

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS

LICENCIATURA EN CIENCIAS GEOGRAFICAS CON ENFASIS EN
ORDENAMIENTO DEL TERRITORIO

**ANÁLISIS ESPACIAL DEL CARBONO ORGÁNICO EN LOS SUELOS
Y SU RELACIÓN CON EL USO DE LA TIERRA EN UN TRIBUTARIO DE
LA MICROCUENCA DEL RÍO CHACHAGUA, COMO INSUMO PARA EL
ORDENAMIENTO TERRITORIAL**

Trabajo final de graduación, en modalidad tesis, sometido a consideración del
Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad
Nacional para optar al grado de Licenciatura en Ciencias Geográficas con énfasis en
Ordenamiento del Territorio

Postulantes:

KENNETH PÁEZ CARRILLO
SERGIO RAMÍREZ MEZA

Heredia, Costa Rica
Abril, 2026

Integrantes del Tribunal Examinador

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional, para optar al grado de Licenciatura en Ciencias Geográficas con énfasis en Ordenamiento del Territorio

M.Sc. Luis Eduardo Quesada Hernández

Representante de la Escuela de Ciencias Geográficas

M. Sc. Andrés Alpízar Naranjo

Decano(a) de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

Dra. Marilyn Romero Vargas

Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional

Tutora

Dr. Eugenio González Jiménez

Centro SOLTIS – Texas a & M University

Asesor

M.Sc. Mairon Madriz Martínez

Escuela de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional

Asesor

Tabla de contenidos

Lista de Acrónimos	xii
Agradecimiento.....	xiii
Dedicatoria.....	xiv
Resumen.....	1
1. Introducción	3
1.1 Antecedentes.....	4
1.2. Justificación de la investigación	5
1.3. Planteamiento del problema	7
1.4 Objetivos.....	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
2. Marco Teórico.....	10
2.1. Planificación territorial de cuencas hidrográficas	10
2.2. Usos de la tierra y su importancia en la planificación de cuencas	11
2.3. El suelo como ecosistema y su importancia desde la sostenibilidad.....	13
2.4. El Ciclo del Carbono y su almacenamiento en el suelo	14
2.5. Factores asociados al almacenamiento de Carbono Orgánico.	15
3. Metodología	17
3.1. Área de estudio	17
3.2. Enfoque y diseño de investigación	18
3.3. Métodos y técnicas de investigación	20
3.4. Sujetos y fuentes de información	22
3.5. Población, muestra y sitios de muestreo.....	23
3.6. Instrumentos y técnicas de investigación	26

3.7. Variables e hipótesis de la investigación.....	27
3.8. Recolección de datos	33
3.8.1. Recolección de muestras de suelo.....	33
3.8.2. Carbono Orgánico del Suelo (COS)	34
3.8.3. Densidad Aparente (DA) del suelo	35
3.8.4. Medición indirecta de variables independientes	36
3.9. Análisis de datos.....	39
3.9.1. Análisis estadísticos	39
3.9.2. Análisis espacial con sistemas de información geográfica	39
4. Resultados y discusión.....	41
4.1. Características generales del tributario río Chachagua.....	41
4.1.1. Uso de la tierra	41
4.1.2. Densidad Aparente.....	43
4.1.3. Órdenes y subórdenes de suelo	44
4.1.4. Geomorfología	47
4.1.5. Geología.....	49
4.1.6. Pendiente.....	51
4.1.7. Humedad superficial del suelo.....	53
4.1.8. Valores de temperatura	54
4.2. COS y su relación con variables edáficas y físico-geográficas	56
4.2.1. COS y su relación con los usos de la tierra.....	56
4.2.2. COS y su relación con orden y suborden de suelos	59
4.2.3. COS y su relación con la geomorfología y geología	62
4.2.4. Relaciones entre el COS y altitud (DEM).....	64
4.2.5. COS y temperatura superficial.....	65

4.2.6. COS y humedad superficial	66
4.2.7. COS y pendiente del terreno	67
4.3 Síntesis de patrones espaciales del COS asociados a variables edáficas y físico-geográficas	69
4.3.1. Uso de la tierra	69
4.3.2. Tipos de suelo y DA.....	69
4.3.3. Contexto geomorfológico y geológico.....	70
4.3.4. Altitud/DEM, pendiente, temperatura y humedad superficiales.....	70
4.3.5. Sitio de alta acumulación de carbono.....	71
4.3.6. Distribución espacial del COS según temperatura y altitud.....	71
4.4. Análisis de la herramienta Lazy Regressor como predictor del COS.....	73
4.4.1. Zonificación y lineamientos de ordenamiento territorial del tributario ...	74
5. Conclusiones	81
6. Recomendaciones	82
7. Referencias.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes de información en dos niveles: primarias y secundarias.	23
Tabla 2. Parámetros de Cálculo del Tamaño de la Muestra.	25
Tabla 3. Distribución de la muestra en el muestreo aleatorio estratificado.	25
Tabla 4. Definición conceptual y operacional de variables del estudio.....	28
Tabla 5. Hipótesis de variables dependientes (Y).....	32
Tabla 6. Información de las imágenes satelitales utilizadas para la actualización de usos de la tierra (2024).	37
Tabla 7. Resultados obtenidos de los usos de la tierra, 2024.....	41
Tabla 8. Resultados obtenidos en el Tributario de la Microcuenca del Río Chachagua	77
Tabla 9. Ejemplo de la estructura de la base de datos generada.	93

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Área de estudio, tributario de la microcuenca del Río Chachagua	17
Mapa 2. Mapa de sitios de muestreo del tributario del río Chachagua según los usos de la tierra (2024).....	26
Mapa 3. Tributario Río Chachagua: Usos de la Tierra Tributario Río Chachagua: Usos de la Tierra.....	42
Mapa 4. Tributario Río Chachagua: Orden de Suelo.....	45
Mapa 5. Tributario Río Chachagua: Suborden de Suelo	46
Mapa 6. Tributario Río Chachagua: Geomorfología Tributario Río Chachagua: Geomorfología 48	48
Mapa 7. Tributario Río Chachagua: Geología Río Chachagua: Geología.....	50
Mapa 8. Tributario Río Chachagua: Pendiente.....	52
Mapa 9. Tributario Río Chachagua: valores de humedad.....	53
Mapa 10. Tributario Río Chachagua: valores de Temperatura.....	55
Mapa 11. Distribución Espacial del COS según los niveles de Temperatura.....	72
Mapa 12. Distribución Espacial del COS según los niveles de Elevación (DEM / Z)	73
Mapa 13. Zonificación de la Distribución Espacial del COS según los Usos de la Tierra.....	75
Mapa 14. Zonificación de la Distribución Espacial del COS según el Modelo Digital de Elevación (DEM).....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Métodos de investigación empleados para la comprensión de la distribución del COS en el tributario de la microcuenca del río Chachagua.....	20
Figura 2. Tipos de investigación aplicados al estudio del COS.....	21
Figura 3. Diagrama del muestreo en el GIS para determinar los usos de la tierra.....	24
Figura 4. Imágenes ilustrativas de métodos utilizados en campo y en laboratorio.....	33
Figura 5. Relación de COS (Box-Cox) según el Uso General de la Tierra	57
Figura 6. Relación de COS (Box-Cox) según Tipos Específicos de Cobertura	58
Figura 7. Relación de COS (Box-Cox) según el Orden del Suelo.....	60
Figura 8. Relación de COS (Box-Cox) según el Suborden del Suelo	61
Figura 9. Relación de COS (Box-Cox) según Geomorfología	62
Figura 10. Relación de COS (Box-Cox) según Geología.....	63
Figura 11. Relación de COS (Box-Cox) según Altitud	64
Figura 12. Relación de COS (Box-Cox) según Temperatura	65
Figura 13. Relación de COS (Box-Cox) según Humedad.....	67
Figura 14. Relación de COS (Box-Cox) según Pendiente.....	68
Figura 15. Relación de COS (Box-Cox) según DEM (Z) / Altitud (LSD Fisher).....	93
Figura 16. Relación de COS (Box-Cox) según Temperatura (LSD Fisher).....	94
Figura 17. Relación de COS (Box-Cox) según Humedad (LSD Fisher).....	94
Figura 18. Relación de COS (Box-Cox) según Pendiente - Log (LSD Fisher).....	95
Figura 19. Regresión Lineal comparativa entre COS (Original / Box-Cox) con Temperatura (Box-Cox).....	95
Figura 20. Regresión Lineal comparativa entre COS (Original / Box-Cox) con Humedad (Box-Cox).....	96

Figura 21. Regresión Lineal comparativa entre COS (Original / Box-Cox) con Pendiente (Box-Cox).....	96
Figura 22. Regresión Lineal comparativa entre COS (Original / Box-Cox) con DEM (Z) / Altitud (Box-Cox).....	97
Figura 23. Box Plot de COS (Original / Box-Cox) según Temperatura.....	97
Figura 24. Box Plot de COS (Original / Box-Cox) según DEM (Z) / Altitud.....	98
Figura 25. Box Plot de COS (Original / Box-Cox) según Humedad.....	98
Figura 26. Box Plot de COS (Original / Box-Cox) según Pendiente.....	99

ANEXOS

Anexo 1. Estructura de la Base de Datos Generada.....	93
Anexo 2. LSD (Least Significant Difference) de Fisher de COS (Box-Cox).....	93
Anexo 3. Regresiones Lineales (Transformadas)	95
Anexo 4. Gráficos Box Plots (Original o Sin Transformar)	97

Lista de Acrónimos

- AC: Áreas de Conservación
ANOVA: Análisis de Varianza
AS: Análisis de Suelos
AV: Análisis de Varianza
C: Carbono
CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CS: Conservación de Suelos
CIS: Carbono Inorgánico del Suelo
CO₂: Dióxido de Carbono
COS: Carbono Orgánico del Suelo
CT: Carbono Total
DA: Densidad Aparente
DEM: Modelo Digital de Elevación
FAO: Food and Agriculture Organization
Gt C: Gigatoneladas de Carbono
HA: Hectáreas
MCSD: Método de Combustión Seca de Dumas
MOS: Materia Orgánica del Suelo
ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU: Organización de las Naciones Unidas
OT: Ordenamiento Territorial
PA: Parámetros Ambientales
PT: Planificación Territorial
SIG: Sistemas de Información Geográfica
UT: Usos de la Tierra
ZPAM: Zona de Protección Arenal Monteverde

Agradecimiento

Agradecemos, en primer lugar, a la Universidad Nacional de Costa Rica, por ser educación pública y brindar el espacio académico que hizo posible nuestra formación profesional y el desarrollo de la presente investigación.

Extendemos un especial agradecimiento al Comité Asesor, y de manera particular a nuestra tutora, la Dra. Marylin Romero Vargas, por su acompañamiento constante, orientación académica y valiosos aportes metodológicos y conceptuales que fortalecieron significativamente este trabajo final de graduación.

Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento al Dr. Eugenio González Jiménez, lector de la investigación y director del Centro Soltis para la Investigación y la Educación – Texas A & M University, por el apoyo técnico y las facilidades brindadas para la ejecución del trabajo de campo, incluyendo el acceso a infraestructura, hospedaje, alimentación y laboratorio para el procesamiento de muestras, así como por el respaldo institucional del centro de investigación en general.

Agradecemos también al M. Sc. Mairon Madriz Martínez, por su acompañamiento técnico durante las actividades de campo y por el apoyo en el uso de herramientas especializadas para la recolección de muestras de suelo, fundamentales para el desarrollo de la investigación.

De manera especial, agradecemos a nuestras familias y personas cercanas, padres, madres y parejas, por el apoyo incondicional, la comprensión y la paciencia brindadas a lo largo de este proceso académico.

Reconocemos de forma particular al Dr. Pablo Castro Chacón, colega en Geografía y especialista en suelos, quien en las etapas iniciales de este trabajo nos orientó y guio en el abordaje geoedafológico de la investigación, aportando conocimientos clave que contribuyeron a la construcción del marco conceptual del estudio.

Finalmente, nos agradecemos mutuamente como compañeros tesisistas, por el compromiso, la responsabilidad compartida, el trabajo colaborativo y el apoyo constante que permitieron culminar con éxito este proyecto de investigación.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, en especial a nuestros padres y madres, por el apoyo incondicional, la confianza y el acompañamiento constante a lo largo de nuestra formación académica. Su esfuerzo, paciencia y motivación fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

Asimismo, dedicamos este trabajo a nuestras parejas y personas cercanas, quienes nos brindaron comprensión y respaldo en los momentos de mayor exigencia académica y a todas aquellas personas que, de una u otra forma, creyeron en nosotros y nos impulsaron a seguir adelante.

Resumen

El suelo, además de constituir un elemento importante del paisaje y un recurso fundamental para la seguridad alimentaria, cumple una función ecosistémica estratégica para la regulación climática y el ordenamiento territorial, al actuar como sumidero de carbono orgánico e inorgánico. La variación espacial del carbono se asoció a diversos factores como el tipo de suelo, el relieve, el clima y la cobertura y uso de la tierra. No obstante, a escala de tributarios en la zona norte de Costa Rica, existe información limitada, especialmente detallada, sobre la distribución del carbono orgánico del suelo (COS) y su relación con los usos de la tierra y las variables físico-geográficas. Esta ausencia de datos dificultó la incorporación del COS como criterio técnico en los procesos de planificación y ordenamiento territorial, particularmente en cuencas hidrográficas sometidas a presiones agropecuarias y cambios en la cobertura vegetal.

Desde un enfoque de ordenamiento territorial de cuencas hidrográficas, el objetivo del estudio fue analizar la relación entre el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) y los usos de la tierra en un tributario de la microcuenca del río Chachagua, localizado en la zona norte de Costa Rica. Asimismo, se buscó comprender cómo las características físico-geográficas del área de estudio, tales como geomorfología, geología, tipo de suelo, pendiente, altitud, humedad y temperatura, influyeron en la distribución espacial del COS.

El área de estudio abarcó 2 696, 53 ha y presentó un gradiente altitudinal entre 140 y 1040 m s. n. m. Predominó la cobertura boscosa (62,99 %), seguida por cultivos (20,57 %) y pastos (16,44 %), cuyo historial evidenció que más del 70 % de la superficie había mantenido el mismo uso de la tierra durante varias décadas.

La información fue generada mediante métodos de campo, estos incluyeron el establecimiento de puntos de muestreo y la recolección de muestras de suelo; análisis de laboratorio para la determinación del carbono orgánico del suelo, mediante el método de Combustión Seca y la estimación de la densidad aparente; técnicas de teledetección para la estimación de variables como humedad y temperatura superficial, a partir de imágenes satelitales; y el uso de sistemas de información geográfica para el procesamiento, interpolación y análisis espacial de los datos obtenidos. Asimismo, el análisis incluyó estadística descriptiva, ANOVA, pruebas LSD Fisher, regresiones lineales, gráficos de boxplot, interpolación espacial

y elaboración cartográfica, además de una zonificación del tributario asociada a los patrones de distribución espacial del COS y las variables más significativas.

Los resultados mostraron que la cobertura y uso de la tierra se relacionaron estrechamente con el COS. Los bosques, especialmente en mayores altitudes y con décadas de conservación, almacenaron mayores cantidades de carbono; los pastos presentaron valores intermedios con potencial de mejora; y los cultivos intensivos concentraron los valores más bajos. Asimismo, los Andisoles y Ultisoles evidenciaron mayor capacidad de almacenamiento, mientras que la mayor densidad aparente se asoció a suelos bajo cultivo y la menor a bosques. Entre las variables numéricas, la altitud se consolidó como el mejor predictor del COS, seguida por la humedad (relación positiva) y la temperatura (relación inversa débil).

Con base en la integración de los rangos de carbono orgánico del suelo con variables numéricas (pendiente, altitud, temperatura y humedad superficial) y categóricas (usos de la tierra), se definieron cuatro zonas base para la gestión del tributario como insumo para el ordenamiento territorial. Las zonas con alto COS y cobertura boscosa se orientaron a la conservación y a la aplicación de instrumentos, como los pagos por servicios ecosistémicos; las zonas con valores intermedios de COS y pendientes medias, asociadas a usos agroforestales y sistemas productivos mixtos, se recomendaron para el fortalecimiento de prácticas sostenibles; las áreas con bajo COS y usos agropecuarios intensivos se priorizaron para procesos de restauración ecológica y conservación de suelos; y las zonas urbanas y periurbanas requirieron regulación mediante instrumentos de planificación territorial.

En conclusión, el tributario mantuvo reservas importantes de carbono orgánico del suelo en sus coberturas boscosas, mientras que las áreas agropecuarias intensivas y urbanas presentaron mayor vulnerabilidad. La línea base generada constituyó un insumo técnico relevante para la conservación del suelo, así como la resiliencia ante el cambio climático y la incorporación del COS en lineamientos de ordenamiento territorial de cuencas hidrográficas y planes reguladores.

1. Introducción

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) señala la importancia de considerar las cuencas hidrográficas como unidades territoriales adecuadas para la ordenación territorial (Dourojeanni et al., 2002). En primer lugar, cumplen una función espacial al proveer agua a la naturaleza, la economía y la sociedad, dado su rol dentro del ciclo hidrológico en la captura y oferta del agua precipitada. En segundo lugar, presentan una alta fragilidad ambiental asociada a su propia naturaleza, en la que la cobertura vegetal desempeña un papel fundamental en la regulación y conservación del suelo y el agua. En tercer lugar, las relaciones espaciales entre las condiciones naturales de la cuenca, los usos de la tierra y los intereses múltiples de la sociedad pueden derivar en conflictos territoriales. Además de ser proveedoras del recurso hídrico, las cuencas como unidades físico-naturales poseen características particulares, como su geomorfología y sus suelos, que reflejan su aptitud para el uso de la tierra.

Los suelos se reconocieron como un componente fundamental en la dinámica natural del ciclo hidrológico y del ciclo del carbono, al participar en procesos de infiltración, retención de agua y almacenamiento de materia orgánica. No obstante, este recurso experimentó procesos de pérdida, asociados a la erosión hídrica, fenómeno natural que tendió a intensificarse bajo determinados usos de la tierra y prácticas inadecuadas de manejo productivo (Turner et al., 2007). Cuando los usos de la tierra se ajustaron a la aptitud natural del territorio, conforme a su capacidad de uso, se favoreció la conservación del recurso hídrico y edáfico, así como la estabilidad de los ciclos biogeoquímicos (MAG, 1995). En contraste, el empleo de prácticas no acordes con dicha aptitud derivó en procesos de degradación ambiental, pérdida de funciones ecológicas y disminución de los servicios ecosistémicos que el territorio aportó al territorio (Avendaño et al., 2020; Pires et al., 2011).

Los suelos cumplen un papel fundamental en el ciclo del carbono, un proceso biosfera-atmósfera clave para la vida en la Tierra. El secuestro o captura de carbono consiste en la extracción del CO₂ atmosférico y su almacenamiento en depósitos naturales. Si bien los océanos y los bosques se reconocen como los principales sumideros de carbono, se estima que el suelo almacena casi tres veces más carbono que la atmósfera y cuatro veces más que la biomasa vegetal. En este sentido, Carney et al. (2007) destacan que: “Los bosques pueden capturar grandes cantidades de carbono, pero este, una vez almacenado en el suelo a través de

la materia orgánica, puede desaparecer rápidamente debido a usos y prácticas inadecuadas de la tierra” (p. 8).

De esta manera, el análisis de la relación entre el uso de la tierra y el almacenamiento de carbono, en especial del carbono orgánico del suelo (COS), constituye un insumo valioso para los responsables de la toma de decisión en el diseño de estrategias de conservación de bosques y en la adaptación al cambio climático, bajo un enfoque territorial de cuencas hidrográficas. Finalmente, en el área de estudio predomina el uso bosque, aunque también se presentan extensiones significativas de tierras con uso agrícola y pecuario.

1.1 Antecedentes

El carbono (C) en el suelo se encuentra de dos formas principalmente: orgánica (COS) e inorgánica (CIS) (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2006). El carbono inorgánico está presente principalmente en el material parental primario o en productos pedogénicos secundarios, que contribuyen a la formación del suelo. Sin embargo, su disponibilidad se ve influida por la biomasa aérea y factores edáficos como la densidad aparente, la textura, la profundidad, los procesos de lixiviación, la erosión y la mineralización. Por su parte, el COS proviene de la descomposición de restos vegetales, animales y microorganismos presentes en el suelo (Davis et al., 2017).

El estudio del almacenamiento de carbono en los suelos cobra cada vez más relevancia debido a su papel como alternativa ante el problema global de las emisiones excesivas de CO₂. Trumper et al. (2009), como se citó en Sánchez (2016), resaltan la importancia de los ecosistemas en el almacenamiento de carbono como medida para mitigar las altas concentraciones de CO₂ atmosférico. Este análisis no solo considera los suelos como reservorios de carbono, sino también las presiones económicas que los rodean, dado que los cambios en los usos de la tierra comprometen de manera continua la estabilidad de estos reservorios.

Desde la perspectiva científica, los suelos se estudian como sumideros de carbono, en la medida en que poseen variables ambientales específicas que les permiten cumplir dicha función. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2018) señala factores importantes para el almacenamiento de carbono como la geología local, las variaciones climáticas y, de manera central para la Geografía, el uso de la tierra y el ordenamiento del territorio. Asimismo, subraya que la fracción orgánica del suelo constituye

el “combustible” que asegura la estabilidad de su estructura, el almacenamiento e infiltración de agua, así como la interacción con minerales, nutrientes y microorganismos.

En este contexto, se han desarrollado métodos de cuantificación del carbono en suelos que permiten estimar su concentración y variabilidad. Kloster et al. (2016) destacan dos técnicas de laboratorio: el método de oxidación húmeda, que es de manejo relativamente sencillo, pero con costos elevados debido a los reactivos y a su peligrosidad, y el método de combustión seca de Dumas, que evita el uso de reactivos tóxicos, aunque implica un costo de adquisición mayor. La aplicación de estas metodologías en diferentes regiones evidencia que el almacenamiento de COS depende de factores edáficos y ambientales. Por ejemplo, Huamán et al. (2021) señalan que en suelos arcillosos y arenosos se logra una mayor conservación de carbono, mientras que Bonde, Christensen y Cerri (1992) evidencian que el almacenamiento de carbono varía según la fracción mineral del suelo (arena, limo y arcilla), lo que refleja la influencia de múltiples variables edáficas en la dinámica del COS.

De igual manera, las variables antropogénicas determinan la acumulación de carbono orgánico en los suelos. Mondragón et al. (2022) muestran que las coberturas vegetales mantienen mayores concentraciones de COS en comparación con los pastizales en regeneración natural. En concordancia, Ibrahim et al. (2006) evidencian que en zonas boscosas se registra un mayor nivel de captura de carbono, tanto en el COS como en la biomasa arbórea.

1.2. Justificación de la investigación

El suelo constituye un recurso estratégico para el mantenimiento de la vida, ya que sostiene los procesos ecológicos y productivos que garantizan la seguridad alimentaria y el equilibrio ambiental. No obstante, su estudio exige herramientas y metodologías que permitan comprender sus dinámicas y amenazas actuales. En este sentido, diversos organismos internacionales han resaltado la importancia de generar información que oriente su manejo sostenible. Al respecto, la FAO (2017) señala:

El entendimiento de las funciones globales del suelo, su uso, manejo sostenible y las estrategias para evaluar los riesgos que posee este recurso natural, requiere de información precisa sobre la distribución espacial de las diferentes propiedades del suelo, como la recolección de información, estandarización de datos y la implementación de técnicas eficientes de modelado predictivo. No obstante, el suelo se

ha convertido en uno de los recursos más susceptibles a la degradación y erosión de la tierra, la pérdida de biodiversidad y cambio climático. (p. 45)

El suelo proporciona servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación climática e hídrica, el hábitat para organismos, la biodiversidad y la retención de carbono. Además, constituye el segundo sumidero de carbono más grande del planeta después del océano, con lo cual compensa de manera significativa las emisiones de CO₂. Sin embargo, la intervención antrópica, asociada principalmente a cambios de uso de la tierra, propicia un incremento en la liberación de este gas a la atmósfera y, con ello, intensifica los problemas vinculados al cambio climático (FAO, 2017).

En este sentido, Sánchez (2016) indica: “Los ecosistemas terrestres almacenan cerca de 2 100 gigatoneladas de carbono (GtC) en hojarasca, materia orgánica del suelo y organismos vivientes, casi el triple del presente en la atmósfera” (p. 2).

La acumulación de carbono depende de factores como las especies, el tipo de suelo, el clima y otras características particulares de cada ecosistema (Hofstede et al., 2014). En el caso de los ecosistemas forestales, el carbono se almacena principalmente en la biomasa aérea, cuya capacidad varía según la composición florística, la edad y la densidad de los estratos vegetales (Schulze et al., 2000, como se citó en Sánchez, 2016).

Si bien el carbono presente en la capa superficial del suelo es relevante, el conocimiento sobre las cantidades almacenadas en distintos tipos de suelo sigue siendo limitado. La FAO (2001) reportó que aproximadamente el 68,8 % del carbono de la biosfera se encuentra almacenado en los suelos. No obstante, este porcentaje varió en función del uso de la tierra y de las prácticas de manejo aplicadas, lo que evidenció la influencia de las actividades humanas sobre la dinámica del carbono edáfico (Bertzky et al., 2011; Sánchez, 2016).

En este marco, se refuerza la necesidad de conocer la capacidad de almacenamiento, liberación o neutralidad del carbono en el tributario de estudio, con el fin de formular lineamientos que contribuyan al manejo sostenible de los usos de la tierra. La importancia de proteger los recursos naturales, y en particular los suelos, radica en mejorar las prácticas de uso y fomentar un ordenamiento territorial basado en cuencas hidrográficas.

