.7600
3er cuartil	2.0525
Máximo	2.1200
Media	1.7250
Desv.Est.	0.3610
Varianza	0.1303
Asimetría	-0.526252
Curtosis	0.508317
N	4

Gráfico 84. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - COT (T2)



Mínimo	0.8900
1er cuartil	0.9325
Mediana	1.0600
3er cuartil	1.2100
Máximo	1.2600
Media	1.0675
Desv.Est.	0.1513
Varianza	0.0229
Asimetría	0.29645
Curtosis	1.54890
N	4

Gráfico 85. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - COT (T2)

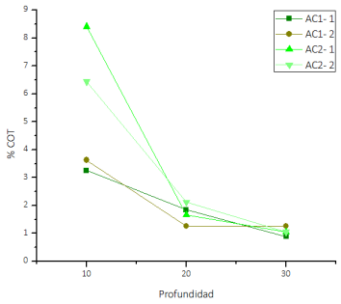
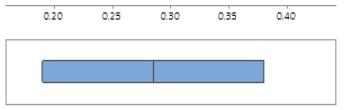
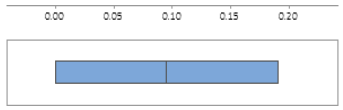


Gráfico 86. Valores de COT por profundidad; AT (T2)



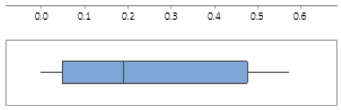
Mínimo	0.19000
1er cuartil	0.19000
Mediana	0.28500
3er cuartil	0.38000
Máximo	0.38000
Media	0.28500
Desv.Est.	0.10970
Varianza	0.01203
Asimetría	0
Curtosis	-6
N	4

Gráfico 87. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSAF (T2)



Mínimo	0.000000
1er cuartil	0.000000
Mediana	0.095000
3er cuartil	0.190000
Máximo	0.190000
Media	0.095000
Desv.Est.	0.109697
Varianza	0.012033
Asimetría	0
Curtosis	-6
N	4

Gráfico 88. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSAF (T2)



Mínimo	0.00000
1er cuartil	0.04750
Mediana	0.19000
3er cuartil	0.47500
Máximo	0.57000
Media	0.23750
Desv.Est.	0.23908
Varianza	0.05716
Asimetría	1.12934
Curtosis	2.22715
N	4

Gráfico 89. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSAF (T2)

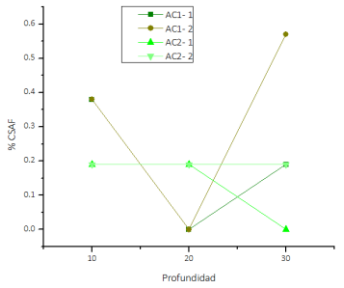
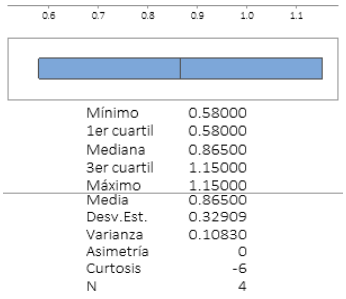
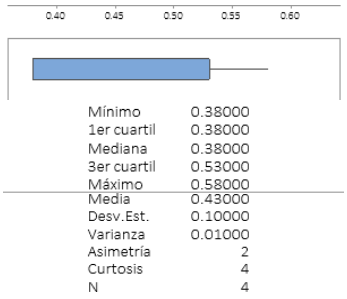


Gráfico 90. Valores de CSAF por profundidad; AT (T2)



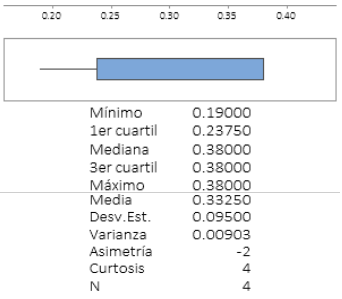
Mínimo	0.58000
1er cuartil	0.58000
Mediana	0.86500
3er cuartil	1.15000
Máximo	1.15000
Media	0.86500
Desv.Est.	0.32909
Varianza	0.10830
Asimetría	0
Curtosis	-6
N	4

Gráfico 91. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSAC (T2)



Mínimo	0.38000
1er cuartil	0.38000
Mediana	0.38000
3er cuartil	0.53000
Máximo	0.58000
Media	0.43000
Desv.Est.	0.10000
Varianza	0.01000
Asimetría	2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 92. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSAC (T2)