El tributario seleccionado para esta investigación pertenece a la microcuenca del río Chachagua, el cual se ubica en el gradiente de elevación medio del complejo boscoso Arenal–

Monteverde, un espacio caracterizado por la interacción entre áreas protegidas, cultivos intensivos como la piña, ganadería, agricultura de subsistencia y actividades de ecoturismo. Este entorno complejo ofrece condiciones únicas para desarrollar investigación aplicada al ordenamiento territorial. González (2017) resalta que la mayoría de los estudios de la región se concentran en los ecosistemas tropicales de alta montaña o en las tierras bajas, dejando de lado aquellos ubicados en elevaciones medias, como es el caso de la presente investigación.

Finalmente, la justificación de este estudio se centra en el valor estratégico de los suelos como reservorios de carbono y en el potencial de la Geografía para aportar herramientas que fortalezcan su gestión sostenible. Comprender cómo influyen los usos de la tierra y las prácticas de manejo en la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS), así como cuantificar sus reservas, permitirá proponer lineamientos que orienten el ordenamiento territorial de cuencas en concordancia con la realidad ambiental y socioeconómica de la zona.

1.3. Planteamiento del problema

El potencial de los suelos para almacenar carbono está estrechamente asociado con los órdenes de suelo, los usos de la tierra y las prácticas de manejo aplicadas. Si bien la fijación de este elemento constituye una característica relevante de los suelos, las actividades económicas del sector primario representan un gran desafío para mantener este servicio ambiental. Como señala López (1994), la degradación del suelo responde a fenómenos naturales como la sequía y la aridez; sin embargo, la mayor proporción proviene de las actividades humanas que generan un uso descontrolado del recurso y ejercen presión sobre su disponibilidad futura.

En la misma línea, la FAO (2017) reconoce al suelo como eje central de la seguridad alimentaria y de los servicios ecosistémicos. No obstante, el uso insostenible del recurso limita los beneficios que se pueden obtener, especialmente en relación con la fijación de carbono. A esto se suma la expansión urbana, que constituye otro reto para la gestión de los usos de la tierra. En el tributario de la microcuenca del río Chachagua el crecimiento urbano evidenció un aumento de 211,63 ha en 2014 a 241,43 ha aproximadamente en 2024, lo que representó un incremento aproximado del 14 % en una década. Por otra parte, los cultivos y pastizales aledaños a los bosques representaron un factor de presión para la conservación, considerando que en la región predominan sistemas productivos asociados a la ganadería extensiva y al uso de insumos agroquímicos, especialmente en áreas de altitud media y baja donde se concentran los usos agropecuarios. Estas actividades, junto con la expansión de la frontera agrícola,

incidieron sobre las condiciones naturales, los límites y la superficie de los bosques (Alarcón et al., 2007).

La problemática se intensifica con la variable del cambio climático, que también incide en los suelos. La Agencia Europea del Medio Ambiente (2019) advierte sobre el aumento de la temperatura, las variaciones en los patrones de precipitación y sus consecuencias directas en la materia orgánica del suelo. Estos procesos se manifiestan en problemáticas como desertificación, erosión, inundaciones y sequías, que condicionan el recurso a futuro y plantean la necesidad de desarrollar estrategias de mitigación y adaptación.

En el área de estudio no se han desarrollado investigaciones científicas previas de este tipo, pese a que presenta una gran heterogeneidad de usos de la tierra, incluyendo áreas de cultivos, pastos y bosques de protección. En este contexto, el presente estudio establece una línea base de investigación enmarcada en la planificación territorial de cuencas hidrográficas en la Zona Norte de Costa Rica, desde un enfoque geográfico, lo cual implica análisis espacial para abordar las interrelaciones naturaleza-sociedad, en este caso variables físico-geográficas, uso de la tierra y almacenamiento de Carbono Orgánico del Suelo, en un espacio geográfico concreto.

En esta relación, el análisis está orientado a comprender ¿Cuánto carbono orgánico almacena el suelo del área de estudio? ¿Cuál es su distribución espacial en función de los usos de la tierra? ¿Cuál uso de la tierra, bajo las mismas condiciones de suelo y altitud, presenta las mayores cantidades de COS? ¿Qué variables físico-geográficas, como por ejemplo tipo de suelo, relieve, condiciones de humedad y temperatura superficial, están asociadas con el almacenamiento de COS? Asimismo, el propósito del estudio fue generar insumos de línea base que fortalezcan el ordenamiento territorial sostenible del tributario y la zona en general, esto a través de una propuesta de zonificación acorde con los resultados encontrados. Para tal fin, se plantearon una serie de hipótesis de investigación que se muestran en el apartado metodológico.

1.4 Objetivos

Objetivo General

Analizar la relación entre el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo y los usos de la tierra, mediante métodos directos e indirectos, como aporte al ordenamiento territorial en un tributario de la microcuenca del río Chachagua.

Objetivos Específicos

- Caracterizar el área de estudio en términos de usos de la tierra, tipos de suelo, densidad aparente del suelo, relieve y altitud, mediante métodos directos e indirectos.
- Determinar la distribución espacial del carbono orgánico almacenado en el suelo y su relación con los usos de la tierra, utilizando métodos de campo, de laboratorio, estadísticos y sistemas de información geográfica.
- Brindar lineamientos de ordenamiento territorial para un tributario de la microcuenca del río Chachagua, en relación con los resultados obtenidos, respecto al almacenamiento de carbono orgánico y los usos de la tierra.

2. Marco Teórico

En este capítulo se exponen los enfoques y conceptos teóricos que sustentan el problema de investigación y los objetivos propuestos. El estudio se desarrolla desde la perspectiva del ordenamiento territorial de cuencas hidrográficas y la planificación del uso de la tierra (Duarte, 2007), con el propósito de comprender, mediante un estudio de caso, la relación entre el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS), los usos actuales de la tierra y las variables físico-geográficas. Desde la perspectiva del Ordenamiento Territorial (OT), los usos de la tierra constituyen la base de la planificación, independientemente de la unidad espacial de planificación y gestión, sea cuenca hidrográfica o cantón. En este caso, la unidad de análisis espacial corresponde a un tributario o afluente, entendido como un espacio físico-natural que integra componentes biofísicos y socioeconómicos (uso de la tierra), y que permite analizar de manera integral escenarios territoriales.

2.1. Planificación territorial de cuencas hidrográficas

El estudio se fundamentó en los principios de la geoedafología, disciplina que entiende el suelo como una entidad natural y como miembro del complejo geográfico, integrando sus propiedades físicas, químicas y biológicas al análisis territorial (Huguet Villar, 1983). Asimismo, desde la Geografía Física y Ambiental, la cuenca hidrográfica se emplea como unidad espacial de análisis, ya que constituye un espacio natural donde interactúan variables físicas y sociales que generan patrones espaciales particulares con efectos diversos (Villareal, 2007). Su función principal es la regulación del ciclo hidrológico y la provisión del recurso hídrico. Además de este proceso fundamental, la presencia de cobertura vegetal resulta fundamental en la regulación del ciclo del carbono, al contribuir en el control de la erosión del suelo (Balvanera & Cotler, 2007).

La biomasa arbórea y el almacenamiento de carbono orgánico (COS) en el suelo se relacionan estrechamente con los usos y manejos de la tierra. En este sentido, Cifuentes et al. (2004) señalaron que la erosión hídrica, aunque constituye un proceso natural, se intensifica debido a prácticas inadecuadas de uso y manejo de la tierra, lo que provoca degradación del ecosistema y pérdida de servicios ecosistémicos, entre ellos el almacenamiento de carbono orgánico, fundamental para la mitigación del cambio climático.

Asimismo, Moreira et al. (2020) señalaron que las coberturas y los usos de la tierra determinan de manera directa la dinámica de las cuencas hidrográficas, ya que sobre la base de

estos se establecen diagnósticos de problemáticas y propuestas de manejo ambiental. De forma complementaria, Jiménez (2004) plantea que los retos asociados al manejo individual de los usos de la tierra se intensifican por los procesos de intervención de los actores sociales. Dichos procesos se tornan más complejos cuando se incluyen variables políticas y técnicas de manejo, pues en ellas convergen intereses de desarrollo que requieren ser abordados bajo una visión sistémica del espacio (González et al., 2002, como se citó en Báez et al., 2021).

La planificación territorial de cuencas hidrográficas se consolida como un instrumento de gobernanza establecido a nivel mundial, cuyo propósito es regular y controlar las actividades de individuos y grupos en diferentes regiones y territorios, de manera que los efectos negativos se reduzcan al mínimo. En consecuencia, este proceso busca promover un aprovechamiento más eficiente de los espacios, los paisajes y el medio, así como de las actividades económicas y sociales que en ellos se desarrollan (Pires et al., 2011).

En este marco, la importancia de la planificación territorial de cuencas está asociada al ordenamiento del territorio, entendido como la aplicación normativa de los procesos de planificación, radica en integrar la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos en los procesos de planificación, constituyéndose en un insumo para la conservación de suelos, el manejo adecuado de los usos de la tierra y el almacenamiento de carbono (Avendaño et al., 2020). Finalmente, Barrantes (2022) destaca que todo proceso de planificación territorial debe considerar el recurso edáfico como un potencial o una limitante frente a determinados usos posibles o deseables de la tierra.

2.2. Usos de la tierra y su importancia en la planificación de cuencas

Es fundamental precisar el concepto de tierra, entendido como un elemento relevante en la planificación territorial de cuencas y en el manejo y conservación del suelo y el agua. Desde 1976, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1976) conceptualizó la tierra como una unidad espacial que integra componentes climáticos, edáficos, topográficos e hidrológicos, junto con la cobertura vegetal y la influencia de las actividades humanas pasadas y actuales, susceptible de delimitación y evaluación para fines de planificación y manejo sostenible. Richters (1995) complementa esta visión al señalar que se trata de un ecosistema en el cual interactúan vertical y horizontalmente diversos subsistemas (biosfera, atmósfera, hidrosfera y antroposfera), cuyas dinámicas incluyen impactos derivados de las actividades humanas, tanto dentro como fuera del sitio.

Desde un enfoque de sostenibilidad, la tierra posee una aptitud, capacidad o vocación para determinados usos. Cuando se sobrepasa esta capacidad, se genera degradación y pérdida de recursos como el suelo, el agua o la biota. La capacidad de uso de la tierra se entiende, entonces, como la habilidad de un terreno específico para soportar de manera sostenible y productiva distintos tipos de usos: agrícola, forestal, urbano, industrial o recreativo, en función de factores físicos, climáticos, biológicos y humanos, como la textura del suelo, la topografía, la disponibilidad de agua, la vegetación y las prácticas de manejo (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 1995).

Para evaluar esta capacidad se han desarrollado sistemas de clasificación que consideran aspectos como la erosión, la fertilidad, la permeabilidad, la susceptibilidad a inundaciones o la pendiente. Estos permiten determinar los usos más apropiados y sostenibles en cada área (SIMOCUTE, 2023). En el caso del tributario en estudio, esta herramienta resulta clave para orientar lineamientos de ordenamiento territorial que optimicen el uso de los recursos naturales y minimicen los impactos ambientales negativos.

En la planificación territorial de los usos de la tierra se distinguen dos conceptos relacionados: cobertura y uso de la tierra. La cobertura se refiere a los atributos biofísicos de la superficie terrestre, como suelos, subsuelos, biota, topografía, acuíferos, aguas superficiales o edificaciones humanas. En este sentido, Lambin et al. (2003) la definen como “los atributos de la superficie terrestre (no océanos) del Planeta Tierra: suelo, subsuelo, biota, topografía, los acuíferos, aguas superficiales, las edificaciones humanas” (p. 1). Por su parte, los usos de la tierra se entienden como los fines para los cuales los humanos explotan esa cobertura, incluyendo tanto la manipulación de atributos biofísicos como la intención que subyace a dicha manipulación (Lambin et al., 2003).

Los usos de la tierra permiten identificar patrones de cambio condicionados por variables biofísicas, socioeconómicas y espaciales, explorar escenarios futuros, evaluar la influencia de políticas públicas y proponer ajustes para mejorar el ordenamiento territorial (Pinos, 2016). En Costa Rica, estas categorías se encuentran bien diferenciadas en el Sistema de Clasificación de la Cobertura y Uso de la Tierra, versión 2.0 (SIMOCUTE, 2023).

En síntesis, tanto los usos de la tierra como la cobertura constituyen elementos fundamentales para generar bases de referencia en múltiples aplicaciones, que incluyen el monitoreo forestal y pastoril, la elaboración de estadísticas, la planificación e inversión, la

conservación de la biodiversidad, la mitigación del cambio climático y el control de la desertificación. Como destacan Turner, Lambin y Reenberg (2007), los cambios de uso y cobertura de la tierra tienen implicaciones directas sobre los ecosistemas y la provisión de bienes y servicios ambientales, lo que refuerza su papel como referencia clave para el análisis de la sostenibilidad y el cambio global.

Complementariamente, el manejo de la tierra se concibe como la manipulación biofísica o tecnológica aplicada sobre las coberturas. Esto incluye prácticas como el uso de fertilizantes y plaguicidas, el riego, la mecanización o el mejoramiento genético. Entre los usos más frecuentes destacan la conservación de bosques, la agricultura, los cultivos permanentes, el pastoreo, las plantaciones forestales y los usos urbanos e industriales, los cuales pueden subdividirse en categorías más específicas.

2.3. El suelo como ecosistema y su importancia desde la sostenibilidad

El suelo corresponde a la capa más superficial de la corteza terrestre y representa uno de los recursos naturales más importantes, al ser el sustrato que sustenta la vida en el planeta. Aún más, el suelo es un subsistema de la tierra, un ecosistema en sí mismo. Es un cuerpo natural tridimensional que se forma por la alteración física y química progresiva del material original o roca madre, a lo largo del tiempo, bajo condiciones climáticas y topográficas específicas y sometido a la acción de los organismos vivos (Ortiz, 2015). En este sentido, Ortiz (2015) también lo describe como un sistema donde ocurren procesos de conversión y transformación de materia y energía, por lo que puede considerarse una entidad en evolución, resultado de flujos geológicos, biológicos y meteorológicos.

En una perspectiva complementaria, Buol (1973) concibe el suelo como un sistema dinámico abierto, constantemente perturbado por fuerzas internas y externas. Se trata de un balance de entradas y salidas que se mantiene en un medio de procesos complejos y dinámicos, los cuales incluyen el intercambio con el medio ambiente de materiales como agua, oxígeno y dióxido de carbono; las respuestas de control automático, como contracciones y dilataciones o procesos de congelación y descongelación; así como la producción y consumo de nuevos materiales orgánicos e inorgánicos.

Dentro de los componentes esenciales del suelo se encuentra la materia orgánica (MOS), considerada un indicador de calidad, ya que mejora sus propiedades físicas y actúa como reserva de nutrientes (Varvel, 1994). La MOS está constituida por residuos de animales,

plantas y microorganismos en distintos grados de descomposición, además de compuestos orgánicos que se asocian con la fracción mineral del suelo, lo que favorece su estabilidad (Six et al., 2002). Entre sus componentes se distinguen la biomasa de la fauna, la biomasa microbiana, la fracción liviana, los aportes de raíces y material vegetal subterráneo, el humus estable y las sustancias orgánicas solubles en agua (Grand & Michel, 2020). Derivado de la MOS se encuentra el carbono, el cual se almacena en el suelo y tiene importancia vital para la vida (Martínez et al., 2008).

Desde el enfoque de la sostenibilidad, la conservación del suelo se fundamenta en la relevancia de este recurso para las actividades económicas globales, especialmente por constituir la base de la producción alimentaria. No obstante, se trata de un recurso finito que requiere ser preservado bajo criterios de conservación (Serrano et al., 2017). En este sentido, el desarrollo sostenible demanda un uso racional que permita preservar el recurso para las generaciones futuras (Sachs, 2015). Según López (2020), esta visión prospectiva implica acompañar la planificación con acciones concretas orientadas a asegurar el funcionamiento y el aprovisionamiento actual del suelo, de manera que las generaciones futuras dispongan de las condiciones necesarias para continuar su aprovechamiento sostenible.

2.4. El Ciclo del Carbono y su almacenamiento en el suelo

El carbono constituye la base de la vida en el planeta, al formar parte de un ciclo esencial para el desarrollo de todos los organismos. Este elemento se acumula en diferentes depósitos: los océanos almacenan la mayor cantidad (38 000 Gt), seguidos por los suelos (15 000 Gt), la atmósfera (759 Gt) y la vegetación (560 Gt), entre los cuales circula de manera activa (FAO, 2002). Martínez y Fernández (2004) destacan que el carbono (C) es un componente fundamental de los compuestos orgánicos, en los que se combina con nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno para constituir las moléculas esenciales para la vida. Como sucede con otros elementos, la disponibilidad de C en el planeta no es infinita, por lo que circula constantemente entre la materia orgánica y el ambiente fisicoquímico.

El ciclo del carbono inició con la fijación del carbono inorgánico presente en la atmósfera, generado tanto por procesos naturales como por actividades antrópicas. A través de la fotosíntesis, las plantas y algunos microorganismos transformaron ese carbono inorgánico en carbono orgánico, proceso mediante el cual el CO₂ y el agua reaccionaron para formar compuestos orgánicos y liberar oxígeno hacia la atmósfera (Post & Kwon, 2000). Parte de esos

carbohidratos son consumidos como fuente de energía por la planta, mientras que el CO₂ es liberado nuevamente a través de las hojas o raíces. Una fracción es transferida a los animales herbívoros, que igualmente emiten CO₂ en sus procesos metabólicos. Finalmente, al morir las plantas y los animales, los microorganismos del suelo descomponen sus tejidos, oxidando el carbono en forma de anhídrido carbónico y devolviéndolo a la atmósfera, donde reinicia el ciclo (Polzot, 2004).

El carbono orgánico del suelo (COS) se encuentra tanto en la biomasa vegetal y animal como en los microorganismos. Según Martínez et al. (2008), este constituye un componente esencial de los ecosistemas terrestres. De acuerdo con datos de la FAO (2002) y de Sánchez (2016), aproximadamente un 75 % del carbono de los ecosistemas terrestres corresponde a carbono orgánico. En este contexto, el suelo se reconoce como un reservorio de carbono más importante incluso que la atmósfera y la vegetación terrestre (FAO, 2001). Esto lo convierte en un sumidero clave que requiere monitoreo y conservación para mitigar el cambio climático.

El suelo, además de ser un recurso vital para la alimentación humana, está conformado por una fracción inorgánica y otra orgánica (Trinidad-Santos & Velasco-Velasco, 2016). La FAO (2002) subraya que los suelos agrícolas desempeñan un papel estratégico como sumideros de carbono, al ser el segundo reservorio más importante en la captura de CO₂ emitido a la atmósfera. No obstante, la capacidad de los suelos para actuar como sumideros depende directamente de las prácticas de manejo implementadas. Como advierte Burbano (2018), un manejo inadecuado puede convertirlos en importantes emisores de CO₂, en lugar de reservorios.

2.5. Factores asociados al almacenamiento de Carbono Orgánico.

De acuerdo con la literatura, el tipo de suelo es un factor asociado al almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS). Los suelos han sido objeto de investigación por su relevancia en el bienestar humano y los beneficios ecosistémicos que aportan. Martínez et al. (2008) señalan que, en contextos donde este orden de suelo está presente, los Histosoles presentan la mayor captura de COS, con 0,205 COS/área (PG, 103 km²).

Otro factor clave asociado al almacenamiento de COS es la densidad aparente (DA). Hiederer y Köchy (2011, como se citó en Lefèvre, 2017) afirman que:

Es el factor más importante para estimar las reservas de COS y el principal responsable de las variaciones entre estimaciones. Las reservas de COS en áreas con suelos de alto contenido en carbono orgánico son las más afectadas por la variabilidad de densidad aparente (p. 39).

Asimismo, el uso de la tierra y las prácticas de manejo constituyeron una variable clave en el almacenamiento de carbono en los suelos. La implementación de prácticas sostenibles y la protección de ecosistemas naturales resultaron fundamentales para maximizar el secuestro de carbono y mitigar el cambio climático, especialmente a escala de cuencas hidrográficas (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2018). No obstante, las transformaciones en el uso de la tierra generaron repercusiones ambientales, sociales y económicas, entre ellas alteraciones en el ciclo del carbono derivadas de la liberación del carbono previamente almacenado en el suelo (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2014). En este sentido, la gestión sostenible de dichos cambios se planteó como un elemento estratégico para la conservación de los recursos naturales, la biodiversidad y el bienestar de las generaciones presentes y futuras.

Adicionalmente, las condiciones físico-ambientales, particularmente la humedad y la temperatura, desempeñan un papel relevante en el almacenamiento del carbono orgánico del suelo (COS). Estas variables influyen directamente en la actividad microbiana, ya que controlan la velocidad a la que se descompone la materia orgánica, proceso determinante para la acumulación y conservación del COS (Lal, 2004). Asimismo, el aumento de la temperatura del suelo se asocia con una intensificación de los procesos de mineralización, lo que puede traducirse en una reducción de las reservas de carbono orgánico del suelo (Crowther et al., 2016).

Por su parte, la pendiente condiciona la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo, observándose que las pendientes más pronunciadas tienden a limitar dicha acumulación, mientras que las pendientes suaves la favorecen. Este comportamiento se encuentra asociado principalmente a los procesos erosivos y a la redistribución lateral de los suelos a escala del paisaje (Doetterl et al., 2016; Van Oost et al., 2007).

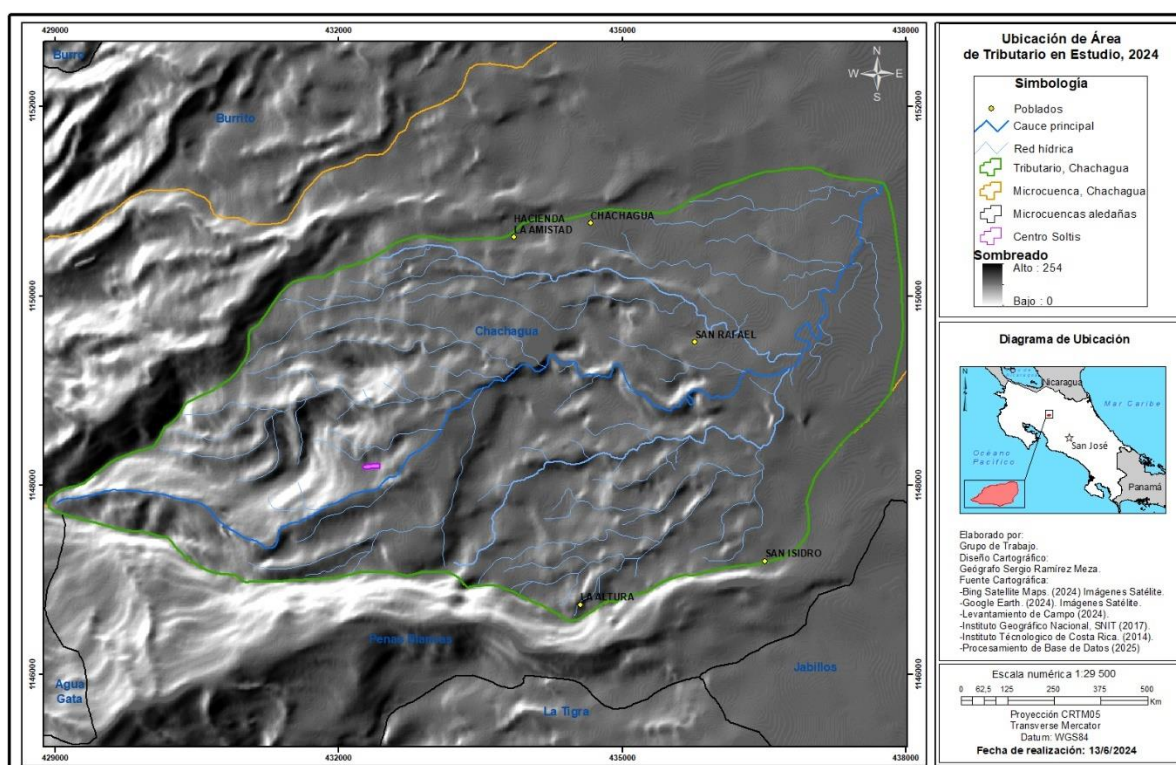
3. Metodología

3.1. Área de estudio

La investigación se desarrolla en el tributario del río Chachagua, perteneciente a la microcuenca del mismo nombre, localizado en el distrito de Peñas Blancas, cantón de San Ramón, provincia de Alajuela, Costa Rica (Mapa 1). El área de estudio abarca una extensión aproximada de 2 696 hectáreas (26,96 km²), con un perímetro cercano a 23 008 m, y se inserta dentro del gradiente altitudinal medio del complejo boscoso Arenal–Monteverde.

Mapa 1.

Área de Estudio, Tributario del río Chachagua



La altitud del tributario oscila entre 140 y 1 040 m s. n. m., lo que genera un gradiente altitudinal marcado y, en consecuencia, una diversidad de condiciones geomorfológicas, climáticas, edáficas y ecológicas, relevantes para el análisis del carbono orgánico del suelo. Desde el punto de vista hidrográfico, la microcuenca del río Chachagua está conformada por dos tributarios principales: el río o quebrada Chachagüita, ubicado en el sector norte, y el río Chachagua, localizado en el sector sur. Este último constituye el objeto específico de análisis de la presente investigación, por lo que el área de estudio se denomina en adelante tributario del río Chachagua.

El tributario se localiza entre las coordenadas geográficas 10°28'0" N y 10°21'0" N de latitud norte, y 84°41'0" O y 84°33'0" O de longitud oeste. Limita al norte con el tributario Chachagüita, al noroeste con la microcuenca Agua Caliente, al suroeste con la microcuenca Agua Gata y al sureste con la subcuenca de Peñas Blancas, de la cual forma parte. De acuerdo con el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2017), el área se encuentra representada en la hoja topográfica Fortuna, a escala 1:50 000. Entre los principales centros poblados del área destacan Chachagua, en el sector norte; San Rafael, en la parte central; y San Isidro y La Altura, hacia el sector sur.

Según Agüero et al. (2014), en el tributario del río Chachagua predomina la cobertura boscosa, especialmente en el sector noroeste, asociado a mayores altitudes y pendientes y a la proximidad con el Volcán Arenal. Esta cobertura se extiende con una orientación general noroeste–sureste y ocupa una superficie aproximada de 1 545 hectáreas, constituyéndose en el uso de la tierra dominante. En la periferia del área de estudio se distribuyen coberturas de pastos y cultivos, así como áreas construidas en menor proporción, correspondientes a asentamientos urbanos e infraestructura industrial, que en conjunto abarcan alrededor de 211 hectáreas.

Los pastos, segundo uso en extensión después del bosque, corresponden principalmente a áreas destinadas a ganadería extensiva o a espacios resultantes de la extracción histórica de especies maderables. Estas coberturas se localizan principalmente alrededor del núcleo boscoso, con mayor presencia hacia los sectores sur, noreste y noroeste, incluyendo áreas próximas a los bosques riparios.

Por su parte, las áreas agrícolas se concentran, principalmente, en el noreste del tributario, en las cercanías de los poblados de Chachagua y San Rafael, mientras que hacia el sur predominan parcelas de menor tamaño asociadas a los poblados de La Altura y San Isidro. En total, la cobertura agrícola alcanza aproximadamente 451,6 hectáreas, constituyéndose en el tercer uso de la tierra más extenso dentro del área de estudio.

3.2. Enfoque y diseño de investigación

La presente investigación adopta principalmente un enfoque cuantitativo, dado que se centra en la medición y el análisis numérico de variables edáficas y físico-geográficas, tales como el carbono orgánico del suelo (COS), la densidad aparente, la altitud, la pendiente, la humedad y la temperatura. Estas variables se procesan mediante técnicas estadísticas como análisis de varianza (ANOVA), pruebas post hoc (LSD Fisher), regresiones lineales y

correlaciones, lo que permite establecer relaciones objetivas y verificables entre los usos de la tierra y el almacenamiento de carbono. Asimismo, el tratamiento estadístico de los datos favorece la identificación de patrones espaciales y tendencias significativas dentro del área de estudio, aportando solidez empírica a los resultados obtenidos. No obstante, el estudio incorpora elementos cualitativos al interpretar los resultados en el marco del ordenamiento territorial, la sostenibilidad y la planificación del uso del suelo. Esta integración otorga una visión más integral del fenómeno investigado, al combinar el rigor numérico con el análisis territorial aplicado y contextualizar los hallazgos dentro de la realidad socioambiental del tributario.

En consecuencia, se trata de una investigación de carácter cuantitativo con componentes interpretativos cualitativos, orientada a generar conocimiento aplicable tanto en el ámbito científico como en la gestión territorial. Tal como señalan Hernández et al. (2014), “En la mayoría de los estudios cuantitativos se pretende generalizar los resultados y descubrimientos encontrados en los casos (muestra) a un universo mayor (población). Asimismo, en ocasiones es deseable que las investigaciones efectuadas puedan replicarse” (p. 7). En este sentido, el enfoque adoptado permitió no solo describir la variabilidad del COS, sino también establecer inferencias fundamentadas sobre su comportamiento, en relación con las variables físico-geográficas consideradas.

El diseño de la investigación se enmarcó en un enfoque cuantitativo no experimental, de tipo transversal. Por un lado, no se manipularon deliberadamente las variables de estudio (Hernández-Sampieri et al., 2014). Es decir, “se observaron los fenómenos tal como se dieron en su contexto natural para posteriormente analizarlos” (p. 152). Bajo esta lógica, las variables independientes consideradas: uso de la tierra, pendiente, geología, altitud, humedad y temperatura se analizaron en su estado natural, con el fin de comprender la distribución del carbono orgánico del suelo (COS) en las condiciones actuales del área de estudio y evaluar su comportamiento espacial sin intervenir en los procesos ambientales. Por otro lado, el diseño transversal se refirió a la recolección de información en un periodo específico, correspondiente a un único momento temporal (Hernández-Sampieri et al., 2020).

Este enfoque permite comparar de manera simultánea las diferentes categorías de uso de la tierra (bosque, pastos y cultivos) y analizar su comportamiento en relación con el almacenamiento de carbono orgánico (COS), ofreciendo así una visión de la dinámica del

tributario en un solo corte temporal y proporcionando una base diagnóstica para futuras investigaciones longitudinales.

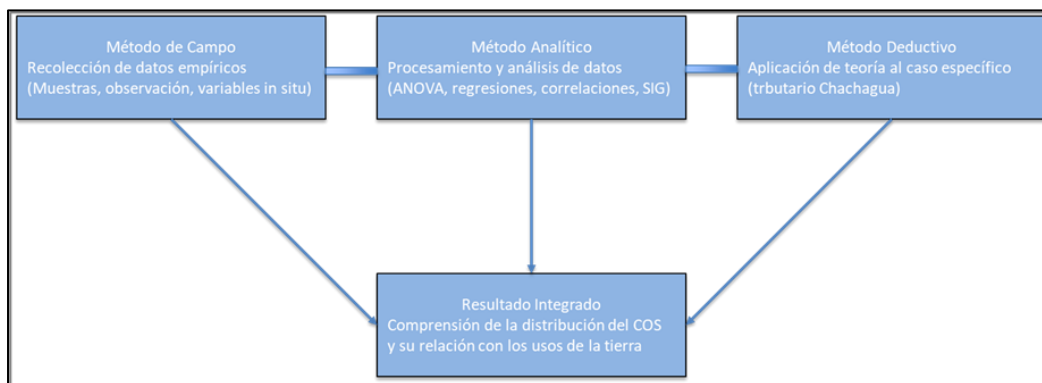
3.3. Métodos y técnicas de investigación

La investigación se sustenta en una combinación de métodos complementarios que permiten abordar el objeto de estudio desde diferentes perspectivas, tal cual se muestra en la Figura 1.

En primer lugar, el método de campo se centra en la recolección directa de muestras de suelo en sitios representativos, previamente seleccionados —bosques, cultivos y pastos— mediante un muestreo estratificado. Este procedimiento se complementa con la observación de condiciones ambientales y el registro, en fichas técnicas de cada muestra, considerando variables como altitud, uso de la tierra y ubicación geográfica. Estos datos empíricos constituyen la base para los análisis de laboratorio y la validación en los sistemas de información geográfica (SIG). Como señalan Pimienta et al. (2018), “la investigación de campo procura obtener datos relevantes y fidedignos de un informante con el objetivo de entender, verificar, corregir y aplicar conocimiento” (p. 54).

Figura 1.

Métodos de investigación empleados para la comprensión de la distribución del COS en el tributario de la microcuenca del río Chachagua.



Posteriormente, el método analítico permite descomponer el fenómeno en sus elementos constitutivos COS, pendiente, altitud, geología, humedad, temperatura y usos de la tierra, para analizarlos individualmente y luego integrarlos. En esta fase, los análisis estadísticos (ANOVA, regresiones y correlaciones) y espaciales (mapas en SIG) resultan esenciales para identificar patrones y relaciones significativas. Según Pimienta et al. (2018), este método, que combina análisis y síntesis, se describe de la siguiente manera:

Consiste en la separación o descomposición de un fenómeno en partes para analizarlas de manera individual y posteriormente, reunir las y estudiarlas en su totalidad. Los métodos analíticos y los sintéticos pueden ser utilizados, y con frecuencia así sucede, como métodos complementarios en la investigación (p. 31).

Finalmente, el método deductivo parte de teorías y conceptos generales sobre el papel del suelo como sumidero de carbono y la influencia del uso de la tierra en la captura de COS, para aplicarlos al caso específico del tributario de Chachagua. Este enfoque permite derivar conclusiones particulares a partir de marcos conceptuales universales. Tal como lo explican Pimienta et al. (2018), el método deductivo:

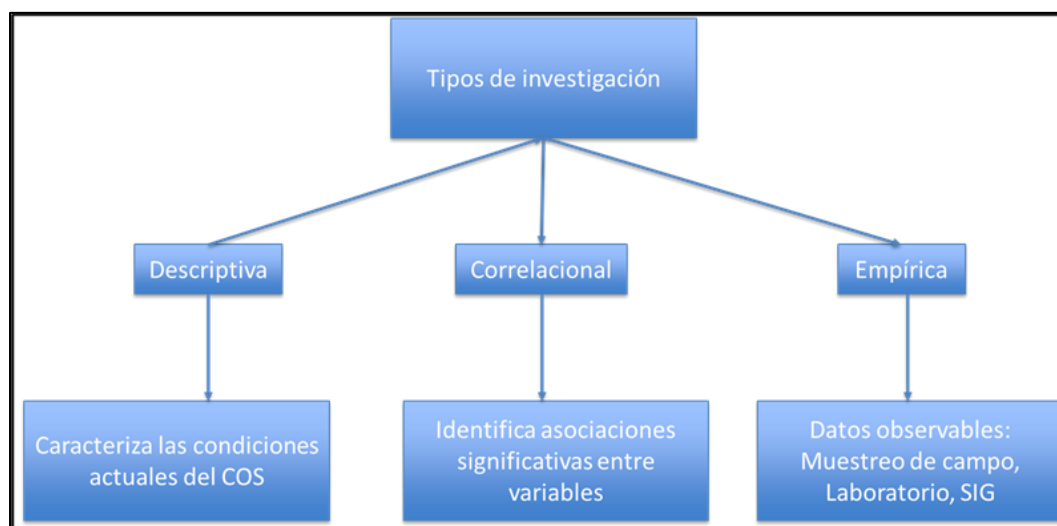
Está asociado al quehacer filosófico y científico desde su origen. Se fundamenta en la noción de derivabilidad, es decir, la derivación ordenada de enunciados a partir de otros, siguiendo un conjunto de principios lógicos de inferencia o reglas válidas de deducción (p. 50).

La aplicación integrada de estos métodos fortalece la coherencia entre teoría y práctica, y asegura una comprensión integral de la dinámica del carbono orgánico del suelo, en relación con los usos de la tierra.

La investigación se clasifica como descriptiva, correlacional y empírica, de acuerdo con las características de su desarrollo metodológico (Fig. 2). Estas tipologías se sustentan en lo planteado por Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista (2014, pp. 4, 92–93).

Figura 2.

Tipos de investigación aplicados al estudio del carbono orgánico del suelo (COS).



Asimismo, es descriptiva, en tanto el estudio caracteriza las condiciones actuales del carbono orgánico del suelo (COS) en función de los usos de la tierra y de variables ambientales como la pendiente, la altitud, la humedad y la temperatura. De esta manera, ofrece un panorama detallado de la distribución del COS en el área de estudio sin manipular las variables observadas. Además, la investigación es correlacional en el sentido de que busca establecer relaciones entre el almacenamiento de COS y factores como el uso de la tierra, la pendiente y la altitud. Para ello se aplican análisis estadísticos como ANOVA, pruebas post hoc LSD Fisher, regresiones y correlaciones. El propósito no es determinar causalidad directa, sino identificar asociaciones significativas entre las variables. Finalmente, es empírico por cuanto la base del estudio se encuentra en la recolección de datos observables y verificables, mediante muestreos de campo, análisis de laboratorio y procesamiento en sistemas de información geográfica (SIG). Estos datos constituyen el fundamento objetivo para el análisis y la interpretación.

3.4. Sujetos y fuentes de información

Los sujetos de información son los suelos del tributario de la microcuenca del río Chachagua, analizados en función de sus diferentes usos de la tierra: bosque, pastos y cultivos. Estos suelos constituyen la fuente principal de los datos empíricos que permiten caracterizar el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) y establecer su relación con variables físico-geográficas como pendiente, altitud, geomorfología, geología, humedad y temperatura. En este sentido, cada punto de muestreo representó una unidad de análisis espacial, a partir de la cual se obtuvo información cuantificable sobre las propiedades edáficas y su contexto ambiental inmediato. La selección de los sitios respondió a criterios de representatividad territorial, buscando abarcar la diversidad de condiciones presentes dentro del área de estudio y garantizar una cobertura adecuada de los distintos usos de la tierra. De esta forma, los suelos no solo fueron considerados como objeto físico de análisis, sino también como expresión territorial de procesos ambientales y antrópicos que influyen en el almacenamiento de carbono.

Las fuentes primarias correspondieron a los datos obtenidos directamente en campo y laboratorio, mediante el muestreo sistemático de suelos y el análisis de sus propiedades físicas y químicas. Por su parte, las fuentes secundarias incluyeron información cartográfica, bases de datos oficiales, imágenes satelitales y literatura científica especializada, que permitieron contextualizar los resultados y complementar el análisis espacial. La integración de ambos tipos

de fuentes fortaleció la validez del estudio, al combinar evidencia empírica directa con información técnica previamente documentada. Las fuentes de información se clasifican en dos niveles: primarias y secundarias, estas se describen en la Tabla 1.

Tabla 1.

Fuentes de Información en dos Niveles: Primarias y Secundarias.

Tipo de Fuente	Descripción
Fuentes Primarias	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Muestreos de suelo realizados en el área de estudio, bajo un esquema de muestreo estratificado proporcional de acuerdo con los usos de la tierra. ▪ Análisis de laboratorio orientados a determinar el contenido de carbono orgánico y la densidad aparente. ▪ Observación directa en campo, en la que se registraron condiciones ambientales, coordenadas geográficas y características de uso de la tierra.
Fuentes Secundarias	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cartografía y bases de datos geoespaciales, incluyendo mapas de geología, geomorfología, pendientes y ortofotos. ▪ Imágenes satelitales (Sentinel y Landsat) utilizadas para estimar variables como humedad superficial y temperatura. Literatura científica y técnica vinculada con el almacenamiento de carbono orgánico, el manejo sostenible de los suelos y la planificación territorial. ▪ Informes institucionales de organismos nacionales como el Instituto Meteorológico Nacional, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, la Comisión Nacional de Emergencias, Instituto Geográfico Nacional, el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) y la Escuela de Ciencias Geográficas de la UNA, que sirvieron como insumo metodológico y de contexto.

3.5. Población, muestra y sitios de muestreo

La población de estudio corresponde a los usos de la tierra presentes en el tributario de la microcuenca del río Chachagua, con una población total de 2 696 unidades (polígonos), definidas a partir del mapa de coberturas y usos de la tierra.

Respecto al tamaño de la muestra y los sitios de muestreo, por su parte, la figura 3 muestra las etapas de procesamiento espacial empleadas para la delimitación de los sitios de

muestreo a partir de insumos ráster y vectoriales. La muestra se selecciona mediante el software Epidat 4.2, aplicando un diseño de muestreo aleatorio estratificado proporcional con población finita, con tres estratos definidos según tres usos de la tierra: bosque, pastos y cultivos. Para el cálculo del tamaño de la muestra se considera una proporción esperada del 50 %, un nivel de confianza del 80 % y una variabilidad del 10 % (Tabla 2).

Figura 3.

Diagrama del proceso de selección de sitios de muestreo en SIG

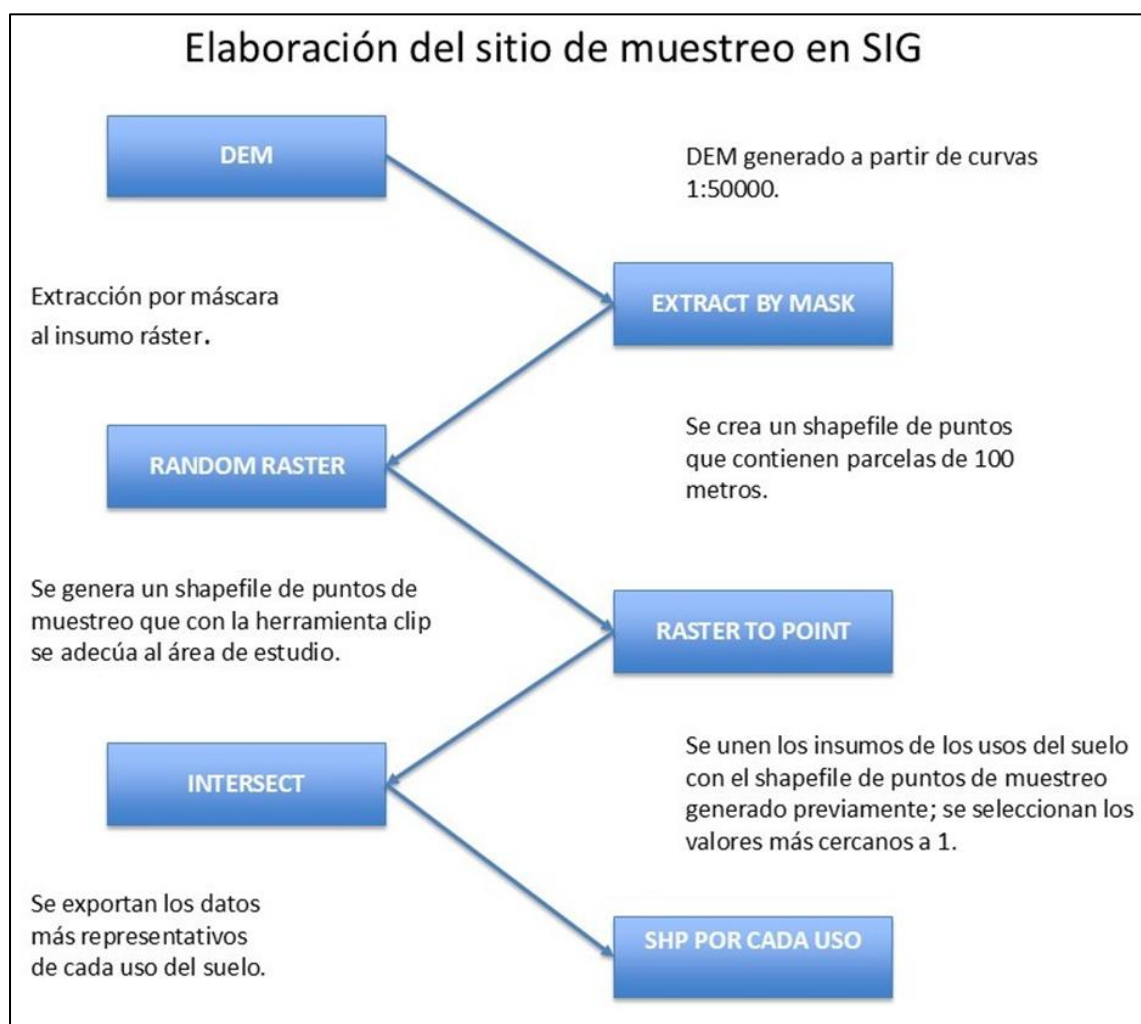


Tabla 2.*Parámetros de Cálculo del Tamaño de la Muestra.*

Parámetros	Resultados
Usos de la tierra	2696 hectáreas
Muestra utilizada	41 sitios
Precisión	10%
Proporción esperada	50%
Nivel de confianza	80%

El porcentaje de sitios seleccionados en cada estrato se definió según la extensión total que ocupa cada uno de los estratos (usos de la tierra) definidos en la Tabla 3. Con estos parámetros se determinó un total de 41 unidades muestrales o sitios de muestreo. Estos valores se definen en función de criterios estadísticos, así como de aspectos logísticos y del alcance económico disponible para el desarrollo de la investigación. Posteriormente, las unidades se distribuyen de manera proporcional al tamaño de cada estrato, definido según la extensión de los usos de la tierra. De esta forma, corresponden 26 unidades al bosque, 8 a los cultivos y 7 a los pastos (Tabla 3). Finalmente, el software genera de manera aleatoria los números de los sitios de muestreo seleccionados en cada estrato, lo cual asegura la representatividad de la muestra respecto a la población total y reduce el sesgo en la selección.

Tabla 3.*Distribución del Muestreo Aleatorio Estratificado.*

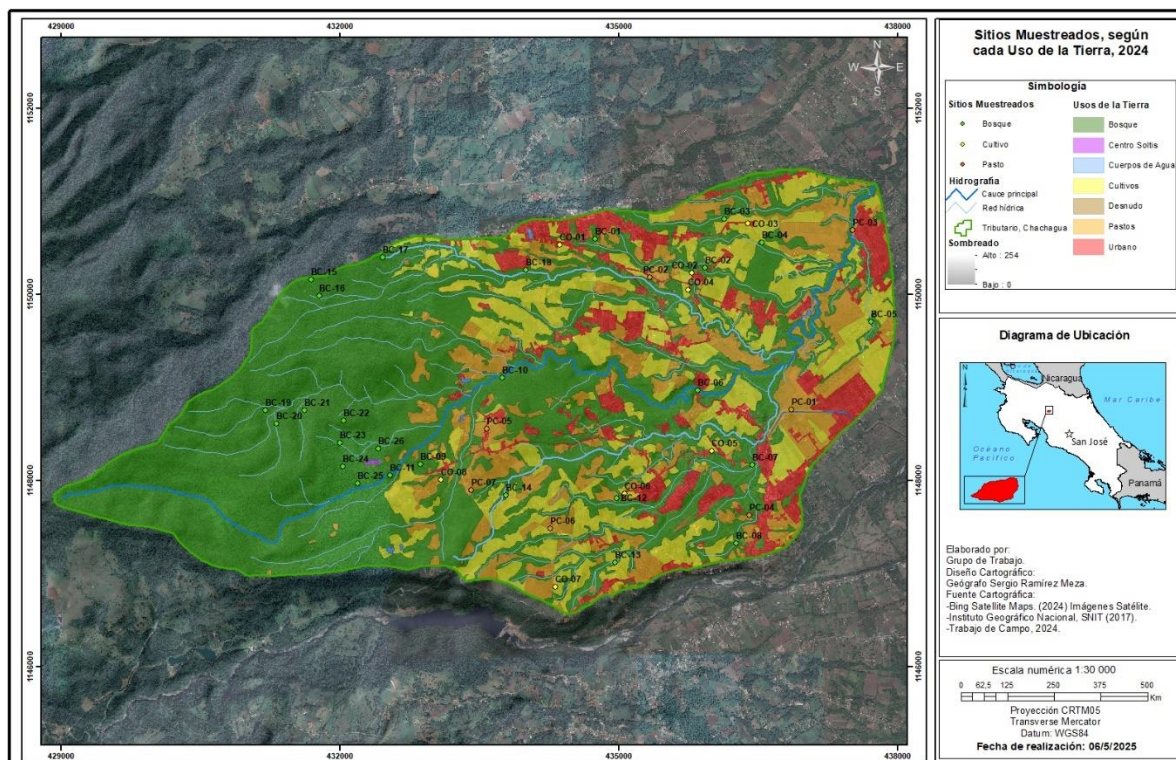
Estrato	Tamaño de estrato (ha)	Tamaño de la muestra
Bosque	1543	26
Cultivos	504	8
Pastos	402	7
Total	2449	41

Una vez determinada la cantidad de muestras por uso de la tierra, se generó la distribución espacial de los sitios de muestreo mediante herramientas SIG (Mapa. 2). Los puntos se distribuyen de forma aleatoria, seleccionándose aquellos con valores de validación cercanos a 1, que representan los sitios óptimos de muestreo para cada categoría de uso. La

Figura 5 indica la ubicación de los sitios muestreados, según los usos de la tierra: verde para bosque, amarillo para cultivos y naranja para pastos. El número final de muestras resulta ligeramente inferior a la población inicial debido a la exclusión del uso urbano, que ocupa un área de 211,73 ha dentro del tributario y no se considera en el presente estudio.

Mapa 2.

Mapa de sitios de muestreo del tributario del río Chachagua según los usos de la tierra (2024)



3.6. Instrumentos y técnicas de investigación

Los instrumentos de investigación se utilizan para obtener información de manera ordenada y estructurada. En este estudio se emplean los siguientes:

- **Fichas de campo:** formularios diseñados para registrar información en cada sitio de muestreo, incluyendo coordenadas geográficas, altitud, pendiente, uso de la tierra y observaciones cualitativas del entorno.
- **Aplicaciones SIG:** herramientas utilizadas para ubicar con precisión los puntos de muestreo en el área de estudio, garantizando su georreferenciación y la descripción del entorno inmediato.

- Equipo de muestreo de suelos: incluye martillo y cilindros para la extracción de muestras, así como bolsas plásticas y marcadores para su adecuada identificación y preservación.
- Laboratorio: se emplea horno para el secado de las muestras durante 24 horas y balanzas de precisión para obtener los datos necesarios en el cálculo de la densidad aparente. El análisis del COS se realiza en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA).
- Software estadístico y geoespacial: se utilizan R, Python, QGIS y ArcMap como instrumentos digitales para procesar datos numéricos, realizar análisis estadísticos (ANOVA, regresiones y correlaciones) y generar mapas temáticos de la distribución espacial del COS.

En cuanto a las técnicas de investigación, estas se aplican para recopilar, procesar y analizar la información:

- Observación directa en campo: permite registrar las características del entorno y de los usos de la tierra en los sitios de muestreo, aportando información complementaria a los análisis numéricos.
- Análisis de laboratorio: procedimiento técnico aplicado a las muestras de suelo para determinar el contenido de carbono orgánico y la densidad aparente mediante métodos estandarizados.
- Análisis estadístico: comprende técnicas de inferencia como ANOVA, prueba LSD de Fisher, correlaciones y regresiones, que permiten establecer relaciones significativas entre las variables estudiadas.
- Análisis de datos secundarios: incluye la utilización de mapas base (geología, geomorfología y pendientes), imágenes satelitales (Sentinel y Landsat) y literatura científica, con el fin de complementar y contextualizar la información primaria.
- Análisis espacial en SIG: consiste en la integración de los datos de campo y laboratorio con variables territoriales, generando mapas temáticos que representan la distribución espacial del COS en relación con los usos de la tierra.