Mínimo	0.19000
1er cuartil	0.23750
Mediana	0.38000
3er cuartil	0.38000
Máximo	0.38000
Media	0.33250
Desv.Est.	0.09500
Varianza	0.00903
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 93. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AT - CSAC (T2)

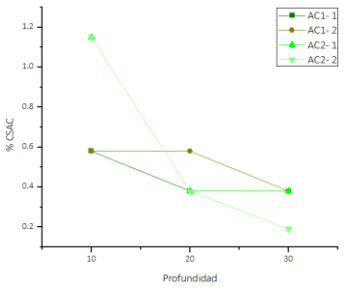
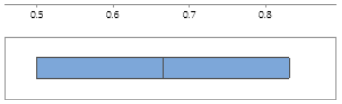
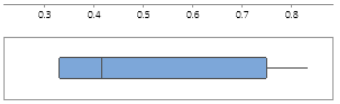


Gráfico 94. Valores de CSAC por profundidad; AT (T2)



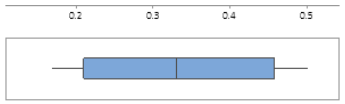
Mínimo	0.50000
1er cuartil	0.50000
Mediana	0.66500
3er cuartil	0.83000
Máximo	0.83000
Media	0.66500
Desv.Est.	0.19053
Varianza	0.03630
Asimetría	-0
Curtosis	-6
N	4

Gráfico 95. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AT - CSP (T2)



Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.33000
Mediana	0.41500
3er cuartil	0.74750
Máximo	0.83000
Media	0.49750
Desv.Est.	0.23571
Varianza	0.05556
Asimetría	1.39290
Curtosis	1.39926
N	4

Gráfico 96. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AT - CSP (T2)



Mínimo	0.17000
1er cuartil	0.21000
Mediana	0.33000
3er cuartil	0.45750
Máximo	0.50000
Media	0.33250
Desv.Est.	0.13475
Varianza	0.01816
Asimetría	0.11126
Curtosis	1.50688
N	4

Gráfico 97. Diagrama de caja y bigote; 30 cm, AC - CSP (T2)

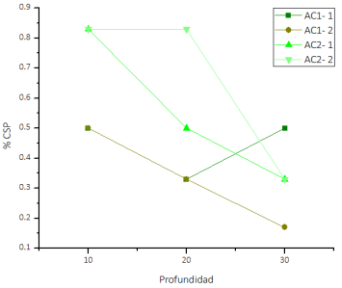
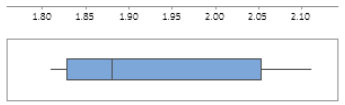


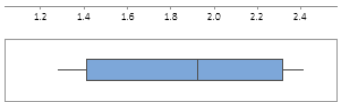
Gráfico 98. Valores de CSP por profundidad; AC (T2)

- Área agrícola



Mínimo	1.8100
1er cuartil	1.8275
Mediana	1.8800
3er cuartil	2.0525
Máximo	2.1100
Media	1.9200
Desv.Est.	0.1309
Varianza	0.0171
Asimetría	1.60524
Curtosis	3.01887
N	4

Gráfico 99. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - COT (T1)



Mínimo	1.2800
1er cuartil	1.4125
Mediana	1.9200
3er cuartil	2.3150
Máximo	2.4100
Media	1.8825
Desv.Est.	0.4720
Varianza	0.2228
Asimetría	-0.438183
Curtosis	0.586770
N	4

Gráfico 100. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - COT (T1)

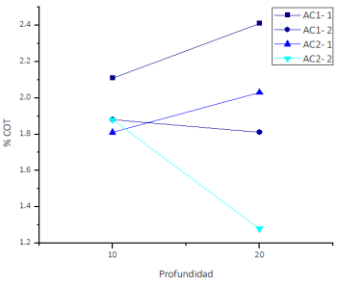
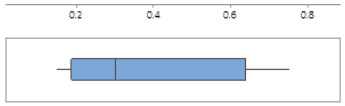
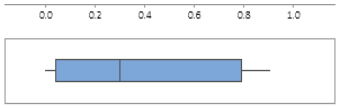


Gráfico 101. Valores de COT por profundidad; AA (T1)



Mínimo	0.15000
1er cuartil	0.18750
Mediana	0.30000
3er cuartil	0.63750
Máximo	0.75000
Media	0.37500
Desv.Est.	0.25981
Varianza	0.06750
Asimetría	1.53960
Curtosis	2.88889
N	4