3.7. Variables e hipótesis de la investigación

Con el fin de precisar los referentes teóricos y la manera en que estos se materializan en el trabajo de campo y en el análisis se establecieron una serie de variables las cuales se definen conceptual y operacionalmente (Tabla 4). Las variables conceptuales responden a las

definiciones teóricas y académicas que sustentan la investigación, mientras que las variables operacionales especifican cómo se miden, observan o registran en el área de estudio.

Tabla 4.

Definición Conceptual y Operacional de Variables del Estudio

Variable	Tipo de variable	Rol de análisis	Variable conceptual	Variable operacional
% Carbono orgánico en el suelo (COS)	Cuantitativa continua, obtenida por medición.	D	Según la FAO (2001), el carbono orgánico del suelo representa aproximadamente el 69,8 % del carbono presente en la biosfera y está compuesto por microorganismos, humus y materia vegetal y animal en distintos estados de descomposición. Su almacenamiento varía en función del uso de la tierra y las prácticas de manejo aplicadas (Martínez et al., 2008; Bertzky et al., 2011; Sánchez, 2016), así como de las condiciones edáficas y físico-geográficas del territorio, tales como el tipo de suelo, la topografía, la altitud, geomorfología, geología, la humedad y la temperatura, las cuales influyen en los procesos de acumulación, estabilización y pérdida del carbono orgánico en el suelo.	Se cuantifica en los primeros 15 cm de profundidad del suelo de cada sitio de muestreo. El porcentaje se obtiene mediante el método de combustión seca de Dumas (MCSD).
Uso de la tierra	Variable categórica nominal.	I	Se define como los arreglos, actividades e insumos de la población para producir, cambiar o mantener un cierto tipo de cobertura terrestre (Di Gregorio & Jansen, 1998; FAO, s. f.).	Se elabora un mapa de usos de la tierra 2024, con base en imágenes satelitales, fotointerpretación y uso de SIG.
Densidad aparente	Variable cuantitativa continua,	I	La densidad aparente es la masa de suelo por unidad de volumen (g/cm^3 o ton/m^3).	Se determina el DA de los primeros 15 cm del perfil de suelo, con el propósito

Variable	Tipo de variable	Rol de análisis	Variable conceptual	Variable operacional
(DA)	obtenida por medición directa.		Describe la compactación del suelo (Lefèvre et al., 2017, citado en Rojas et al., 2022). Los valores aumentan con la profundidad debido a la menor actividad biológica (Alvarado & Forsythe, 2005, citado en Rojas et al., 2022).	de relacionar los valores de compactación con cada uso de la tierra.
Tipos de suelo (Órdenes y subórdenes de Suelo)	Variable categórica nominal.	I	El suelo puede actuar como fuente o reservorio de carbono, dependiendo de su uso y manejo (Lal et al., 1990; Lal, 1997)	Se evalúan aquellos órdenes y subórdenes presentes en el área de estudio según el shapefile del “Mapa de Suelos de Costa Rica” (CIA, 2020), para asociarlo con el COS.
Humedad Superficial	Variable cuantitativa continua, obtenida por medición indirecta o directa.	I	El contenido de humedad del suelo desempeña un papel clave en la regulación de la actividad biológica, ya que influye en la respiración del suelo y en la estabilidad de la materia orgánica. Estos procesos inciden directamente en la dinámica del carbono orgánico del suelo, favoreciendo su acumulación o su pérdida según las condiciones de humedad presentes (Moyano et al., 2013).	La variable de humedad superficial se obtiene a partir de productos derivados de sensores remotos procesados mediante Google Earth Engine y se integra en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para analizar su relación espacial con los valores de COS registrados en los sitios de muestreo.
Pendiente	Variable cuantitativa continua, obtenida por medición indirecta o directa.	I	Las áreas con pendientes elevadas suelen presentar mayores tasas de erosión y, en consecuencia, una disminución del carbono orgánico del suelo, mientras que las zonas de menor pendiente favorecen su acumulación mediante	La pendiente se calcula a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) y se expresa en porcentaje (%), siendo posteriormente clasificada en rangos para evaluar su relación con la

Variable	Tipo de variable	Rol de análisis	Variable conceptual	Variable operacional
			procesos de deposición y enterramiento del material edáfico (Berhe et al., 2007).	distribución espacial del COS en el área de estudio.
Temperatura	Variable cuantitativa continua, obtenida por medición indirecta o directa.	I	El incremento de la temperatura del suelo favorece la actividad microbiana y acelera los procesos de descomposición de la materia orgánica, lo que puede provocar una disminución de las reservas de carbono orgánico del suelo, especialmente en regiones tropicales y subtropicales (Conant et al., 2011).	La temperatura superficial se obtiene a partir de productos satelitales procesados en Google Earth Engine, y se integra en el análisis SIG, con el fin de evaluar su relación con el contenido de COS en el área de estudio.
Geomorfología	Variable categórica nominal.	I	Las formas del relieve y los procesos geomorfológicos asociados influyen en la dinámica del suelo, ya que controlan la erosión, la sedimentación, el drenaje y la acumulación de materiales finos, lo cual se refleja en patrones espaciales diferenciados del carbono orgánico del suelo a escala del paisaje (Huggett, 2011).	Las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio se identifican, actualizan e integran en un Sistema de Información Geográfica (SIG), con el objetivo de analizar su relación con los valores de COS obtenidos en los puntos de muestreo.
Geología	Variable categórica nominal.	I	La geología se relaciona con el material de origen de los suelos y con las propiedades físicas, químicas y mineralógicas que estos desarrollan, las cuales influyen en su capacidad para almacenar carbono orgánico. En este sentido, las distintas litologías pueden favorecer o limitar la acumulación de COS según su composición	Las unidades geológicas del área de estudio se identifican y cartografían mediante herramientas SIG, con el fin de evaluar su relación espacial con los valores de COS registrados en los sitios de muestreo.

Variable	Tipo de variable	Rol de análisis	Variable conceptual	Variable operacional
			mineral y su grado de meteorización (Brady & Weil, 2017).	

Nota: I: variable Independiente asociada al COS; D: Variable Dependiente, en este caso corresponde al COS.

A partir de estas variables se establecieron las hipótesis de investigación (Tabla 5) que buscan explicar las posibles relaciones entre el carbono orgánico del suelo (COS) (variable dependiente), el uso de la tierra (categoría independiente), así como con otras características físico-geográficas (categorías y variables independientes). Dichas hipótesis constituyen la base para contrastar, mediante análisis estadísticos, los supuestos planteados acerca del comportamiento y variabilidad del carbono orgánico, en el contexto del tributario. Las categorías fueron previamente transformadas estadísticamente para el respectivo análisis, con el propósito de garantizar comparabilidad entre grupos y cumplir con los supuestos requeridos por las pruebas aplicadas.

En este marco, cada hipótesis fue formulada bajo una estructura clásica de contraste entre hipótesis nula (H_0) e hipótesis alternativa (H_a), permitiendo evaluar si las diferencias observadas en los contenidos de COS respondieron a variaciones reales entre categorías o a fluctuaciones atribuibles al azar. La organización sistemática de las variables independientes uso de la tierra, orden y suborden de suelo, geomorfología, geología, pendiente, humedad y temperatura facilitó el análisis comparativo y la identificación de patrones estadísticamente significativos. De esta manera, el planteamiento de hipótesis orientó el proceso analítico y proporcionó un marco estructurado para interpretar los resultados obtenidos en el análisis.

Tabla 5.*Hipótesis de la Relación Variable Dependiente (COS) vrs Variables Independientes.*

Hipótesis	Variable independiente	Hipótesis nula (H₀)	Hipótesis alternativa (H_a)
1	Uso de la tierra	El contenido de COS es igual en todos los usos de la tierra.	Al menos un uso de la tierra presenta un contenido COS diferente.
2	Orden de suelo	El contenido de COS es igual en todos los órdenes de suelo.	Al menos un orden de suelo presenta un contenido de COS diferente.
3	Suborden de suelo	El contenido de COS es igual en todos los subórdenes de suelo.	Al menos un suborden de suelo presenta un contenido de COS diferente.
4	Geomorfología	El contenido de COS del suelo es igual en todas las unidades geomorfológicas.	Al menos una unidad geomorfológica presenta un contenido de COS diferente.
5	Geología	El contenido de COS es igual en todas las formaciones geológicas.	Al menos una formación geológica presenta un contenido de COS diferente.
6	Pendiente	El contenido de COS es igual en todos los rangos de pendiente.	Al menos un rango de pendiente presenta un contenido de COS diferente.
7	Humedad	El contenido de COS es igual en todos los rangos de humedad.	Al menos un rango de humedad presenta un COS diferente.
8	Temperatura	El contenido de COS es igual en todos los rangos de Temperatura.	Al menos un rango de temperatura presenta un contenido de COS diferente.

3.8. Recolección de datos

La recolección de datos constituye una de las etapas fundamentales de la investigación, ya que permite obtener información empírica que respalda el análisis del carbono orgánico del suelo (COS) en los diferentes usos de la tierra del tributario de la microcuenca del río Chachagua. Esta fase combina procedimientos de actualización cartográfica, selección de sitios de muestreo y registro geoespacial, apoyados en herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

3.8.1. Recolección de muestras de suelo

La recolección de muestras de suelo se realizó según los sitios de muestreo antes mencionados. Todas las muestras fueron recolectadas dentro de los 15 cm de profundidad con cilindros.

Figura 4

Imágenes ilustrativas de métodos utilizados en campo y en laboratorio



Las muestras fueron recolectadas en los 41 sitios de muestreo establecidos, acorde con los porcentajes por estrato (Tabla 3) y los sitios de muestreo (Mapa 2). Se empleó una ficha de datos de campo para registrar información detallada sobre cada sitio de muestreo, garantizando la trazabilidad y el control de calidad de las muestras (Tabla 6). La ficha registra los datos de identificación, ubicación y características generales del sitio de muestreo. Se utilizaron navegadores terrestres (QField / Orux Maps) para anotar la ubicación precisa:

Tabla 6.*Ficha de campo de información de sitios de muestreo de suelos*

Identificación de muestras en campo. Chachagua 2024							
Código	Uso de tierra	Tipo de suelo	Cultivo	Altitud	Ubicación	Fecha	Observaciones

Una vez recolectadas las muestras de suelo, específicamente, aquellas correspondientes a la DA fueron llevadas al Laboratorio de Suelos de Texas A&M Soltis Center para su respectiva medición; por su parte, las relativas a la medición de COS fueron transportadas al Laboratorio de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), de la Universidad de Costa Rica (UCR). Todas las muestras fueron recolectadas en cilindros estándares.

3.8.2. Carbono Orgánico del Suelo (COS)

En cada sitio se recolectaron 350 g de suelo a una profundidad de 0–15 cm, de los cuales 300 g se destinaron al análisis de carbono y los 50 g restantes a la determinación de la densidad aparente (DA) (CIA, 2023). Esta profundidad se seleccionó porque corresponde a la capa superficial del suelo, donde se concentra la mayor cantidad de materia orgánica (MOS) debido al aporte constante de residuos vegetales, la presencia de raíces finas y la intensa actividad biológica que caracteriza el horizonte superior, factores que favorecen la acumulación y estabilización del carbono orgánico en los primeros centímetros del perfil edáfico (Six et al., 2002). Las muestras se enviaron al Laboratorio de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), UCR, donde se determinó el carbono total (C%) mediante el método de combustión seca de Dumas (MCSD), utilizando un equipo analizador elemental automático.

A partir de estos valores, el carbono orgánico del suelo (COS) se calcula mediante fórmulas de conversión específicas, considerando factores de corrección definidos por el laboratorio, según el tipo de suelo. Para determinar el contenido de COS a partir del carbono total, pueden emplearse distintos métodos según los recursos disponibles y los objetivos del análisis. En esta investigación se utiliza el método de combustión seca de Dumas, que permite cuantificar tanto el carbono total como el carbono orgánico del suelo mediante procesos de conversión y fórmulas específicas. La fracción de carbono orgánico se estima comúnmente en

0,58; esto indica que aproximadamente el 58% de la materia orgánica del suelo (MOS) corresponde a carbono. No obstante, este valor puede variar en función de la composición específica de la materia orgánica presente en cada muestra.

A continuación, se presentan las ecuaciones o relaciones empleadas para la estimación del carbono orgánico del suelo (COS) a partir del carbono total. La inclusión de la densidad aparente resultó fundamental en este cálculo, ya que permite transformar las concentraciones de carbono obtenidas en laboratorio, en reservas expresadas por unidad de superficie, facilitando una estimación más precisa del carbono almacenado en el suelo.

- Partición conceptual:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{orgánico}} + C_{\text{inorgánico}} (\text{g m}^{-2})$$

Conversión desde materia orgánica (MOS) (cuando aplica):

$$C = \text{MOS} \times f$$

donde f es la fracción de carbono de la MOS (comúnmente **0,58**), sujeta a ajuste según el tipo de suelo y el protocolo de laboratorio (Nelson & Sommers, 1996).

Dado que el área de estudio se caracterizó por suelos de origen volcánico bajo condiciones húmedas tropicales, donde la presencia de carbonatos es mínima o inexistente, el carbono total determinado mediante combustión seca se asumió como una aproximación válida del carbono orgánico del suelo (Nelson & Sommers, 1996).

3.8.3. Densidad Aparente (DA) del suelo

La densidad aparente constituye un parámetro fundamental en la estimación del carbono orgánico del suelo, ya que permite expresar los contenidos de carbono como reservas por unidad de superficie. Al reflejar la cantidad de masa de suelo contenida en un volumen determinado, influye directamente en el cálculo del COS y puede generar diferencias importantes en las estimaciones de carbono almacenado entre distintos sitios (Hiederer & Köchy, 2011).

La extracción se realiza en la capa superficial del suelo, al igual que para el COS, entre 0–15 cm de profundidad, 50g de suelo obtenidos con cilindros indeformados ($h = 15$ cm; $d =$

6,5 cm). Las muestras se trasladan al Laboratorio de Suelos del Centro Soltis (ATM, Texas A&M University) para su análisis (Anexo 1, Tabla 9).

La DA se calcula siguiendo el método descrito por Blake y Hartge (1986, como se citó en Agostini et al., 2014), representada con la Ecuación $DA = \frac{M_s}{V}$ (g cm^{-3}), Donde:

- $M_s = \text{masa seca}$
- $V = \text{Volumen}$
- Humedad húmeda: $w_h = \frac{M_h - M_s}{M_h} \times 100(\%)$

(donde $M_h = \text{masa húmeda}$; $M_s = \text{masa seca}$).

- (Cuando se requiere humedad gravimétrica: $w_g = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$).
- con M_s en gramos (suelo seco en horno) y V en cm^3 .

Unidades: g = gramos; cm^3 = centímetros cúbicos.

3.8.4. Medición indirecta de variables independientes

A continuación, los detalles de los procedimientos, cálculos y estimaciones de variables edáficas y geográficas utilizadas para establecer las relaciones con la acumulación de COS, acorde con el diseño de muestreo:

Usos de la tierra

La base de datos inicial del uso de la tierra corresponde a la elaborada por Agüero et al. (2014). Las capas vectoriales (shapefiles) del Tributario microcuencas fueron aportadas por el Texas A&M Soltis Center (2010) y actualizadas al 2024 durante la presente investigación, mediante fotointerpretación, tomando como referencia el Sistema de Clasificación de Uso y Cobertura de la Tierra de Costa Rica (SIMOCUTE, 2023) y el trabajo de verificación en campo. Para la digitalización de los polígonos de uso se emplearon los programas ArcGIS 10.8, ArcGIS Pro, QGIS 3.34, SAS Planet y Global Mapper (versión de prueba). Asimismo, se utilizó como insumos las hojas topográficas a escala 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con el fin de garantizar precisión y coherencia espacial. La información técnica de las imágenes empleadas se detalla en la Tabla 7:

Tabla 7.

Información de las Imágenes Satelitales Utilizadas para la Actualización de Usos de la Tierra (2024).

Información	Descripción
Fuente	SasPlanet, Google y Bing Satélite
Año	2024
Resolución espacial	82127x40743 / N° de Mosaicos: 322x161 (51842) / Zoom: 21
Proyección	Proyección del mapa–Mercator / Google Maps (Radio Esfera 6378137) / EPSG:3785
Cantidad de Bandas	3 (Roja / Verde /Azul)

Órdenes y Subórdenes de Suelo:

Para la variable tipos de suelos se utilizó el Mapa de Suelos de Costa Rica (CIA, 2020) a nivel de orden y suborden. A escala 1:200 000.

Geología y Geomorfología

Para las variables de geología y geomorfología se utilizaron capas vectoriales elaboradas por el geólogo Javier Oviedo González en el año 2021 y facilitadas por el autor, las cuales fueron actualizadas en 2024 para el área de estudio. La información corresponde a la Hoja Topográfica Fortuna y con una escala de trabajo aproximada de 1:25 000.

Altitud y Modelo Digital de Elevación (DEM):

La altitud y el relieve se reconocen como factores determinantes en la variabilidad del carbono orgánico del suelo (COS), debido a su influencia directa sobre las condiciones climáticas y edáficas. El incremento altitudinal genera gradientes ambientales que modifican la temperatura, la precipitación, la humedad del suelo y la composición de la vegetación, lo que a su vez altera los procesos de acumulación, descomposición y mineralización de la materia orgánica. Asimismo, la pendiente condiciona la infiltración, escorrentía y erosión, afectando la estabilidad del suelo y su capacidad para retener carbono (Pastor et al., 2015).

Para este propósito, se emplea un Modelo Digital de Elevación (DEM) como herramienta base del análisis espacial. El DEM permite representar tridimensionalmente la

superficie del terreno y derivar de ella variables topográficas como pendiente, orientación y altitud media, las cuales se integran al análisis estadístico y geográfico. En el marco de esta investigación, el modelo digital se utiliza como insumo para generar capas de interpolación y mapas de gradiente altitudinal, facilitando la identificación de patrones espaciales del COS.

El DEM se genera a partir de curvas de nivel a escala 1:50 000 y se procesa mediante herramientas SIG, las cuales permiten calcular parámetros topográficos continuos y elaborar tablas de atributos con información estadística de cada sitio muestreado. De esta forma, se obtiene una base espacial robusta que contribuye a comprender la influencia del relieve en la distribución del carbono orgánico del suelo dentro del tributario de la microcuenca del río Chachagua.

La temperatura superficial del suelo fue estimada mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando imágenes satelitales Landsat 9, las cuales fueron procesadas íntegramente en la nube. Para ello, se definió un área de interés correspondiente al tributario de la microcuenca del río Chachagua y se seleccionaron imágenes del período 2023–2024, aplicando un criterio de filtrado por cobertura de nubes inferior al 20 %.

A partir de las bandas B4, B5 y B10, se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la emisividad superficial y la temperatura de brillo. Estos parámetros fueron integrados para estimar la temperatura de la superficie terrestre, la cual se expresó en grados Celsius. Finalmente, se generó una imagen representativa mediante el cálculo de la mediana de las escenas procesadas, la cual fue recortada al área de estudio y utilizada para el análisis de su relación con el carbono orgánico del suelo.

La humedad superficial del suelo fue estimada de forma indirecta mediante el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), calculado a partir de imágenes del satélite Sentinel-2 MSI (nivel TOA), disponibles en la plataforma Google Earth Engine. Se seleccionaron imágenes correspondientes al período 2023–2024, con un porcentaje de nubosidad inferior al 20 %, y se aplicó un filtro espacial para delimitar el área de estudio. Los productos obtenidos permitieron analizar la relación entre la humedad superficial y los valores de carbono orgánico del suelo, registrados en los sitios de muestreo.

3.9. Análisis de datos

3.9.1. Análisis estadísticos

Como parte del proceso estadístico se aplicó la transformación Box-Cox exclusivamente a los valores de COS, con el propósito de mejorar su comportamiento estadístico y aproximar la distribución a la normalidad, requisito previo para la aplicación de pruebas paramétricas (Osborne, 2010). A continuación, se evalúan los supuestos de normalidad e igualdad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Estas pruebas permiten verificar que los datos cumplan con las condiciones necesarias para los análisis de varianza (ANOVA). Una vez validados los supuestos, se ejecutan análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre los grupos de cada variable categórica (por ejemplo, los distintos usos de la tierra). En los casos donde se detectan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.20$), se aplica la prueba post hoc LSD de Fisher, con el fin de determinar entre qué categorías se presentan las diferencias más importantes (Gómez & Gómez, 1984).

Además, se desarrollan modelos de regresión lineal simple entre el COS transformado y las variables numéricas (altitud, pendiente, humedad y temperatura), con el objetivo de identificar tendencias, cuantificar relaciones y evaluar el poder explicativo de cada variable. El análisis de residuos se utiliza para validar los modelos generados y verificar la homocedasticidad y normalidad de los errores, asegurando la fiabilidad de los resultados (Montgomery et al., 2012).

El conjunto de estos análisis permite establecer asociaciones sólidas entre las condiciones físico-geográficas del área de estudio y la capacidad del suelo para almacenar carbono orgánico, generando evidencia empírica útil para la interpretación ambiental y territorial.

3.9.2. Análisis espacial con sistemas de información geográfica

En la fase espacial, se emplean herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para integrar, visualizar y analizar la información georreferenciada. A partir de las bases de datos y los resultados de laboratorio, se elaboran mapas temáticos para cada variable (uso de la tierra, geología, pendiente, geomorfología, humedad y temperatura), con el fin de analizar

su distribución espacial y su relación con los puntos de muestreo. Para la estimación de variables ambientales, se utilizan imágenes satelitales procesadas en la plataforma Google Earth Engine (GEE). En el caso de la humedad superficial, se emplean productos del satélite Sentinel-2, mientras que la temperatura se obtiene a partir de imágenes térmicas Landsat 9, ambas procesadas con un enfoque anual y pancromático. Estos datos se integran al SIG mediante análisis ráster y reclasificaciones, permitiendo su comparación con la distribución del carbono orgánico en el suelo.

La interpolación espacial del COS se realiza mediante el método IDW (*Inverse Distance Weighting*), que permite estimar valores en áreas no muestreadas a partir de la influencia de los puntos más cercanos, bajo el principio de que la similitud disminuye con la distancia (Burrough & McDonnell, 1998). Este procedimiento genera un modelo continuo de la distribución espacial del carbono, que facilita identificar patrones de acumulación y zonas con mayor potencial de almacenamiento. La elección del método IDW responde a su eficiencia computacional y a la coherencia visual que proporciona para identificar gradientes de concentración en superficies con distribución densa de puntos de muestreo.

Para la clasificación de los valores interpolados se aplica una segmentación por terciles, que divide el conjunto de datos en tres categorías de igual frecuencia: bajo, medio y alto. Esta técnica es adecuada para representar distribuciones no necesariamente normales, garantizando una asignación equilibrada de observaciones por clase (Lark, 2012). Los valores 3, 2 y 1 asignados a las categorías alta, media y baja, respectivamente, corresponden a una codificación ordinal empleada para la generación de mapas temáticos y para facilitar posteriores análisis estadísticos o comparativos. Los puntos de corte entre terciles se determinan mediante el ordenamiento ascendente de los datos y su partición en tres segmentos equivalentes. Este procedimiento permite representar, de forma equitativa, la variabilidad del COS dentro del área de estudio, manteniendo una interpretación homogénea entre categorías.

Finalmente, la información interpolada y clasificada se integra con las capas temáticas de uso de la tierra, pendiente y altitud, lo que permite delimitar zonas con diferente potencial de almacenamiento de carbono. Estos resultados obtenidos del análisis estadístico y espacial se integran posteriormente para la propuesta de lineamientos de ordenamiento territorial, orientados al manejo sostenible del suelo y a la conservación del carbono orgánico.

De esta manera, el análisis de datos no solo contribuyó al entendimiento científico del comportamiento del COS, sino que también ofreció insumos prácticos para la gestión ambiental y el desarrollo territorial sostenible del tributario de la microcuenca del río Chachagua.

4. Resultados y discusión

4.1. Características generales del tributario río Chachagua

A partir de las variables analizadas: uso de la tierra, densidad aparente del suelo, tipos de suelo, geología, geomorfología, pendiente, temperatura y humedad superficial, se presentó una caracterización general del área de estudio, con el propósito de contextualizar el marco físico-geográfico del tributario. Esta descripción permitió establecer la base territorial sobre la cual posteriormente se desarrolló el análisis entre dichas variables independientes y el Carbono Orgánico del Suelo (COS), en función de las hipótesis planteadas en la investigación.

4.1.1. Uso de la tierra

La actualización cartográfica de 2024 mostró que el bosque constituyó la cobertura predominante en el tributario, con 1 543,15 hectáreas (62,99 %), seguido por los cultivos (504,16 ha; 20,57 %) y los pastos (402,67 ha; 16,44 %) (Tabla 8, Mapa. 3).

Esta distribución evidenció una clara diferenciación espacial asociada al gradiente altitudinal y a las condiciones de accesibilidad del territorio.

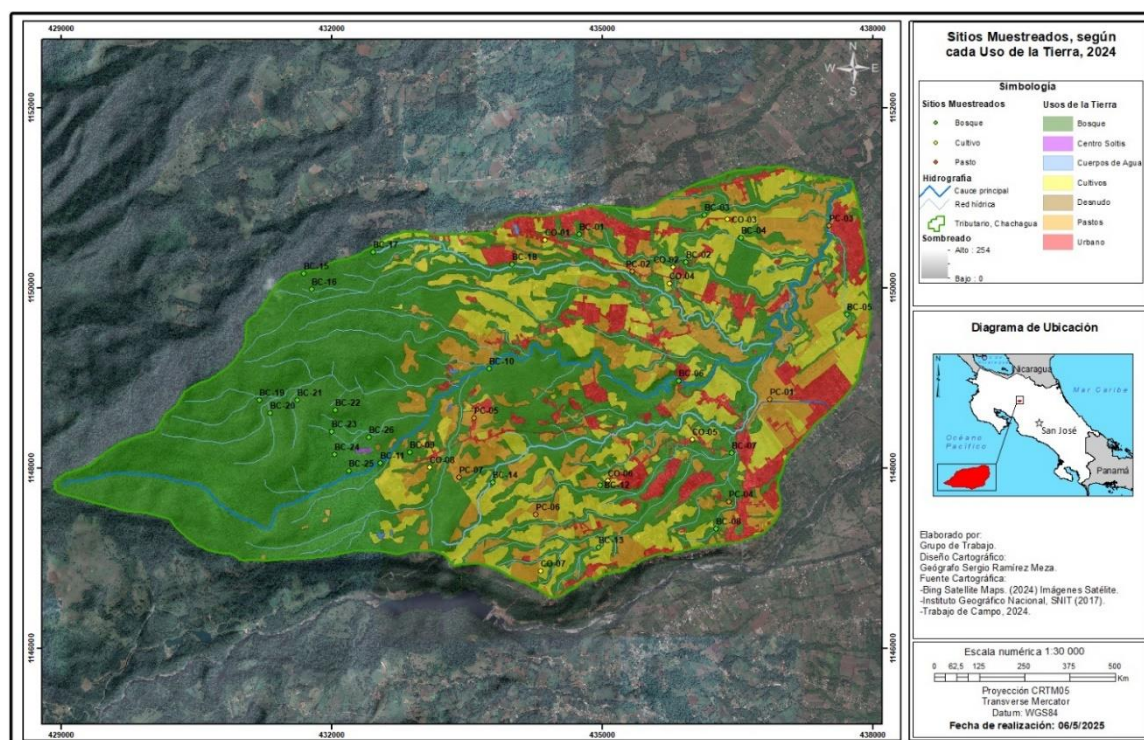
Tabla 8.

Tributario río Chachagua: Usos de la Tierra, 2024

Uso de la Tierra	Área (Ha)	Área (%)
Bosque	1543,15	62,99
Pastos	402,67	16,44
Cultivos	504,16	20,57
Total	2449,98	100

Mapa 3.

Tributario Río Chachagua: Usos de la Tierra



La cobertura boscosa se concentró principalmente en las zonas de mayor altitud y pendientes más pronunciadas, donde las limitaciones físicas restringieron la expansión agropecuaria. En contraste, los cultivos y pastos se localizaron predominantemente en sectores de altitud media y baja, donde las condiciones topográficas y de accesibilidad favorecieron el desarrollo de actividades productivas. Este patrón espacial coincidió con lo planteado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 1995), el cual señaló que la capacidad de uso de la tierra se encuentra estrechamente condicionada por factores como pendiente, fertilidad y accesibilidad, determinando así la vocación productiva del territorio.

Asimismo, los resultados fueron consistentes con lo expuesto por Lambin et al. (2003), quienes diferenciaron entre cobertura y uso de la tierra, destacando que los usos reflejan la intención humana sobre la superficie terrestre. En el caso del tributario del río Chachagua, se observó que la cobertura boscosa persistió en áreas con menor presión antrópica, mientras que los usos agropecuarios se consolidaron en zonas con mayor aptitud productiva, evidenciando la interacción naturaleza–sociedad planteada desde la perspectiva geográfica.

En términos temporales, la distribución actual resultó coherente con lo documentado por Agüero et al. (2014), lo que indicó que más del 70 % de la superficie mantuvo el mismo uso de la tierra durante las últimas décadas. Esta estabilidad territorial sugirió la consolidación de procesos ecológicos de largo plazo, particularmente en las áreas boscosas. Desde el enfoque del ordenamiento territorial de cuencas hidrográficas (Pires et al., 2011; Avendaño et al., 2020), dicha permanencia favoreció la continuidad de servicios ecosistémicos, entre ellos la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono.

En relación con las hipótesis planteadas en el apartado 3.7, la predominancia del bosque resultó un elemento fundamental para el análisis posterior del COS, dado que la literatura ha señalado que las coberturas forestales tienden a presentar mayores reservas de carbono en comparación con sistemas agropecuarios (Ibrahim et al., 2006; INECC, 2018). Por tanto, la configuración espacial observada permitió anticipar que los valores más altos de COS se concentrarían en sectores boscosos de mayor altitud y menor intervención humana.

Desde una perspectiva territorial, la coexistencia de bosque, cultivos y pastos dentro de un mismo tributario evidenció un mosaico productivo característico de las cuencas de la Zona Norte de Costa Rica, donde convergen actividades agropecuarias, conservación y asentamientos humanos. Como señalaron Turner, Lambin y Reenberg (2007), los cambios y permanencias en los usos de la tierra tienen implicaciones directas sobre los ecosistemas y los ciclos biogeoquímicos, especialmente el ciclo del carbono. En este sentido, la estructura actual del uso de la tierra constituyó un marco explicativo fundamental para comprender las variaciones espaciales del COS.

4.1.2. Densidad Aparente

Los resultados mostraron que los suelos bajo cultivos presentaron la mayor densidad aparente ($1,69 \text{ g/cm}^3$), seguidos por los pastos ($1,59 \text{ g/cm}^3$), mientras que los bosques registraron los valores más bajos ($1,33 \text{ g/cm}^3$). Esta diferencia evidenció una mayor compactación en áreas sometidas a actividades agrícolas y ganaderas, en contraste con una estructura más suelta y aireada en los suelos forestales.

Desde el punto de vista edáfico, estos resultados fueron coherentes con lo planteado por Lefèvre (2017), quien señaló que la densidad aparente constituye uno de los factores más relevantes en la estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo (COS), dado que

incide directamente en el volumen efectivo de almacenamiento y en la estabilidad estructural del suelo. Asimismo, Alvarado y Forsythe (2005, citado en Rojas et al., 2022) indicaron que los valores de densidad aparente tienden a incrementarse cuando disminuye la actividad biológica y la incorporación de materia orgánica, condición común en sistemas agrícolas intensivos.

En este sentido, los valores más elevados de DA en cultivos y pastos reflejaron procesos asociados al tránsito de maquinaria agrícola, pisoteo del ganado y manejo continuo del suelo, factores que favorecen la compactación y reducen la porosidad. Por el contrario, en los bosques, la presencia de cobertura vegetal permanente, acumulación de hojarasca y mayor actividad biológica contribuyó a mantener una estructura más estable y menos compactada. Esta relación fue consistente con lo señalado por INECC (2018), quien destacó que los sistemas forestales presentan condiciones más favorables para el almacenamiento de carbono, en comparación con usos agropecuarios intensivos.

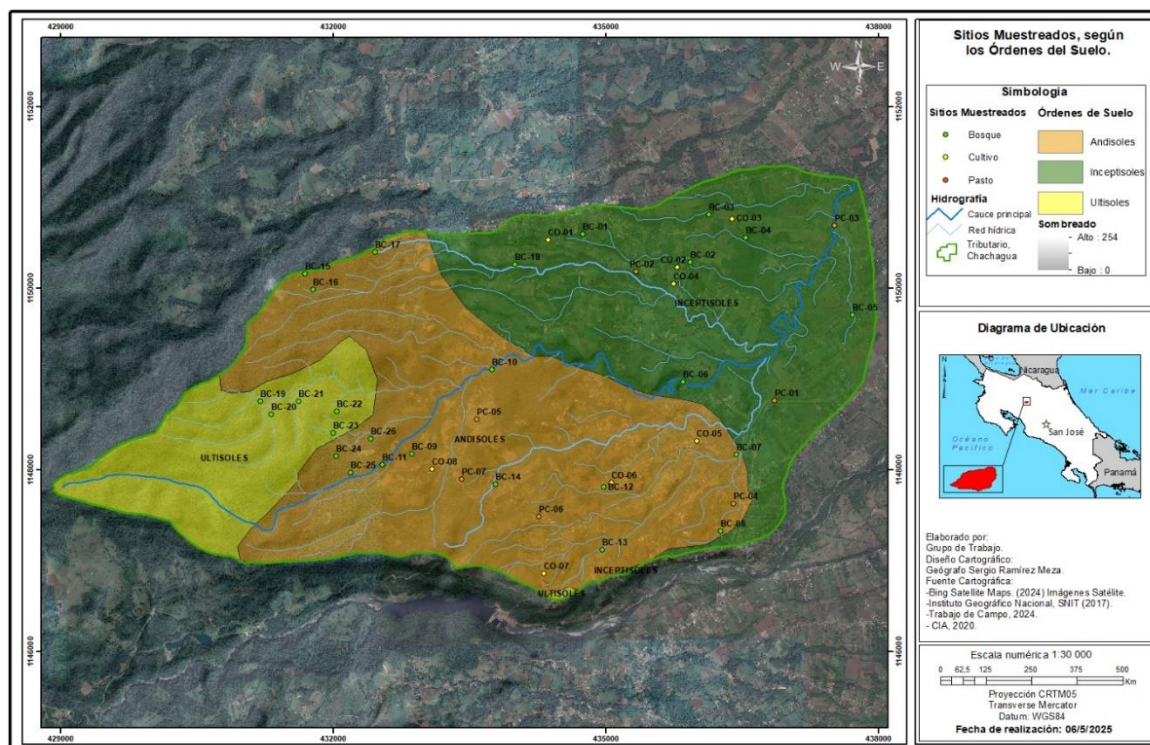
En relación con las hipótesis planteadas en la investigación, los resultados respaldaron la premisa de que la densidad aparente se comporta como una variable independiente asociada al almacenamiento de COS. Valores más bajos de DA en bosques sugirieron un mayor potencial de acumulación de materia orgánica, mientras que valores más altos en cultivos y pastos indicaron posibles limitaciones estructurales para dicho almacenamiento. No obstante, esta relación sería contrastada estadísticamente en los apartados siguientes, donde se analizaría de forma directa la interacción entre la DA y el contenido de carbono orgánico del suelo.

4.1.3. Órdenes y subórdenes de suelo

En el área de estudio se identificaron tres órdenes principales de suelo: Andisoles, Inceptisoles y Ultisoles (Mapa. 4). Estos órdenes presentaron propiedades físicas, químicas y mineralógicas diferenciadas, las cuales condicionaron la densidad aparente, la estabilidad estructural y el potencial de retención de carbono orgánico del suelo (COS). Su distribución espacial reflejó la influencia del origen volcánico del territorio, el grado de desarrollo pedogenético y las condiciones climáticas asociadas al gradiente altitudinal del tributario. Asimismo, las diferencias entre órdenes mostraron contrastes en los procesos de meteorización, acumulación de materia orgánica y dinámica hídrica, factores que incidieron directamente en la variabilidad observada del COS dentro del tributario.

Mapa 4.

Tributario Río Chachagua: Orden de Suelo



Los Andisoles se distribuyeron principalmente en las zonas medias y altas del área de estudio, asociadas al complejo volcánico Arenal–Monteverde. Derivados de materiales piroclásticos, estos suelos se caracterizaron por su alta porosidad, baja densidad aparente y elevado contenido de materia orgánica, condiciones que favorecieron la retención de agua y el almacenamiento de carbono orgánico (Alvarado & Forsythe, 2005). Esta característica fue coherente con lo señalado en el marco teórico respecto a la influencia del tipo de suelo como factor determinante en la acumulación de COS (Lal, 1997; Martínez et al., 2008). Su presencia se asoció mayoritariamente a áreas con cobertura boscosa y menor intervención antrópica, lo que reforzó su estabilidad estructural.

Los Inceptisoles se localizaron en posiciones intermedias del relieve y en sectores vinculados a pendientes moderadas y zonas riparias. Correspondieron a suelos de desarrollo incipiente a moderado, con una estructura menos evolucionada que los Andisoles y Ultisoles. Bajo usos agropecuarios, estos suelos mostraron mayor sensibilidad a procesos de compactación y erosión, lo cual coincidió con lo planteado por Doetterl et al. (2016) y Van

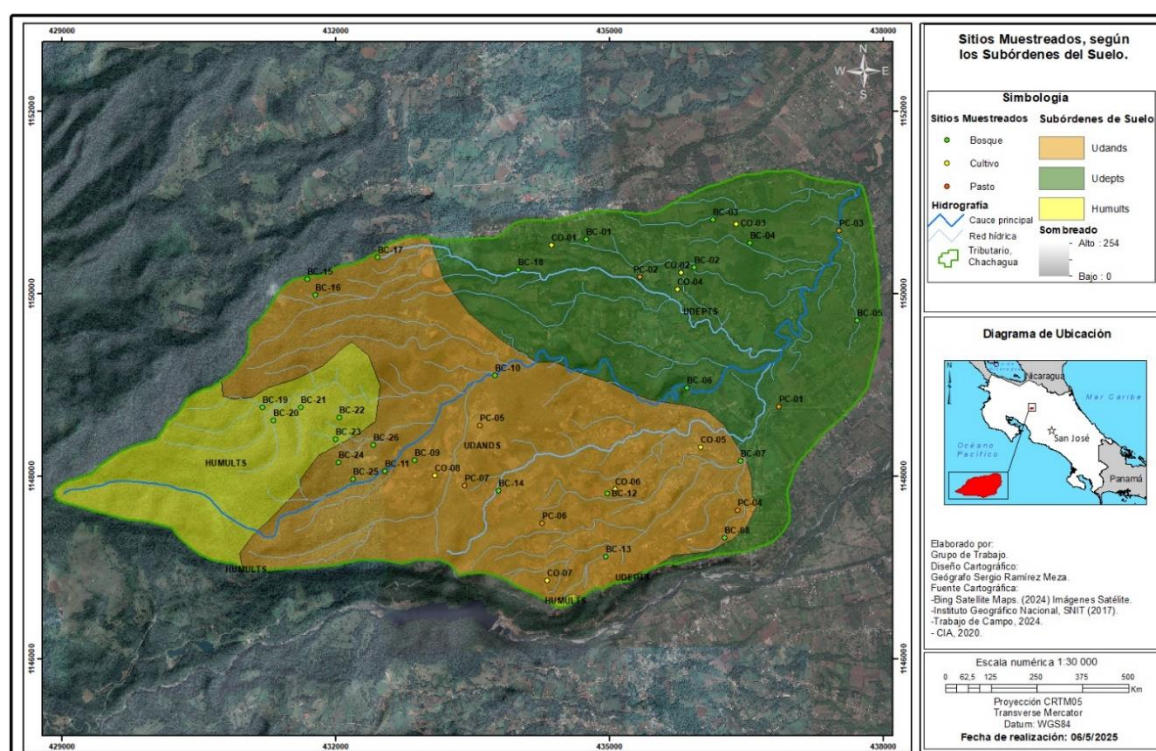
Oost et al. (2007), quienes señalaron que la pendiente y el manejo influyen significativamente en la redistribución del carbono a escala del paisaje.

Por su parte, los Ultisoles se concentraron principalmente en sectores de mayor altitud y en áreas con cobertura vegetal relativamente conservada. Se trataron de suelos más antiguos y meteorizados, definidos por procesos intensos de lixiviación y acidez, pero cuya estabilidad estructural bajo cobertura boscosa favoreció la acumulación de materia orgánica en los horizontes superficiales (Alvarado & Forsythe, 2005). Estos resultados fueron consistentes con lo planteado por Lal (2004), quien indicó que la interacción entre clima, relieve y tipo de suelo condiciona la dinámica del carbono orgánico.

A nivel de suborden, se identifican Humults, Udands y Udepts, a continuación, se presenta en la Mapa 5.

Mapa 5.

Tributario Río Chachagua: Suborden de Suelo



Los Humults, asociados a Ultisoles, se desarrollaron en ambientes húmedos y bajo cobertura boscosa, donde presentaron altos contenidos de materia orgánica y un comportamiento favorable para la retención de COS. Los Udands, vinculados a Andisoles de

origen volcánico, mostraron elevada capacidad de retención de agua y carbono, particularmente en sectores de mayor altitud. En contraste, los Udepts, correspondientes a Inceptisoles, evidenciaron menor grado de desarrollo pedogenético y mayor susceptibilidad a la perturbación antrópica, especialmente en áreas destinadas a cultivos y pastos (Rojas et al., 2022).

En conjunto, la distribución de órdenes y subórdenes de suelo evidenció una marcada heterogeneidad edáfica en el tributario del río Chachagua. Esta variabilidad constituyó un elemento estructural importante para interpretar la distribución espacial del COS, dado que, como se planteó en las hipótesis, el tipo de suelo actuó como variable independiente condicionante del almacenamiento de carbono. La configuración edáfica observada permitió anticipar que los suelos volcánicos con mayor porosidad y estabilidad estructural presentarían mayores contenidos de COS, mientras que aquellos sometidos a mayor intervención y compactación podrían registrar valores inferiores.

4.1.4. Geomorfología

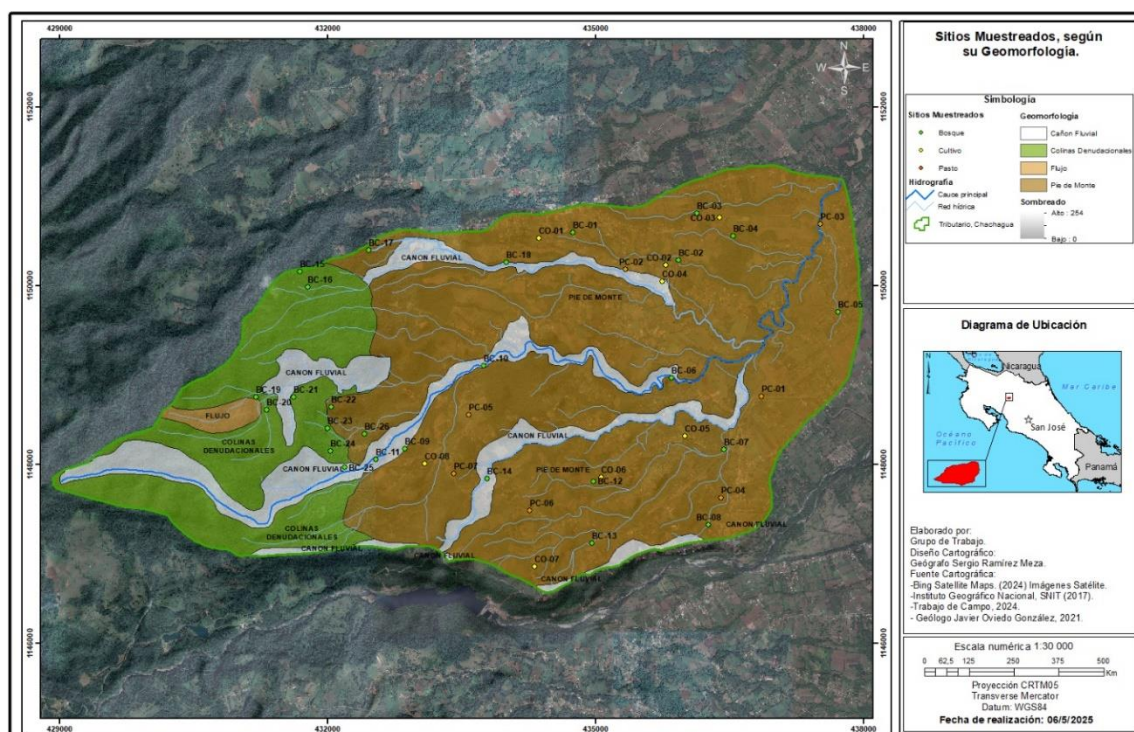
La geomorfología del tributario constituyó un elemento estructural fundamental para comprender la dinámica espacial del Carbono Orgánico del Suelo (COS), dado que moduló procesos como el escurrimiento superficial, la infiltración, la erosión y la redistribución lateral de sedimentos y materia orgánica (Rojas-Chaves, 1978). Tal como se expuso en el marco teórico, el relieve condiciona la estabilidad del suelo y su capacidad de almacenamiento de carbono, especialmente en territorios con gradientes altitudinales marcados. En este contexto, la configuración geomorfológica influyó en la acumulación diferencial de materia orgánica, al favorecer en ciertos sectores la deposición y estabilización de sedimentos finos, mientras que en otros promovió la remoción y pérdida de carbono por procesos erosivos.

Cada una de estas unidades presentó características morfodinámicas particulares, asociadas a distintos niveles de pendiente, energía del relieve y conectividad hídrica. Las colinas denudacionales, por ejemplo, evidenciaron condiciones de mayor estabilidad relativa en comparación con las zonas de flujo, donde la dinámica hídrica favoreció procesos de transporte y redistribución de materiales. De esta manera, la diferenciación geomorfológica permitió interpretar variaciones espaciales del COS en función de la interacción entre relieve, hidrología y cobertura vegetal, reforzando el carácter integrado del análisis territorial desarrollado en la investigación. En el área de estudio se distinguieron cuatro unidades

geomorfológicas principales: Pie de Monte, Colinas denudacionales, Cañón fluvial y Zonas de flujo, a continuación, se evidencia en la Mapa 6:

Mapa 6.

Tributario Río Chachagua: Geomorfología



La unidad de Pie de Monte fue la más extensa, con 1 841,8 ha (68,29 %), y se caracterizó por laderas inclinadas y suelos moderadamente desarrollados. En estas áreas se favoreció la infiltración bajo cobertura vegetal continua; sin embargo, en sectores intervenidos, la pendiente pudo intensificar procesos de lixiviación y pérdida de nutrientes, aspecto coherente con lo señalado por Lal (2004), quien indicó que las condiciones topográficas influyen directamente en la estabilidad del carbono orgánico en el suelo.

Las Colinas denudacionales (445,5 ha; 16,51 %) correspondieron a sectores donde los procesos erosivos modelaron fuertemente el relieve. Estas unidades presentaron mayor susceptibilidad a la pérdida de suelo cuando la cobertura vegetal fue removida, lo que coincidió con lo planteado por Doetterl et al. (2016) y Van Oost et al. (2007), quienes señalaron que la pendiente y la erosión condicionan la redistribución y potencial pérdida de carbono orgánico a escala de paisaje. En este sentido, la combinación entre relieve ondulado y usos agropecuarios intensivos pudo representar un factor de vulnerabilidad para el COS.

El Cañón fluvial (382,32 ha; 14,17 %) se localizó en las partes más bajas del tributario, con influencia directa del cauce principal. Estas zonas fueron propensas a inundaciones periódicas y a la deposición de materiales finos, condiciones que, bajo adecuada cobertura vegetal, pudieron favorecer la acumulación de materia orgánica en los horizontes superficiales. Tal comportamiento fue consistente con la dinámica de transporte y sedimentación descrita en estudios geomorfológicos de cuencas hidrográficas tropicales.

Finalmente, las Zonas de Flujo (26,79 ha; 0,99 %) correspondieron a antiguos movimientos en masa, caracterizados por suelos poco desarrollados y limitada estabilidad estructural. En estas áreas, la capacidad de almacenamiento de carbono pudo verse restringida por la baja evolución pedogenética y la menor profundidad efectiva del suelo.

En conjunto, la configuración geomorfológica evidenció que el relieve desempeñó un papel determinante en la dinámica edáfica del tributario, al influir en procesos de erosión, deposición y redistribución de materia orgánica a escala de paisaje. La pendiente y la posición en el relieve condicionaron la estabilidad del suelo y su capacidad de retención de carbono, aspectos que resultaron fundamentales para comprender las variaciones espaciales del COS en interacción con los tipos de suelo y los usos de la tierra.

4.1.5. Geología

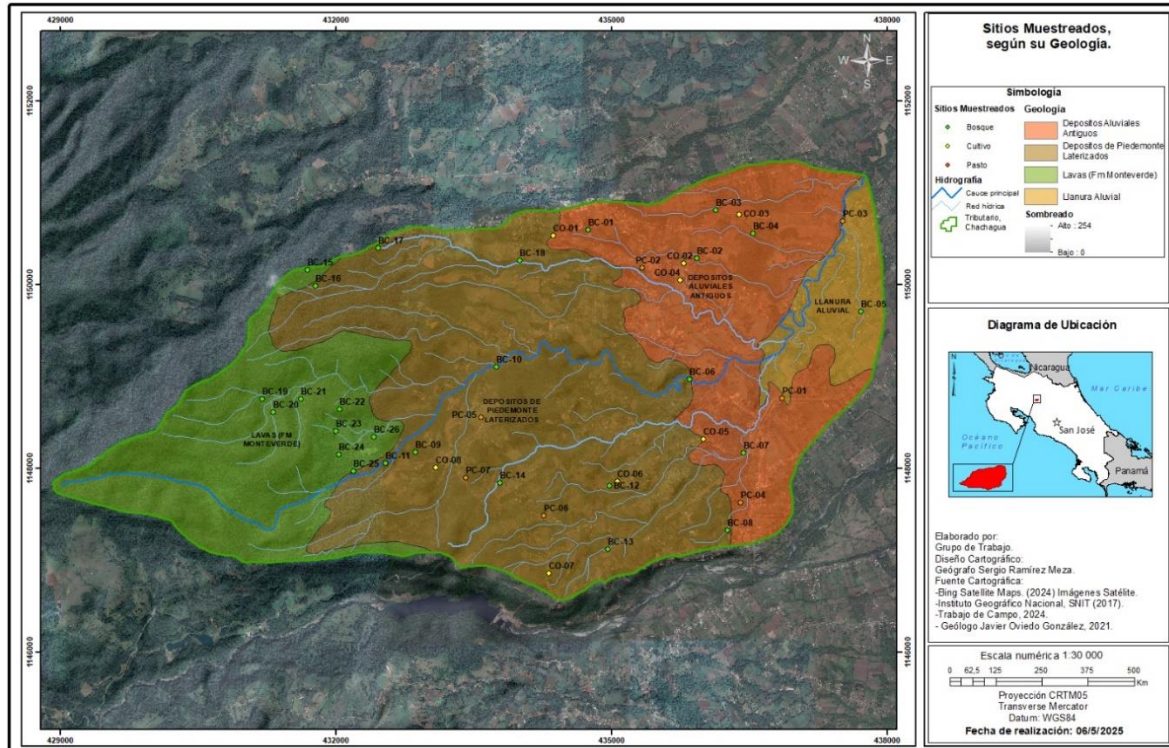
En términos geológicos, se distinguieron cinco unidades principales: Depósitos aluviales antiguos, Depósitos de piedemonte laterizados, Llanura aluvial, Lavas de la Formación Monteverde y zonas de contacto litológico (Mapa 7). La distribución de estas unidades respondió a la influencia del origen volcánico y de los procesos sedimentarios, configurando la base físico-geográfica del tributario y condicionando la diferenciación de los tipos de suelo y su comportamiento frente al almacenamiento de carbono.