Gráfico 102. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSAF (T1)



Mínimo	0.00000
1er cuartil	0.03750
Mediana	0.30000
3er cuartil	0.78750
Máximo	0.90000
Media	0.37500
Desv.Est.	0.39686
Varianza	0.15750
Asimetría	0.863919
Curtosis	-0.285714
N	4

Gráfico 103. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSAF (T1)

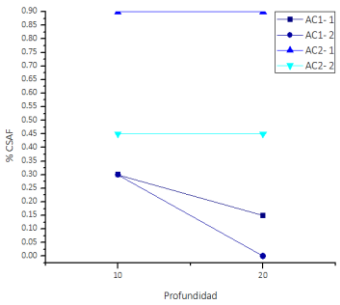
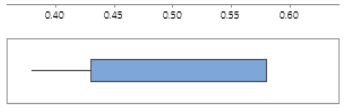
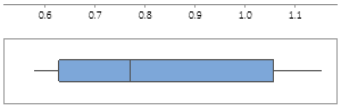


Gráfico 104. Valores de CSAF por profundidad; AA (T1)



Mínimo	0.38000
1er cuartil	0.43000
Mediana	0.58000
3er cuartil	0.58000
Máximo	0.58000
Media	0.53000
Desv.Est.	0.10000
Varianza	0.01000
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 105. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSAC (T1)



Mínimo	0.58000
1er cuartil	0.62750
Mediana	0.77000
3er cuartil	1.05500
Máximo	1.15000
Media	0.81750
Desv.Est.	0.23908
Varianza	0.05716
Asimetría	1.12934
Curtosis	2.22715
N	4

Gráfico 106. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSAC (T1)

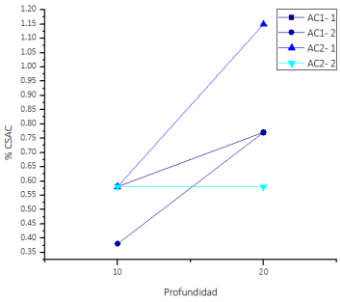
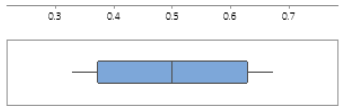
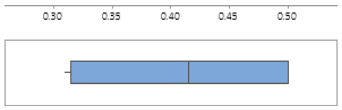


Gráfico 107. Valores de CSAC por profundidad; AA (T1)



Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.37250
Mediana	0.50000
3er cuartil	0.62750
Máximo	0.67000
Media	0.50000
Desv.Est.	0.13880
Varianza	0.01927
Asimetría	0.0
Curtosis	1.5
N	4

Gráfico 108. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSP (T1)



Mínimo	0.31000
1er cuartil	0.31500
Mediana	0.41500
3er cuartil	0.50000
Máximo	0.50000
Media	0.41000
Desv.Est.	0.10424
Varianza	0.01087
Asimetría	-0.03178
Curtosis	-5.81680
N	4

Gráfico 109. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSP (T1)

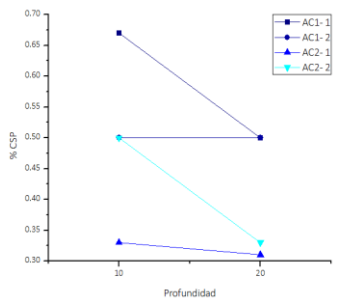
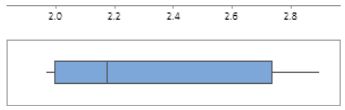
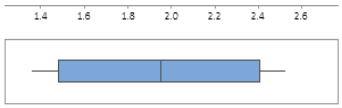


Gráfico 110. Valores de CSP por profundidad; AA (T1)



Mínimo	1.9700
1er cuartil	1.9975
Mediana	2.1750
3er cuartil	2.7350
Máximo	2.8900
Media	2.3025
Desv.Est.	0.4108
Varianza	0.1688
Asimetría	1.49025
Curtosis	2.16133
N	4

Gráfico 111. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - COT (T2)



Mínimo	1.3600
1er cuartil	1.4825
Mediana	1.9500
3er cuartil	2.4025
Máximo	2.5200
Media	1.9450
Desv.Est.	0.4806
Varianza	0.2310
Asimetría	-0.058811
Curtosis	0.661358
N	4

Gráfico 112. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - COT (T2)