En este sentido, el material parental derivado de las lavas volcánicas favoreció el desarrollo de suelos con alta capacidad de retención de materia orgánica, mientras que los depósitos aluviales más recientes evidenciaron mayor heterogeneidad textural y menor estabilidad estructural. Asimismo, las zonas de contacto litológico representaron espacios de transición donde se combinaron características mineralógicas distintas, influyendo en la variabilidad edáfica y en la distribución espacial del COS. De esta manera, la geología actuó

como un factor estructurante que condicionó los procesos pedogenéticos y la dinámica del carbono en el área de estudio.

Mapa 7.

Tributario Río Chachagua: Geología



Los Depósitos de piedemonte laterizados ocuparon la mayor extensión en el centro y sur del área. Se caracterizaron por un alto grado de alteración química y presencia de óxidos de hierro y aluminio, condiciones asociadas a procesos intensos de lixiviación en ambientes húmedos tropicales. Estas características dieron origen a suelos ácidos y altamente meteorizados, comúnmente clasificados como Ultisoles, cuya dinámica del carbono se encuentra fuertemente influenciada por el régimen hídrico y el tipo de cobertura vegetal.

Los Depósitos aluviales antiguos se ubicaron en posiciones medias y bajas del relieve, asociados a antiguos procesos de sedimentación fluvial. En estas áreas, la fertilidad potencial fue variable, dependiendo de la textura y composición de los materiales depositados. La capacidad de retención de carbono orgánico estuvo condicionada tanto por la granulometría como por el manejo del suelo, particularmente en sectores destinados a actividades agropecuarias.

La Llanura aluvial, situada hacia el sector oriental, correspondió a una zona de sedimentación activa con predominio de materiales finos y alta humedad del suelo. Bajo condiciones de cobertura vegetal continua, estos ambientes favorecieron la acumulación de materia orgánica debido a la menor velocidad de descomposición y a la deposición periódica de sedimentos ricos en nutrientes, comportamiento coherente con lo planteado por Lal (2004) con respecto a la influencia del clima y el régimen hídrico en la estabilidad del COS.

Las Lavas de la Formación Monteverde, localizadas en el sector occidental, originaron suelos volcánicos del tipo Andisol. Estos suelos se caracterizaron por su estructura friable, elevada porosidad y alto contenido de materia orgánica, lo que les confirió una notable capacidad de almacenamiento de carbono (Rojas-Barrantes, 2022). Esta condición fue consistente con lo expuesto en la teoría sobre el papel de los suelos volcánicos en la retención y estabilización del carbono orgánico (Martínez et al., 2008; Lal, 1997).

Finalmente, las zonas de contacto litológico generaron transiciones abruptas en las propiedades físicas y químicas del suelo, produciendo variabilidad edáfica adicional dentro de un espacio relativamente reducido. Esta heterogeneidad geológica contribuyó a explicar la variabilidad espacial del COS observada posteriormente, al interactuar con factores como el relieve, el uso de la tierra y las condiciones microclimáticas del tributario.

4.1.6. Pendiente

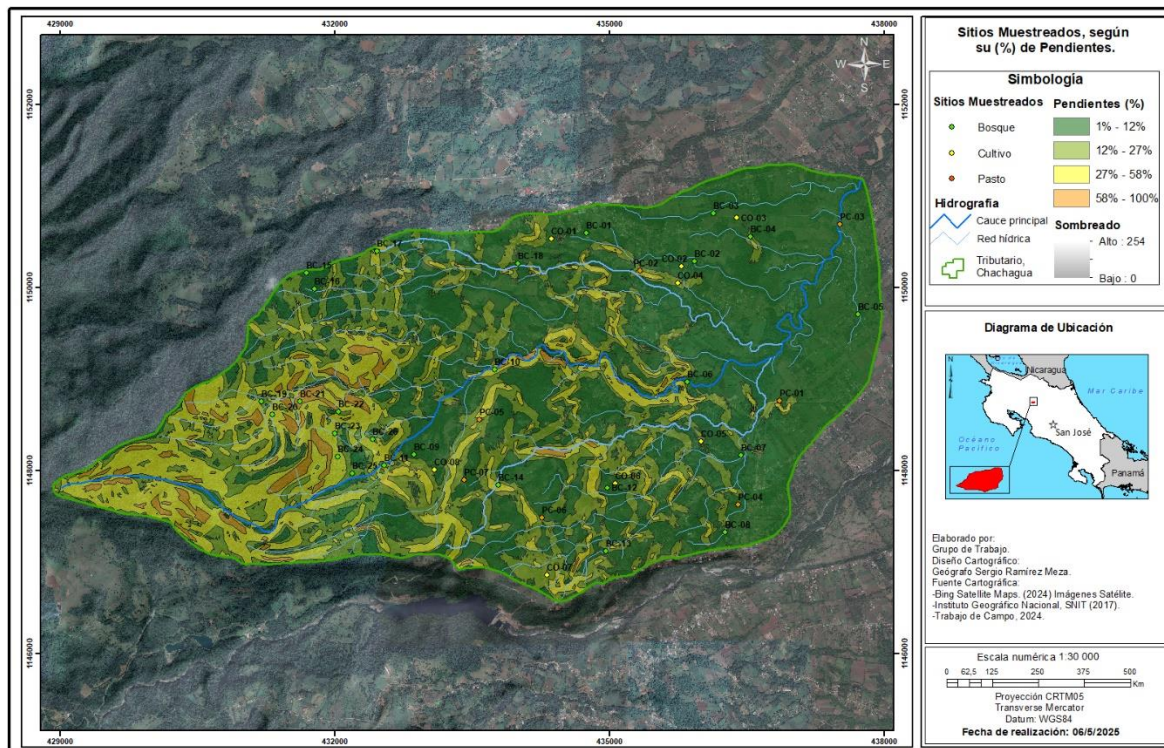
En relación con el relieve, las pendientes del área oscilaron entre valores cercanos al 12 % y el 81 % (Mapa 8). La mayor parte del territorio se concentró en categorías intermedias, entre 12 % y 58 %, mientras que los sectores con pendientes más pronunciadas se localizaron principalmente hacia el suroeste y oeste del tributario, donde predominaron coberturas boscosas. Las pendientes más suaves se distribuyeron en las partes bajas y medias, asociadas a usos agrícolas y de pastoreo, lo que facilitó el acceso y la intensificación de actividades productivas. Esta configuración topográfica influyó directamente en los procesos de escorrentía superficial, infiltración y estabilidad del suelo, factores estrechamente vinculados con la conservación o pérdida de carbono orgánico.

En las áreas de mayor pendiente, la cobertura forestal contribuyó a mitigar procesos erosivos y a mantener la estructura del suelo, favoreciendo la retención de materia orgánica. Por el contrario, en sectores con pendientes moderadas y uso agropecuario, la intervención

antrópica pudo incidir en la compactación y en la redistribución del carbono. De esta forma, la pendiente actuó como un elemento condicionante que, en interacción con el uso de la tierra, moduló la dinámica espacial del COS dentro del tributario.

Mapa 8.

Tributario Río Chachagua: Pendiente



Desde una perspectiva geográfica, la pendiente desempeñó un papel determinante en la dinámica del suelo, al influir en la velocidad del escurrimiento superficial, la susceptibilidad a la erosión y la redistribución lateral de sedimentos. Como señalaron Van Oost et al. (2007) y Doetterl et al. (2016), en paisajes con gradientes pronunciados el carbono orgánico puede movilizarse desde posiciones altas hacia zonas de acumulación en partes medias o bajas, generando patrones espaciales diferenciados dentro de una misma cuenca.

En el tributario del río Chachagua, las áreas con pendientes elevadas coincidieron mayoritariamente con cobertura boscosa, lo que contribuyó a reducir la erosión y a estabilizar el suelo mediante sistemas radiculares densos y el aporte constante de hojarasca. En contraste, en sectores con pendientes moderadas y usos agropecuarios, la remoción de cobertura vegetal pudo incrementar la vulnerabilidad a procesos erosivos, especialmente en ausencia de prácticas

de conservación. Este comportamiento fue coherente con lo planteado por Lal (2004), quien indicó que la combinación entre pendiente y manejo del suelo constituye un factor crítico en la conservación o pérdida de carbono orgánico.

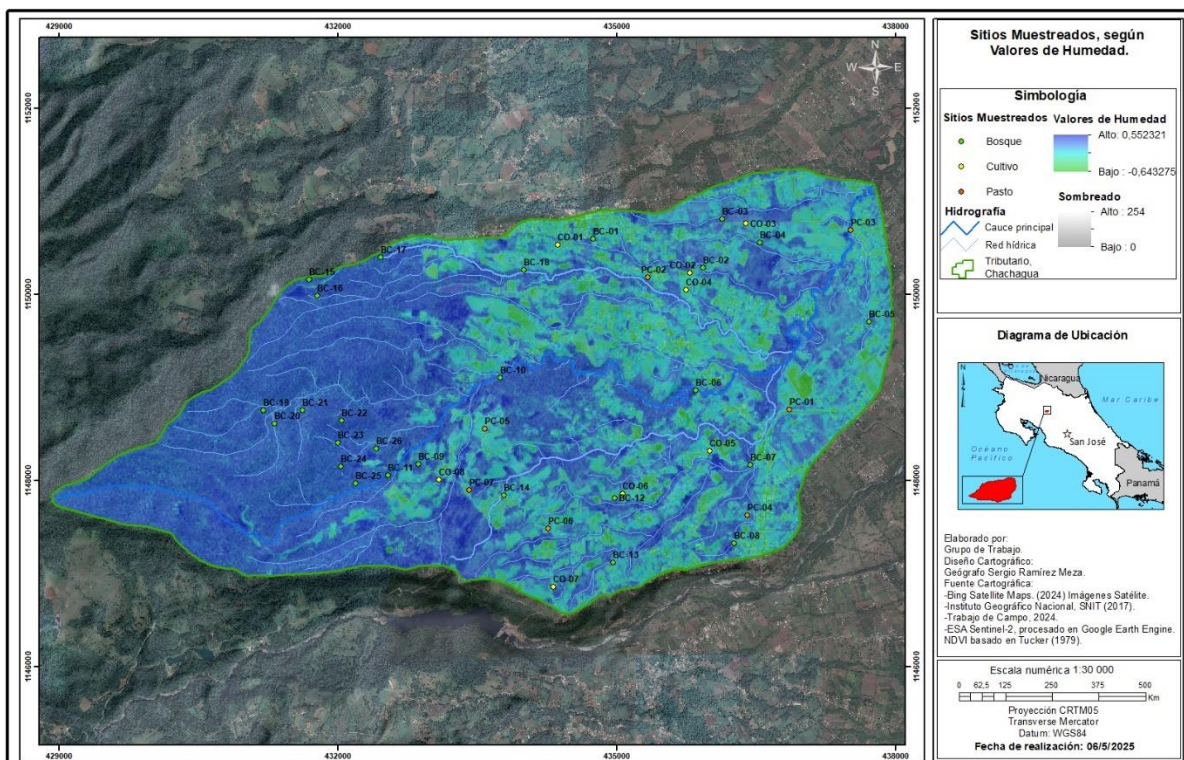
La red hidrográfica, compuesta por un cauce principal bien definido y una densa red de afluentes secundarios con patrón dendrítico, reforzó la influencia del relieve en la organización espacial del tributario. La interacción entre pendiente y drenaje condicionó la movilización de materiales finos y materia orgánica, contribuyendo a la variabilidad espacial del COS.

4.1.7. Humedad superficial del suelo

La humedad superficial del suelo (Mapa 9), estimada mediante Google Earth Engine para el año 2024, presentó valores comprendidos entre 0,22 y 0,52 m^3/m^3 (Gorelick et al., 2017). Este rango reflejó una variabilidad espacial asociada tanto a factores topográficos como a la cobertura vegetal y al grado de intervención antrópica del tributario.

Mapa 9.

Tributario Río Chachagua: valores de humedad



Las mayores humedades se concentraron en las zonas centrales y sur del tributario, coincidiendo con áreas de cobertura forestal y sectores de cañón fluvial. En estos espacios, la

menor exposición solar directa, la protección del relieve y la presencia de cobertura vegetal continua favorecieron la retención de agua en el suelo, reduciendo la evaporación y promoviendo condiciones microclimáticas más estables. Este comportamiento fue consistente con lo señalado por Garzón et al. (2021), quienes indicaron que la estructura del dosel y la densidad de la vegetación influyen significativamente en la conservación de la humedad superficial.

En contraste, los valores más bajos de humedad se asociaron a sectores con mayor exposición solar, pendientes moderadas y predominio de cultivos o pastos. La sustitución de cobertura boscosa por usos agropecuarios implicó una reducción en la capacidad de retención y regulación del agua en el suelo, en coherencia con los planteamientos teóricos sobre la relación entre uso de la tierra, cobertura vegetal y dinámica hídrica superficial (Lambin et al., 2003; Pires et al., 2011).

Desde una perspectiva espacial, la humedad superficial constituyó una variable importante para interpretar la dinámica del COS, dado que la disponibilidad hídrica influye directamente en los procesos de descomposición, mineralización y estabilización de la materia orgánica (Lal, 2004). En ambientes con mayor humedad y cobertura vegetal estable, la descomposición tiende a ser más lenta y la acumulación de residuos orgánicos más constante, lo que puede favorecer mayores contenidos de COS en los horizontes superficiales.

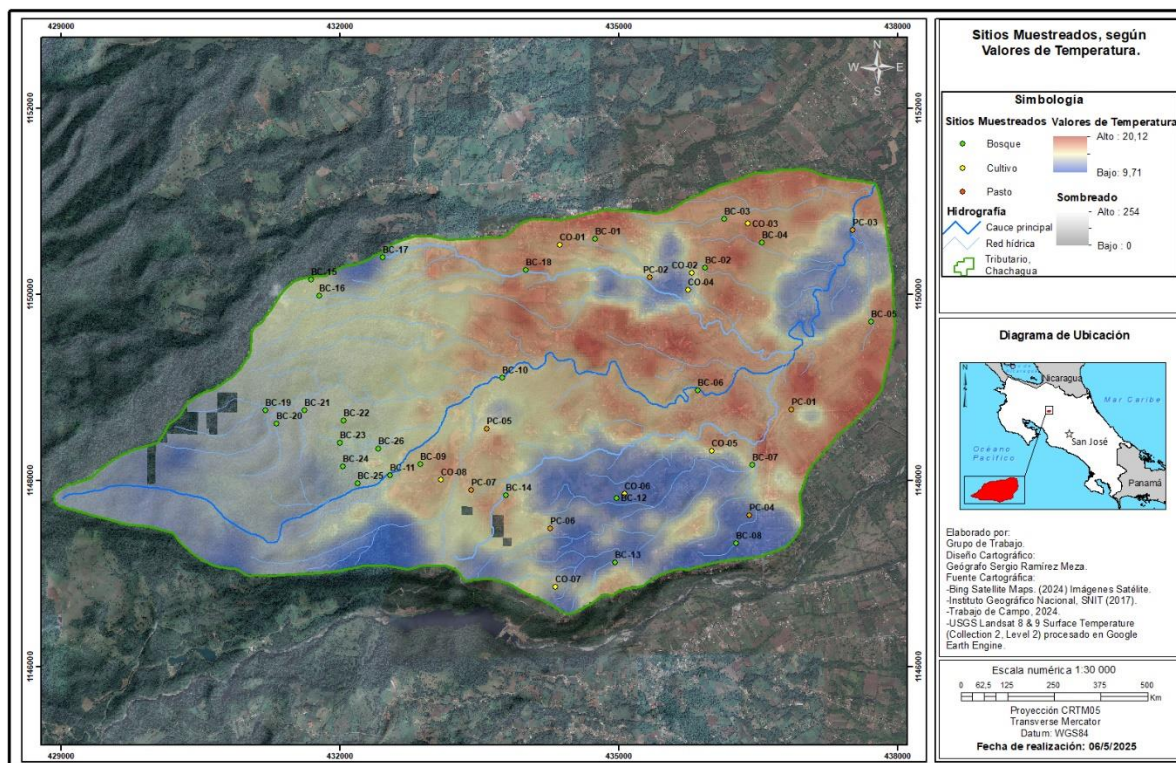
Asimismo, la relación entre humedad, relieve y cobertura observada en el tributario fue coherente con la lógica planteada en la investigación, donde las variables físico-geográficas actuaron de manera interdependiente. La distribución espacial de la humedad superficial no respondió únicamente a la topografía, sino también a la interacción entre pendiente, geología, tipo de suelo y uso de la tierra, consolidando un patrón territorial integrado que resultó fundamental para comprender la variabilidad del COS dentro del área de estudio.

4.1.8. Valores de temperatura

La temperatura superficial, estimada mediante Google Earth Engine a partir de imágenes Landsat 9 para el año 2024, osciló aproximadamente entre 9,7 °C y 20,1 °C (Mapa 10). Este gradiente térmico respondió principalmente a diferencias altitudinales, tipo de cobertura vegetal y grado de intervención antrópica dentro del tributario.

Mapa 10.

Tributario Río Chachagua: valores de Temperatura



Las temperaturas más altas se concentraron en las zonas medias y bajas, particularmente en sectores con predominio de cultivos y pastos, donde la menor densidad de cobertura arbórea favoreció una mayor exposición solar y mayor absorción de radiación en la superficie. En contraste, las temperaturas más bajas se registraron en las zonas altas del sector occidental, mayoritariamente boscosas, donde el dosel vegetal contribuyó a generar condiciones microclimáticas más estables y moderadas.

Este comportamiento fue coherente con lo reportado para ecosistemas montaños tropicales, en los cuales la cobertura forestal desempeña un papel regulador sobre la temperatura del suelo, reduciendo la amplitud térmica diaria y favoreciendo la conservación de la humedad (Marín-Spiotta et al., 2009). Asimismo, Lal (2004) señaló que la temperatura del suelo influye directamente en los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica, afectando la dinámica del carbono en sistemas tropicales.

Desde una perspectiva espacial, la distribución térmica observada mostró una relación inversa con la humedad superficial descrita en el apartado anterior, configurando un patrón integrado donde las áreas más húmedas tendieron a presentar temperaturas más moderadas,

mientras que los sectores más expuestos registraron mayores valores térmicos. Esta interacción entre temperatura, humedad y cobertura vegetal constituyó un componente fundamental para comprender las condiciones ambientales que influyeron en la acumulación o transformación del COS.

En conjunto, la caracterización físico-geográfica realizada permitió contextualizar el escenario ambiental y territorial en el cual se distribuyó el COS dentro del tributario. Las variaciones en altitud, pendiente, tipo de suelo, geología, uso de la tierra y condiciones de humedad y temperatura superficial conformaron un sistema interrelacionado que explicó la heterogeneidad espacial observada en el área de estudio. Esta base territorial constituyó el soporte interpretativo para el análisis relacional y estadístico desarrollado en el siguiente apartado.

4.2. COS y su relación con variables edáficas y físico-geográficas

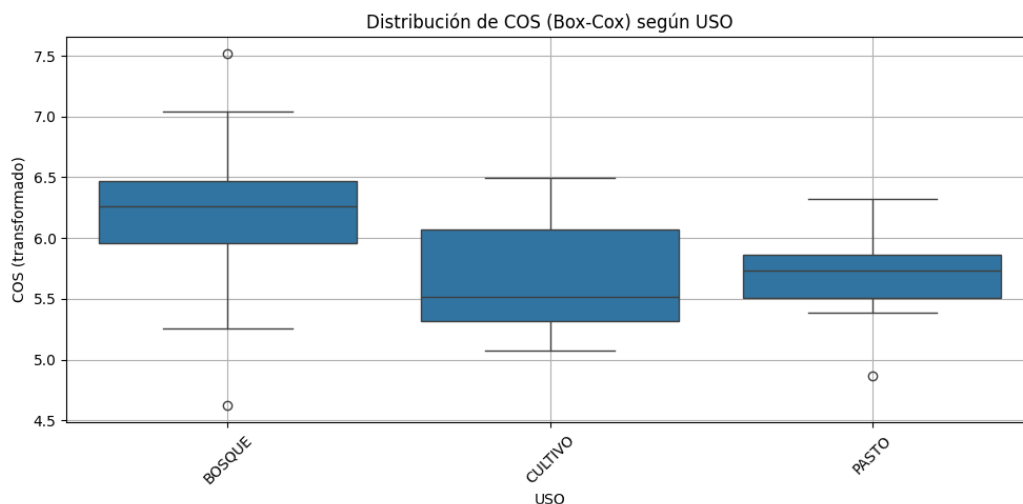
A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico realizado para evaluar la relación entre el Carbono Orgánico del Suelo (COS) y las variables físico-geográficas consideradas en la investigación. Este análisis permitió contrastar empíricamente los planteamientos teóricos y las hipótesis formuladas, identificando patrones espaciales y diferencias significativas entre categorías de uso y condiciones ambientales.

4.2.1. COS y su relación con los usos de la tierra

El boxplot del COS transformado mediante Box-Cox (Fig. 5) mostró diferencias claras entre los usos generales de la tierra. Los bosques registraron las medianas más altas de COS transformado, con valores cercanos a 6,2–6,4 y una mayor amplitud intercuartílica, seguidos por los cultivos, con medianas alrededor de 5,4–5,6, y finalmente los pastos, que presentaron valores ligeramente inferiores, concentrados entre 5,6–5,8. Esta distribución evidenció no solo diferencias en los niveles centrales de almacenamiento de carbono, sino también variaciones en la dispersión de los datos, según el tipo de uso. En el caso del bosque, la mayor amplitud intercuartílica sugirió heterogeneidad interna asociada a condiciones microambientales y estructurales, propias de estos ecosistemas. Por su parte, los cultivos y pastos mostraron una concentración más estrecha de valores, reflejando una mayor homogeneidad derivada de prácticas de manejo y uso productivo del suelo.

Figura 5.

Relación de COS (Box-Cox) según el Uso General de la Tierra



La transformación Box-Cox permitió estabilizar la varianza y aproximar la distribución de los datos a la normalidad, facilitando la comparación estadística entre categorías. No obstante, más allá del ajuste metodológico, el patrón general fue consistente: los suelos bajo cobertura boscosa almacenaron mayores contenidos de carbono orgánico en comparación con aquellos destinados a actividades agrícolas y ganaderas.

Este resultado fue coherente con lo planteado en el marco teórico, respecto a la influencia del uso de la tierra en la dinámica del carbono (Lambin et al., 2003; Lal, 2004). Diversos estudios han señalado que la conversión de bosque a sistemas agropecuarios reduce el aporte de residuos orgánicos, altera la estructura del suelo y acelera procesos de mineralización, lo que disminuye las reservas de COS (Ibrahim et al., 2006; INECC, 2018). En el caso del tributario del río Chachagua, la predominancia de mayores valores en áreas boscosas confirmó la hipótesis que planteaba que las coberturas forestales actúan como reservorios estratégicos de carbono en sistemas tropicales.

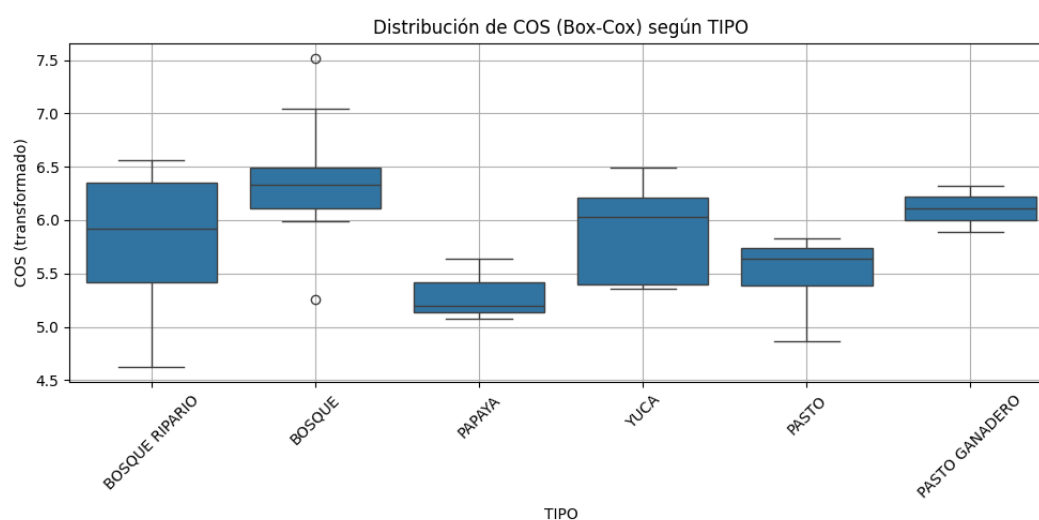
Se identificaron algunos valores atípicos en los usos de bosque y pasto. Estos no se interpretaron como errores de medición, sino como expresiones de la variabilidad natural del COS, asociada probablemente a diferencias locales en densidad de vegetación, historial de uso, manejo del suelo o condiciones topográficas específicas. Tal comportamiento coincide con lo señalado por Post y Kwon (2000), quienes indicaron que el carbono del suelo presenta alta heterogeneidad espacial, incluso dentro de una misma categoría de uso.

Desde la perspectiva del ordenamiento territorial, estos resultados reforzaron el papel de las coberturas boscosas, incluidos los bosques riparios, como sumideros estratégicos de carbono. Asimismo, pusieron de relieve la necesidad de implementar prácticas de manejo sostenible en zonas agrícolas y de pastoreo, con el fin de evitar pérdidas progresivas de COS y promover su conservación en el mediano y largo plazo.

Con el fin de profundizar el análisis, la Figura 6 presenta la distribución del COS transformado mediante Box-Cox, diferenciando los tipos específicos de cobertura y uso de la tierra.

Figura 6.

Relación de COS (Box-Cox) según Tipos Específicos de Cobertura y Uso de la Tierra



En este nivel de desagregación se observó que los bosques y, particularmente, el bosque ripario, registraron las medianas más altas de COS, con valores cercanos o superiores a 6,2, aunque con mayor dispersión asociada a la dinámica fluvial y a la heterogeneidad ambiental propia de estos sistemas. La mayor acumulación de carbono en áreas ribereñas fue consistente con lo señalado por Lal (2004), quien indicó que los ambientes con deposición periódica de sedimentos finos y aporte continuo de residuos orgánicos favorecen la estabilización del carbono en el suelo.

Los pastos y pastos ganaderos, específicamente, mostraron valores intermedios, con medianas alrededor de 5,6–5,9. En el caso del pasto ganadero, el comportamiento observado se relacionó con un manejo no intensivo en los sitios muestreados, donde el disturbio fue relativamente bajo. No obstante, la compactación asociada al tránsito animal puede modificar

la estructura del suelo y afectar la dinámica del carbono a largo plazo, tal como lo han documentado INECC (2018) e Ibrahim et al. (2006) en sistemas agropecuarios tropicales.

En contraste, los cultivos de papaya y yuca concentraron los valores más bajos de COS, con medianas próximas a 5,2–5,4. Esta tendencia se asoció a un mayor grado de disturbio vinculado a prácticas agrícolas intensivas, labranza frecuente y menor aporte de residuos orgánicos permanentes al suelo. Diversos estudios han señalado que la conversión de bosque a sistemas agrícolas reduce significativamente las reservas de carbono debido a la alteración estructural del suelo y a la aceleración de los procesos de mineralización (Post & Kwon, 2000; Lal, 2004).

En conjunto, el gradiente observado confirmó una relación inversa entre el nivel de intervención antrópica y el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo. Las coberturas forestales, caracterizadas por menor disturbio y aporte constante de hojarasca, mantuvieron mayores contenidos de COS, mientras que los sistemas agrícolas intensivos mostraron reducciones más marcadas. Estos resultados respaldaron la hipótesis planteada, respecto a la influencia del uso específico de la tierra, en la variabilidad del carbono orgánico dentro del tributario.

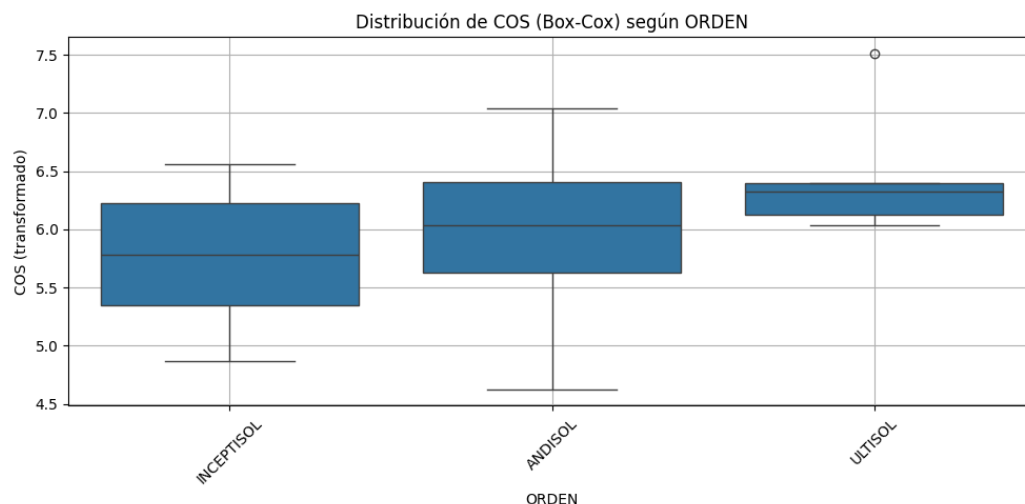
4.2.2 COS y su relación con orden y suborden de suelos

La relación entre el COS y los órdenes de suelo Inceptisol, Andisol y Ultisol se presentó en la Figura 7. Los resultados mostraron que Andisoles y Ultisoles registraron medianas superiores de COS en comparación con los Inceptisoles, esto confirmó diferencias claras entre grupos. Esta tendencia evidenció la influencia de las propiedades mineralógicas y del grado de desarrollo pedogenético en la capacidad de almacenamiento de carbono.

Los Andisoles, derivados de materiales volcánicos recientes, presentaron una mayor estabilidad estructural y alta capacidad de retención de materia orgánica; esto favoreció concentraciones elevadas de COS. Por su parte, los Ultisoles, a pesar de su mayor grado de meteorización, mantuvieron contenidos significativos de carbono en sectores con cobertura boscosa y condiciones de humedad favorables. En contraste, los Inceptisoles mostraron valores más bajos y una menor variabilidad interna, lo que sugirió un desarrollo edáfico menos avanzado y una menor acumulación histórica de materia orgánica en comparación con los otros órdenes.

Figura 7.

Relación de COS (Box-Cox) según el Orden del Suelo

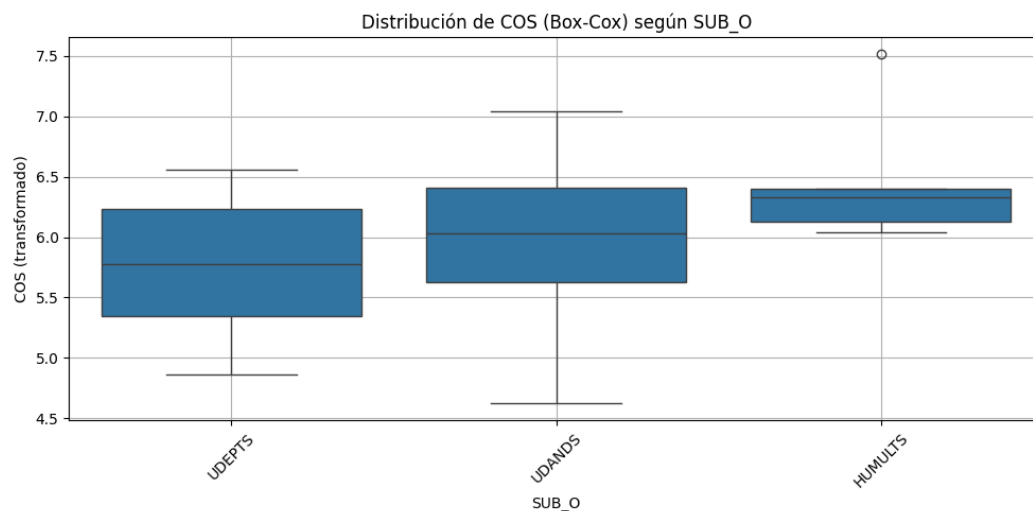


Esta tendencia fue coherente con lo descrito para suelos volcánicos y altamente meteorizados, donde la mineralogía, la acidez y la formación de complejos órgano-minerales favorecieron la estabilización de la materia orgánica (Alvarado & Forsythe, 2005; Rojas et al., 2022). En particular, los Andisoles, derivados de materiales volcánicos, presentaron condiciones estructurales y alta porosidad que favorecieron la acumulación de carbono; mientras que los Ultisoles, pese a su alta meteorización, mantuvieron contenidos importantes de COS bajo cobertura vegetal estable. Estos resultados respaldaron la hipótesis que planteó que el tipo de suelo constituyó un factor determinante en la capacidad de almacenamiento de carbono.

A nivel de suborden (Fig. 8), los Humults registraron las medianas más altas de COS, seguidos por los Udands, mientras que los Udepts presentaron los valores más bajos. Este comportamiento evidenció que, incluso dentro de un mismo orden, las diferencias en régimen de humedad, desarrollo del horizonte subsuperficial y grado de lixiviación influyeron en la acumulación y estabilidad del carbono orgánico. Los Humults, asociados a condiciones más húmedas y cobertura boscosa predominante, mostraron mayor capacidad de retención de materia orgánica, mientras que los Udepts reflejaron perfiles menos desarrollados y, por tanto, menor acumulación histórica de carbono en el suelo.

Figura 8.

Relación de COS (Box-Cox) según el Suborden del Suelo



Los Humults, asociados a ambientes húmedos y suelos más evolucionados, mostraron mayor capacidad de acumulación de materia orgánica. Los Udands reflejaron una mayor dispersión de valores, atribuible a la influencia combinada de origen volcánico y manejo del suelo. En contraste, los Udepts, como suelos de desarrollo incipiente, presentaron menor diferenciación de horizontes y menor contenido de COS, lo cual fue consistente con la literatura edafológica tropical (Alvarado & Forsythe, 2005).

En varias categorías (Ultisol y Humults) se identificó un mismo valor atípico elevado de COS. Su recurrencia indicó que no se trató de un error de medición, sino de un sitio con condiciones locales particularmente favorables, profundidad efectiva del suelo, estabilidad estructural, adecuada disponibilidad de humedad y cobertura conservada, que potenciaron la acumulación de carbono. Este comportamiento reafirmó la alta heterogeneidad espacial del COS dentro del tributario.

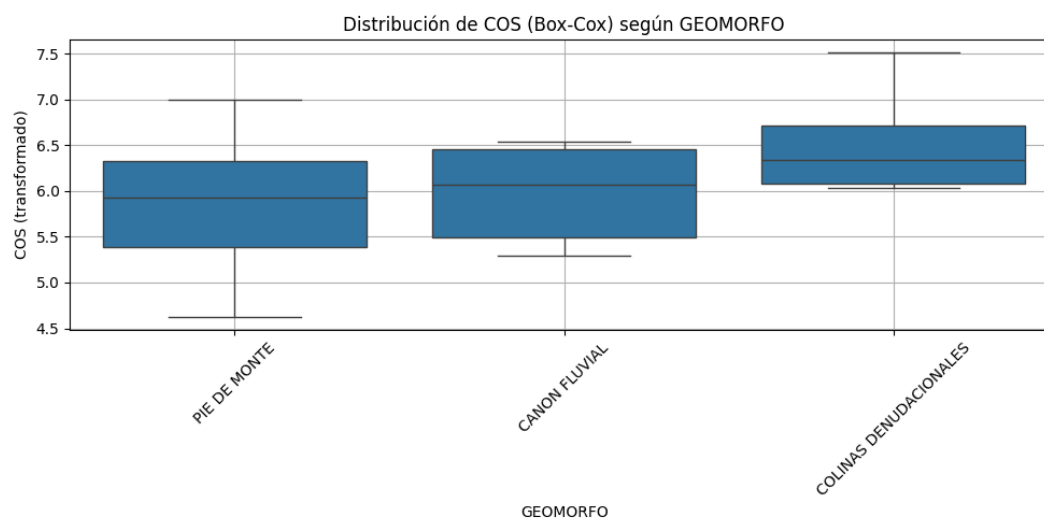
En síntesis, el análisis por orden y suborden confirmó que la capacidad de almacenamiento de carbono estuvo fuertemente condicionada por la naturaleza pedológica del suelo. Andisoles y Humults destacaron como reservorios importantes, mientras que Inceptisoles y Udepts evidenciaron mayor vulnerabilidad frente a procesos de disturbio y pérdida de carbono.

4.2.3. COS y su relación con la geomorfología y geología

El análisis por unidades geomorfológicas (Fig. 9) mostró diferencias claras en la distribución del COS transformado. Las colinas denudacionales registraron las medianas más altas, seguidas por el pie de monte y el cañón fluvial.

Figura 9.

Relación de COS (Box-Cox) según Geomorfología

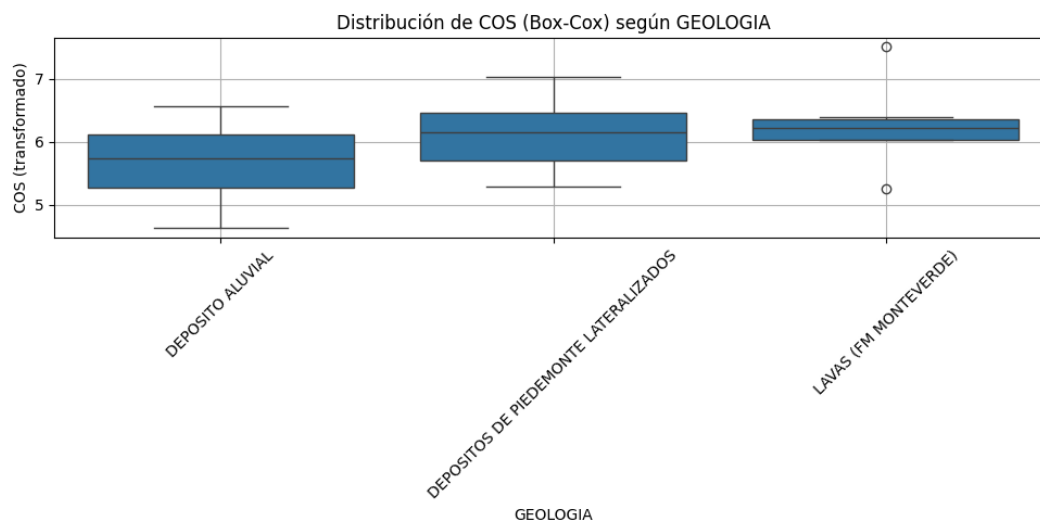


Las colinas denudacionales combinaron pendientes intermedias, suelos desarrollados y coberturas boscosas estables, condiciones que favorecieron la acumulación y conservación de materia orgánica. El pie de monte presentó valores intermedios, asociados a infiltración y estabilidad del suelo. En el cañón fluvial, los valores moderados reflejaron la influencia de procesos erosivos y deposición vinculados a la dinámica del cauce principal, en concordancia con Van Oost et al. (2007) sobre la movilización de carbono en paisajes con control topográfico. Esta distribución evidenció que la posición en el relieve condicionó la redistribución lateral del carbono orgánico dentro del sistema.

En términos geológicos (Fig. 10), los depósitos de piedemonte laterizados registraron mayores contenidos de COS en comparación con los depósitos aluviales, lo que sugirió mayor estabilidad edáfica y menor remoción de sedimentos. Las lavas de la Formación Monteverde también mostraron contenidos relevantes de carbono, asociados a suelos derivados de materiales volcánicos con alta capacidad de retención. Por el contrario, los depósitos aluviales presentaron mayor variabilidad, reflejando dinámicas de transporte y renovación del material superficial.

Figura 10.

Relación de COS (Box-Cox) según Geología



Los suelos desarrollados sobre materiales laterizados presentaron mayor estabilidad estructural y condiciones químicas que favorecieron la retención de carbono, mientras que los suelos formados sobre depósitos aluviales más recientes mostraron mayor variabilidad, atribuible a su menor grado de evolución pedogenética. Las lavas de la Formación Monteverde evidenciaron un comportamiento intermedio, aunque con presencia de valores atípicos elevados, coherente con el potencial de los suelos volcánicos para estabilizar materia orgánica mediante complejos órgano-minerales (Rojas, 2022).

El valor atípico alto de COS que se repitió en colinas denudacionales, lavas volcánicas, Humults/Ultisoles y coberturas boscosas indicó la convergencia de condiciones particularmente favorables, profundidad efectiva, estabilidad estructural, adecuada disponibilidad hídrica y baja intervención, para el almacenamiento de carbono. Su recurrencia en distintas clasificaciones confirmó que no se trató de un dato aislado, sino de un sitio con alta relevancia ecológica dentro del tributario.

En conjunto, el análisis geomorfológico y geológico reforzó que el almacenamiento de COS no dependió únicamente del uso de la tierra, sino de la interacción entre relieve, material parental y evolución del suelo, respaldando la hipótesis de que las variables físico-geográficas actúan de manera integrada en la determinación de los contenidos de carbono orgánico.

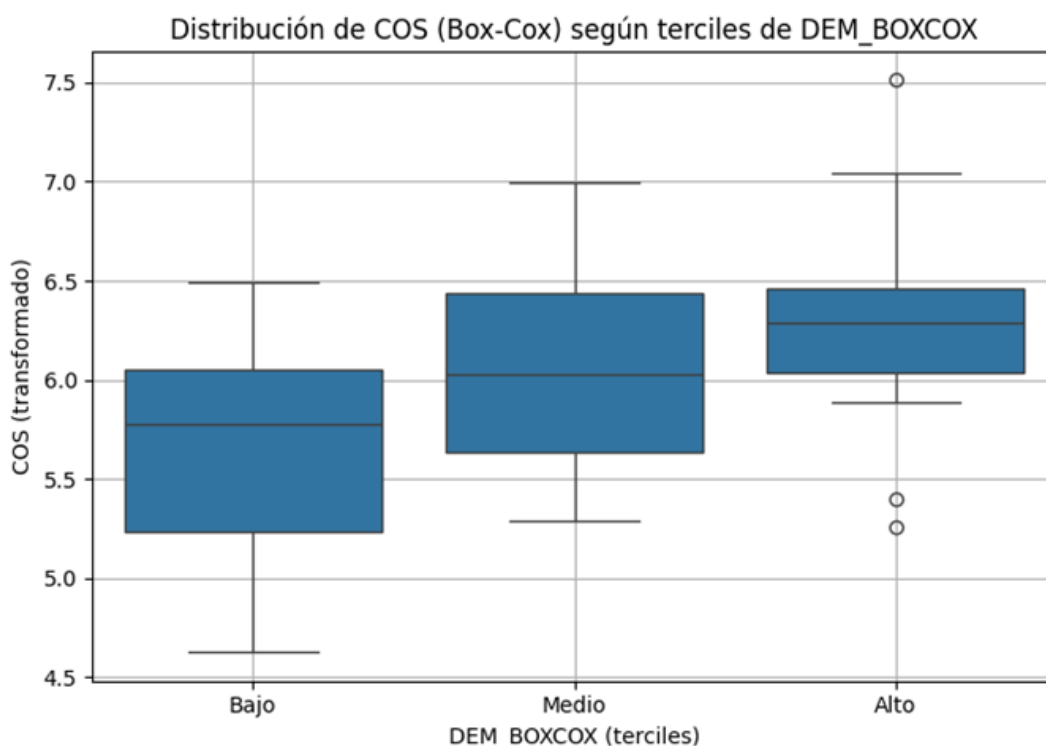
4.2.4. Relaciones entre el COS y altitud (DEM)

Las variables numéricas derivadas del modelo digital de elevación (DEM) y de sensores remotos se analizaron mediante ANOVA por terciles y boxplots comparativos (Figuras 21 a 24). En esta sección se describen los patrones generales identificados, mientras que los resultados detallados de la prueba LSD de Fisher, las regresiones lineales simples y los boxplots con el COS sin transformar se presentan en los anexos correspondientes (Anexo 2, Figuras 15 a 18; Anexo 3, Figuras 19 a 22; Anexo 4, Figuras 23 a 26).

La variable altitud mostró una relación positiva con el COS (Fig. 11). Los boxplots evidenciaron que el tercil superior de elevación concentró las medianas más altas de carbono, mientras que los valores más bajos se registraron en el tercil inferior.

Figura 11.

Relación de COS (Box-Cox) según DEM (Z) /Altitud



La regresión lineal simple entre COS y DEM presentó uno de los coeficientes de determinación más altos del conjunto de variables numéricas ($R^2 \approx 0,17$), esto indicó que la altitud constituyó la variable con mayor poder explicativo en el comportamiento del COS dentro del área de estudio. Aunque el valor de R^2 no fue elevado en términos absolutos, sí evidenció una tendencia consistente y estadísticamente relevante.

Desde el punto de vista espacial, los sectores de mayor altitud coincidieron con temperaturas más bajas, mayor humedad superficial y menor intensidad de intervención antrópica, condiciones que favorecieron la acumulación y conservación de materia orgánica. Este patrón fue coherente con lo señalado por Lal (2004) y Marín-Spiotta et al. (2009), quienes indicaron que en ambientes montanos tropicales la reducción de temperatura y la mayor disponibilidad hídrica tienden a desacelerar la descomposición, promoviendo mayores contenidos de carbono en el suelo.

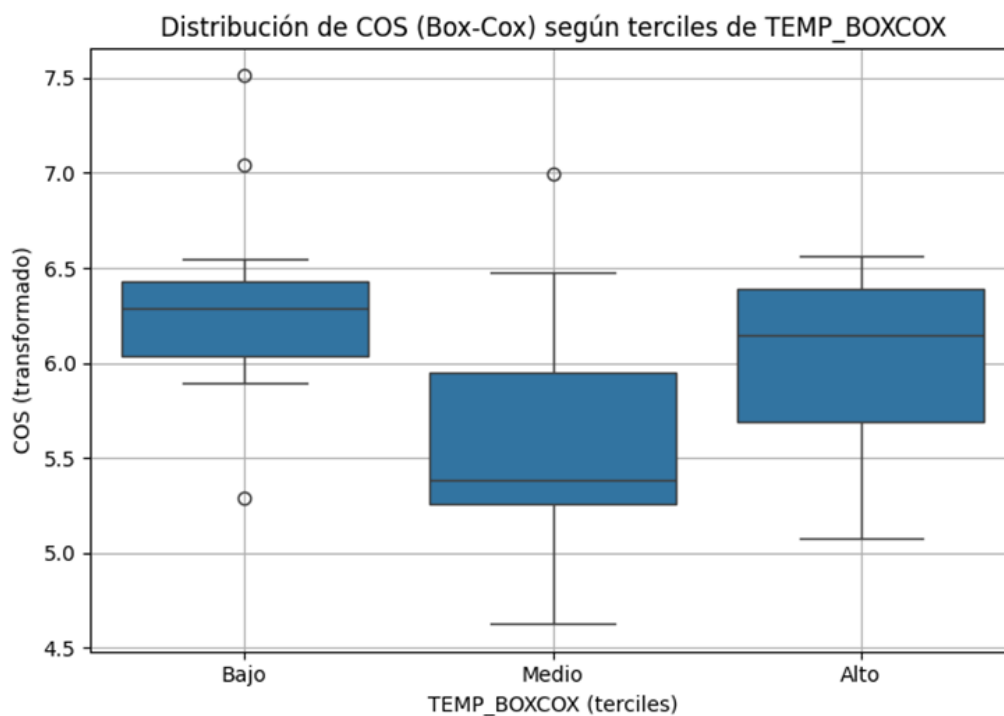
Estos resultados respaldaron la hipótesis que planteaba que las variables topográficas, particularmente la altitud, influyen significativamente en la distribución espacial del COS. No obstante, la magnitud del coeficiente de determinación indicó que la altitud actuó en interacción con otras variables físico-geográficas, más que como un factor aislado.

4.2.5. COS y temperatura superficial

La temperatura superficial mostró una relación inversa con el contenido de carbono orgánico del suelo (Fig. 12). Los terciles de menor temperatura concentraron las medianas más altas de COS, mientras que el tercil intermedio presentó los valores más bajos.

Figura 12.

Relación de COS (Box-Cox) según Temperatura



Las regresiones lineales simples evidenciaron coeficientes de determinación bajos ($R^2 < 0,04$), lo que indicó que la temperatura, analizada de forma aislada, tuvo un poder explicativo limitado sobre la variabilidad del COS. No obstante, la dirección de la tendencia fue consistente con lo esperado en ecosistemas montanos tropicales, donde temperaturas más bajas reducen la velocidad de descomposición y mineralización de la materia orgánica (Lal, 2004; Marín-Spiotta et al., 2009).

Desde el punto de vista espacial, los sectores de menor temperatura coincidieron con mayores altitudes y coberturas boscosas, lo que indicó que la temperatura actuó de manera interrelacionada con variables físico-geográficas y de uso de la tierra. En este sentido, aunque su influencia individual fue moderada, contribuyó al patrón general de acumulación de COS en las zonas altas del tributario.

Estos resultados respaldaron parcialmente la hipótesis planteada respecto al efecto de las variables climáticas superficiales en la distribución del carbono orgánico, aunque evidenciaron que su impacto dependió de la interacción con otros factores físico-geográficos.

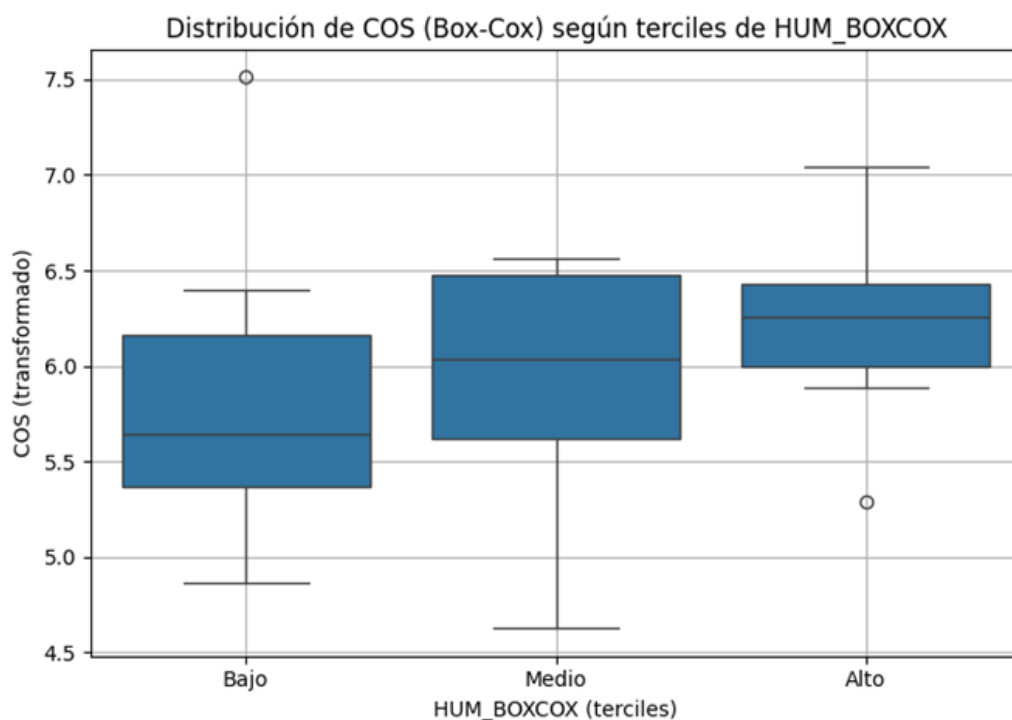
4.2.6. COS y humedad superficial

La humedad superficial mostró una relación positiva con el contenido de carbono orgánico del suelo (Fig. 13). Los terciles medio y alto concentraron medianas más elevadas de COS transformado y una dispersión ligeramente menor en comparación con el tercil bajo, donde se registraron los valores más reducidos. Este comportamiento evidenció que las condiciones de mayor disponibilidad hídrica favorecieron la acumulación y conservación de materia orgánica en el suelo, al reducir la tasa de descomposición acelerada asociada a ambientes más secos y a fluctuaciones térmicas más intensas.