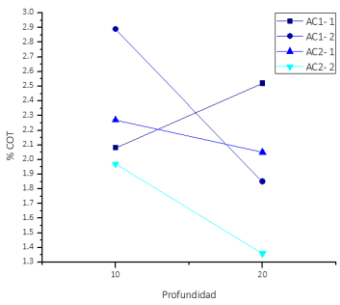
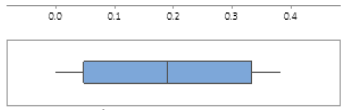
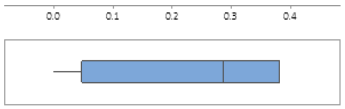


Gráfico 113. Valores de COT por profundidad; AA (T2)



Mínimo	0.00000
1er cuartil	0.04750
Mediana	0.19000
3er cuartil	0.33250
Máximo	0.38000
Media	0.19000
Desv.Est.	0.15513
Varianza	0.02407
Asimetría	0.0
Curtosis	1.5
N	4

Gráfico 114. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSAF (T2)



Mínimo	0.00000
1er cuartil	0.04750
Mediana	0.28500
3er cuartil	0.38000
Máximo	0.38000
Media	0.23750
Desv.Est.	0.18191
Varianza	0.03309
Asimetría	-0.85456
Curtosis	-1.28926
N	4

Gráfico 115. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSAF (T2)

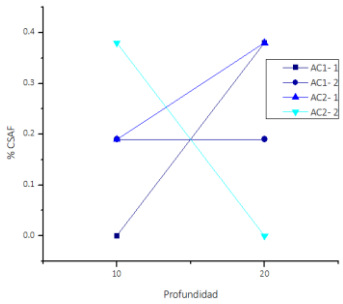
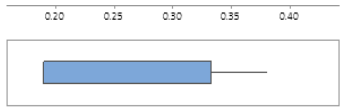
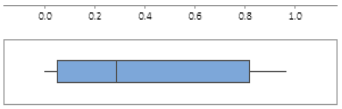


Gráfico 116. Valores de CSAF por profundidad; AA (T2)



Mínimo	0.19000
1er cuartil	0.19000
Mediana	0.19000
3er cuartil	0.33250
Máximo	0.38000
Media	0.23750
Desv.Est.	0.09500
Varianza	0.00903
Asimetría	2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 117. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSAC (T2)



Mínimo	0.00000
1er cuartil	0.04750
Mediana	0.28500
3er cuartil	0.81500
Máximo	0.96000
Media	0.38250
Desv.Est.	0.41508
Varianza	0.17229
Asimetría	1.20725
Curtosis	1.54775
N	4

Gráfico 118. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSAC (T2)

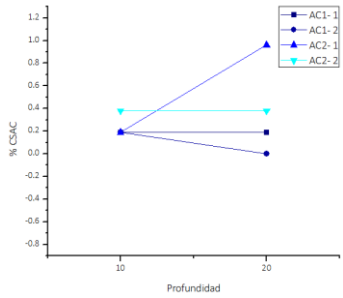
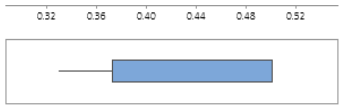
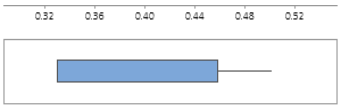


Gráfico 119. Valores de CSAC por profundidad; AA (T2)



Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.37250
Mediana	0.50000
3er cuartil	0.50000
Máximo	0.50000
Media	0.45750
Desv.Est.	0.08500
Varianza	0.00722
Asimetría	-2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 120. Diagrama de caja y bigote; 10 cm, AA - CSP (T2)



Mínimo	0.33000
1er cuartil	0.33000
Mediana	0.33000
3er cuartil	0.45750
Máximo	0.50000
Media	0.37250
Desv.Est.	0.08500
Varianza	0.00722
Asimetría	2
Curtosis	4
N	4

Gráfico 121. Diagrama de caja y bigote; 20 cm, AA - CSP (T2)

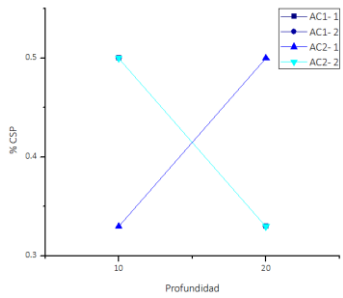


Gráfico 122. Valores de CSP por profundidad; AA (T2)