Asimismo, los sectores con humedad superficial más alta coincidieron espacialmente con áreas de mayor cobertura vegetal y menor intervención antrópica, lo que reforzó la interacción entre factores edáficos, climáticos y de uso de la tierra. La menor dispersión observada en los terciles medio y alto sugirió mayor estabilidad en el almacenamiento de carbono bajo condiciones hídricas favorables. En contraste, el tercil bajo reflejó mayor variabilidad, asociada a zonas con menor retención de humedad, pendientes más expuestas y usos productivos que influyeron en la dinámica del carbono del suelo.

Figura 13.

Relación de COS (Box-Cox) según Humedad Superficial



La regresión lineal simple entre COS y humedad presentó un coeficiente de determinación intermedio ($R^2 \approx 0,10$), lo que indicó que la disponibilidad de agua en el suelo tuvo un efecto explicativo moderado sobre la variabilidad del carbono. Este comportamiento es consistente con lo señalado en la literatura, donde condiciones de mayor humedad favorecen la acumulación y estabilización de materia orgánica, especialmente cuando se combinan con coberturas vegetales densas y suelos con buena estructura (Lal, 2004; Garzón et al., 2021).

La distribución territorial de la humedad mostró coincidencia con zonas boscosas, áreas de cañón fluvial y posiciones geográficas de menor exposición, lo que indicó una interacción entre la disponibilidad hídrica, el relieve y el uso de la tierra. En este contexto, aunque la humedad no explicó de manera aislada la totalidad de la variación del COS, sí constituyó una variable importante dentro del conjunto de factores físico-geográficos considerados.

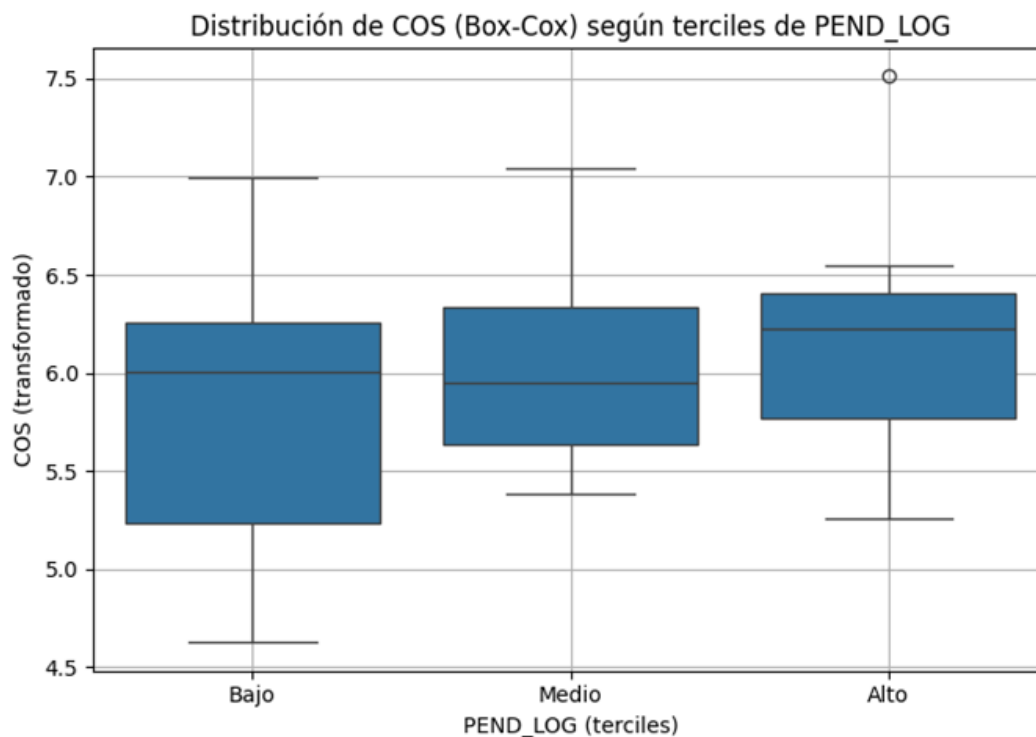
4.2.7. COS y pendiente del terreno

La pendiente, transformada logarítmicamente, no presentó diferencias estadísticamente significativas en el ANOVA y registró los coeficientes de determinación más bajos en las

regresiones lineales ($R^2 \approx 0,03$). Estos resultados indicaron que, de manera aislada, la pendiente tuvo un poder explicativo limitado sobre la variación del COS.

Figura 14.

Relación de COS (Box-Cox) según Pendiente



No obstante, los boxplots evidenciaron que las pendientes altas no implicaron necesariamente menores contenidos de carbono. En sectores con cobertura boscosa y suelos estructuralmente estables se observaron valores relativamente elevados de COS, lo que sugiere que el efecto de la pendiente dependió del uso de la tierra y de las condiciones físico-geográficas locales.

El valor atípico elevado reapareció en el tercil alto de pendiente, coincidiendo con terciles altos de altitud y bajos de temperatura. Esta recurrencia reforzó la interpretación de un sitio donde convergieron condiciones particularmente favorables para la acumulación de carbono, más allá del efecto individual de cada variable.

En conjunto, los análisis estadísticos desarrollados en los apartados 4.2.1 a 4.2.7 evidenciaron que la distribución del COS respondió a una interacción compleja entre variables edáficas, geomorfológicas, geológicas, topográficas y climáticas. A partir de estos resultados,

se presenta a continuación una síntesis integradora orientada a interpretar los patrones espaciales de acumulación de carbono en el tributario del río Chachagua.

4.3 Síntesis de patrones espaciales del COS asociados a variables edáficas y físico-geográficas

4.3.1. Uso de la tierra

En concordancia con los resultados estadísticos del apartado 4.2, las coberturas boscosas, incluido el bosque ripario, concentraron consistentemente los valores más altos de COS, mientras que los cultivos intensivos, como papaya y yuca, registraron los contenidos más bajos. Los pastos ocuparon una posición intermedia, evidenciando un potencial de mejora condicionado por el tipo de manejo aplicado.

Este patrón confirmó el papel de los ecosistemas forestales como reservorios estratégicos de carbono y señaló a las áreas agrícolas intensivas como sectores con mayor vulnerabilidad a la disminución del COS. La gradiente observada reflejó una relación directa entre el grado de intervención antrópica y la capacidad de almacenamiento del suelo, coherente con lo descrito en la literatura, sobre cambio de uso de la tierra y dinámica del carbono en sistemas tropicales (Lal, 2004; Lambin et al., 2003).

En términos territoriales, la distribución del COS evidenció que la conservación de coberturas boscosas y la implementación de prácticas agroecológicas en zonas productivas constituyen elementos fundamentales para la sostenibilidad del recurso suelo en el tributario del río Chachagua.

4.3.2. Tipos de suelo y DA.

Los Andisoles y Ultisoles, en particular los subórdenes Humults y Udands, se consolidaron como las unidades edáficas con mayor capacidad de almacenamiento de COS, mientras que los Inceptisoles y Udepts presentaron contenidos más bajos y mayor susceptibilidad a procesos de degradación. Este comportamiento se relacionó con diferencias en el grado de desarrollo pedogenético, la mineralogía y la estabilidad de los complejos órgano-minerales, factores que condicionan la retención y protección del carbono en el suelo.

La densidad aparente (DA) reflejó el efecto del uso de la tierra sobre la estructura del suelo: los valores más bajos se asociaron a coberturas boscosas, donde predominó una mayor porosidad y acumulación de materia orgánica, mientras que los valores más altos se registraron

en áreas de cultivo, evidenciando mayor compactación. En conjunto, estos resultados confirmaron que el tipo de suelo y su estado estructural constituyeron condicionantes fundamentales del almacenamiento de COS en el tributario.

4.3.3. Contexto geomorfológico y geológico.

El contexto geomorfológico y geológico influyó de manera directa en la configuración espacial del COS. Las colinas denudacionales y los depósitos de piedemonte laterizados concentraron mayores contenidos de carbono, particularmente cuando coincidieron con suelos volcánicos desarrollados y coberturas boscosas estables. Esta asociación evidenció que la combinación entre posición en el relieve, material parental y uso de la tierra resultó determinante en la acumulación del carbono orgánico.

En contraste, los depósitos aluviales recientes mostraron mayor variabilidad y menor estabilidad estructural, lo que limitó su capacidad de retención de COS bajo condiciones de mayor intervención. Por su parte, las lavas de la Formación Monteverde constituyeron un material parental favorable para el desarrollo de Andisoles con alta porosidad y contenido de materia orgánica, reforzando el papel del origen volcánico en la dinámica del carbono del tributario.

En conjunto, estos resultados confirmaron que la base litológica y la morfología del terreno no actuaron de forma aislada, sino que condicionaron la aptitud del suelo para almacenar carbono en interacción con factores edáficos y de uso.

4.3.4. Altitud/DEM, pendiente, temperatura y humedad superficiales.

Entre las variables numéricas analizadas, la altitud se consolidó como el factor con mayor capacidad explicativa en la variación del COS, seguida por la humedad superficial. La temperatura presentó una relación inversa de menor magnitud, mientras que la pendiente mostró un efecto poco definido cuando se evaluó de manera aislada.

En conjunto, estos resultados indicaron que las zonas altas, caracterizadas por temperaturas más bajas y mayor disponibilidad de humedad, concentraron los contenidos más elevados de carbono orgánico. No obstante, la influencia de estas variables no fue independiente, sino que estuvo mediada por la interacción con el tipo de suelo, el material parental y la cobertura vegetal.

Desde una óptica territorial, el patrón observado señaló que los sectores de mayor altitud, con suelos volcánicos desarrollados y cobertura boscosa estable, constituyeron los principales reservorios de COS dentro del tributario, mientras que las zonas bajas y con mayor intervención mostraron menor capacidad de acumulación.

4.3.5. Sitio de alta acumulación de carbono.

El valor atípico recurrente de COS permitió identificar un sitio donde coincidieron condiciones edáficas, geomorfológicas, geológicas y ambientales particularmente favorables para la acumulación de carbono. En este punto convergieron suelos del tipo Humults/Ultisoles, cobertura boscosa estable, colinas denudacionales asociadas a lavas volcánicas y condiciones climáticas propias de mayores altitudes y temperaturas más bajas.

La superposición de estos factores evidenció un espacio con alta eficiencia en la captura y estabilización de carbono orgánico del suelo, resultado de la interacción entre material parental volcánico, desarrollo pedogenético, cobertura vegetal y condiciones microclimáticas. Más que responder a una sola variable, este comportamiento reflejó la articulación sistémica de los componentes físico-geográficos del tributario.

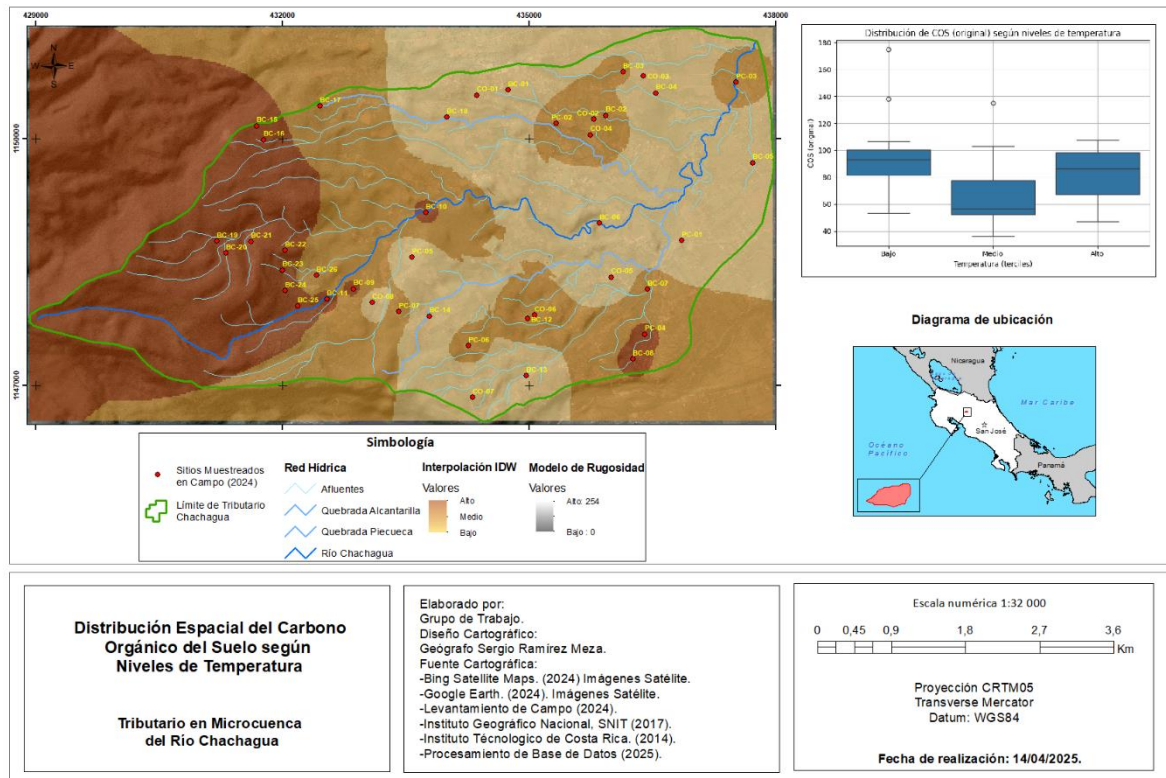
Este sitio puede interpretarse como un núcleo ecológico relevante dentro del territorio, dado que sintetiza las condiciones que favorecen el almacenamiento sostenido de carbono en el suelo.

4.3.6. Distribución espacial del COS según temperatura y altitud

El mapa coroplético de temperatura (Mapa 11) permitió visualizar la distribución espacial del COS en función de los terciles térmicos. Los mayores contenidos de carbono se concentraron en sectores con temperaturas superficiales más bajas, localizados principalmente en el noroeste del tributario, donde predominan mayores altitudes, relieve montañoso y cobertura boscosa. En contraste, las zonas centrales y sureste, caracterizadas por temperaturas intermedias a altas y mayor intervención antrópica, presentaron menores concentraciones estimadas de COS.

Mapa 11.

Distribución Espacial del COS según los niveles de Temperatura

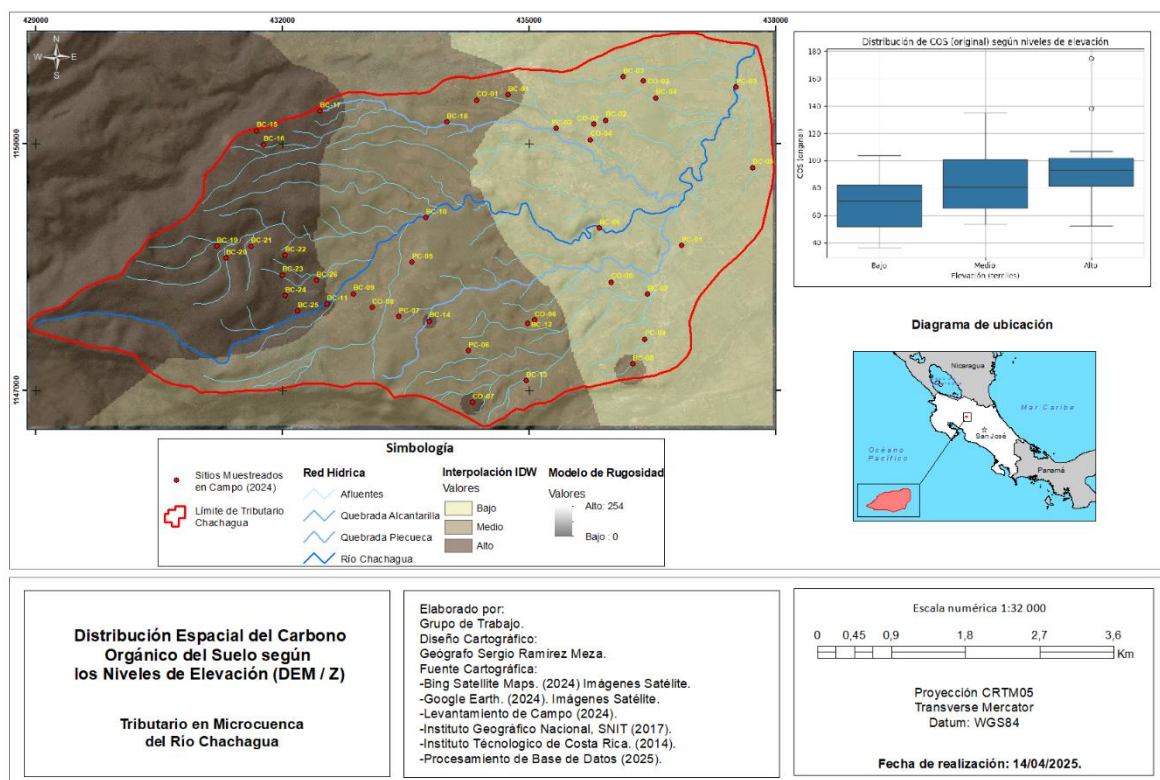


Este patrón espacial reforzó la tendencia negativa identificada en el análisis estadístico entre temperatura y carbono, evidenciando que las condiciones térmicas más frescas favorecieron la acumulación y estabilidad de la materia orgánica en el suelo.

Por su parte, el mapa basado en los terciles de elevación (Mapa 12) mostró una relación espacial consistente con los resultados del modelo estadístico, donde las mayores concentraciones de COS se asociaron a los niveles altitudinales altos. Las zonas de mayor elevación coincidieron con ambientes más frescos, menor presión antrópica y presencia de suelos volcánicos desarrollados, condiciones que en conjunto favorecieron el almacenamiento de carbono.

Mapa 12.

Distribución Espacial del COS según los niveles de Elevación (DEM / Z)



La integración de ambos mapas permitió confirmar que el gradiente altitudinal estructuró en gran medida la distribución del COS en el tributario, mientras que la temperatura actuó como un factor asociado a dicho gradiente. En términos espaciales, los sectores altos del área de estudio se consolidaron como las principales áreas de acumulación de carbono, en contraste con las zonas bajas, donde la combinación de mayores temperaturas y uso intensivo del suelo limitó su almacenamiento.

4.4. Análisis de la herramienta Lazy Regressor como predictor del COS

Con el objetivo de evaluar la capacidad predictiva de distintos algoritmos de regresión, se utilizó la herramienta Lazy Regressor para modelar el comportamiento del carbono orgánico del suelo transformado (COS-BoxCox). Este enfoque permitió comparar múltiples modelos estadísticos y valorar su desempeño en la predicción del COS, a partir de las variables numéricas consideradas en la investigación, es decir: elevación, temperatura, pendiente y humedad.

Los resultados indicaron que ningún modelo superó un coeficiente de determinación $R^2 \geq 0,20$. Esto significó que menos del 20 % de la variabilidad del COS transformado pudo explicarse mediante las variables incluidas en esta prueba. En consecuencia, los modelos evaluados no lograron capturar de manera suficiente la complejidad espacial y multifactorial del fenómeno.

Este hallazgo reforzó lo observado en los análisis previos: el comportamiento del COS no respondió a relaciones simples ni estrictamente lineales, sino a la interacción entre factores geográficos, edáficos, topográficos, climáticos y de uso de la tierra.

Por otra parte, el desarrollo de modelos no lineales más avanzados se encontró limitado en la presente investigación. Este tipo de aproximaciones requiere bases de datos más robustas, con mayor número de observaciones y variables explicativas, a fin de evitar el sobreajuste y garantizar resultados estadísticamente consistentes, condición que no se cumplió a cabalidad con el tamaño muestral disponible.

En conjunto, estos resultados confirmaron que el almacenamiento de COS en el tributario no dependió de una sola variable predictora, sino de la articulación sistémica entre uso de la tierra, propiedades del suelo, contexto geomorfológico-geológico y condiciones climáticas locales. Esta comprensión integrada fundamentó la zonificación funcional y los lineamientos de ordenamiento territorial desarrollados en el apartado siguiente.

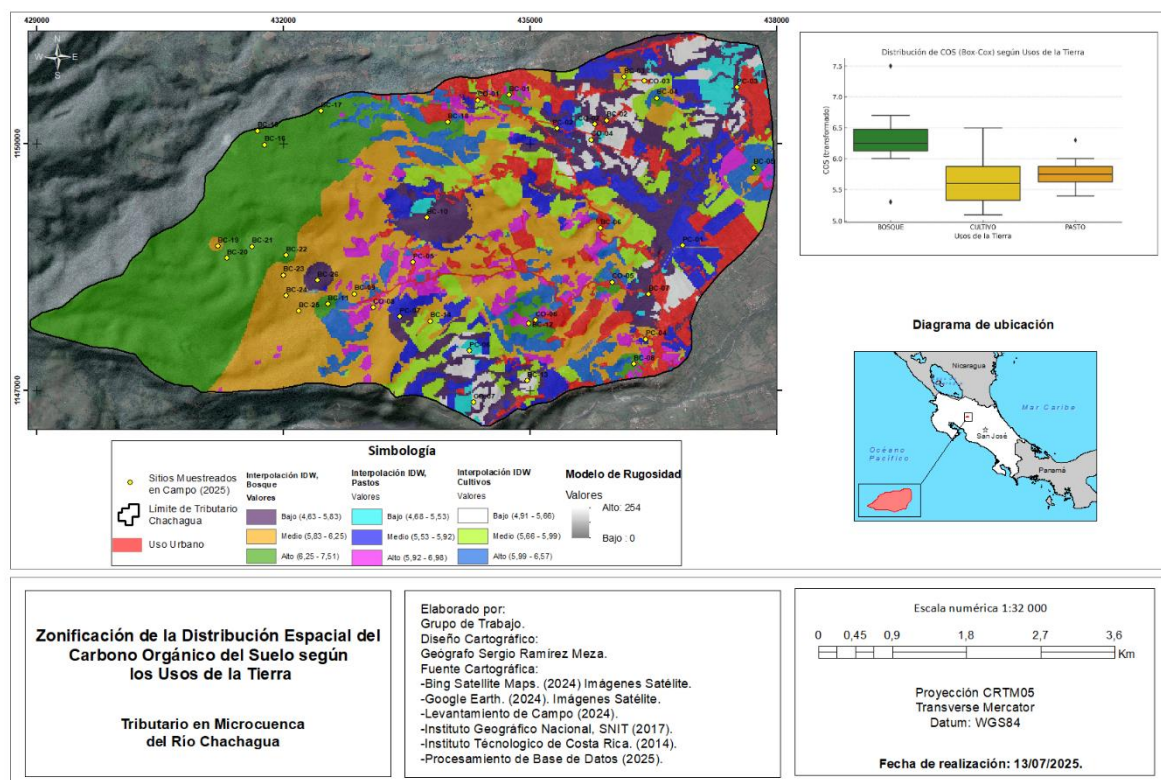
4.4.1. Zonificación y lineamientos de ordenamiento territorial del tributario

Con base en la caracterización espacial y los análisis estadísticos desarrollados en los apartados anteriores, se propuso una zonificación funcional del tributario, integrando los niveles de COS, los usos actuales de la tierra y el modelo digital de elevación (DEM), identificado como la variable numérica con mayor capacidad explicativa. Esta zonificación permitió delimitar sectores prioritarios para la conservación, restauración o manejo sostenible del recurso edáfico.

El mapa 13 mostró la distribución espacial del COS en relación con los usos de la tierra, evidenciando que las áreas de cobertura boscosa concentraron los valores más altos; mientras que los sectores agrícolas y pastos presentaron menores contenidos de COS.

Mapa 13.

Zonificación de la Distribución Espacial del COS según los Usos de la Tierra



En la zona alta del tributario confluyeron factores fundamentales para la conservación del ecosistema: principalmente su localización dentro del Área de Conservación Arenal Huetar Norte (ACAHN) y, en menor proporción hacia el sector oeste, su vínculo con el Área de Conservación Arenal–Tempisque (ACAT), además del predominio de bosque primario y secundario, así como de propiedades con manejo orientado a la conservación, tal cual el Soltis Center de Texas A&M University. Este patrón fue consistente con lo señalado por Coomes et al. (2012), quienes indicaron que los territorios bajo esquemas de conservación tienden a mantener mayores reservas de carbono debido al bajo nivel de disturbio y a la estabilidad de la cobertura vegetal. En concordancia con la hipótesis planteada en la investigación, las zonas con menor intervención antrópica mostraron mayor acumulación de COS.

En la zona media se observó mayor heterogeneidad en los usos de la tierra. Aunque coexistieron bosques secundarios, pastizales y cultivos mixtos, los niveles intermedios de COS reflejaron un equilibrio entre producción y conservación. Este comportamiento coincidió con

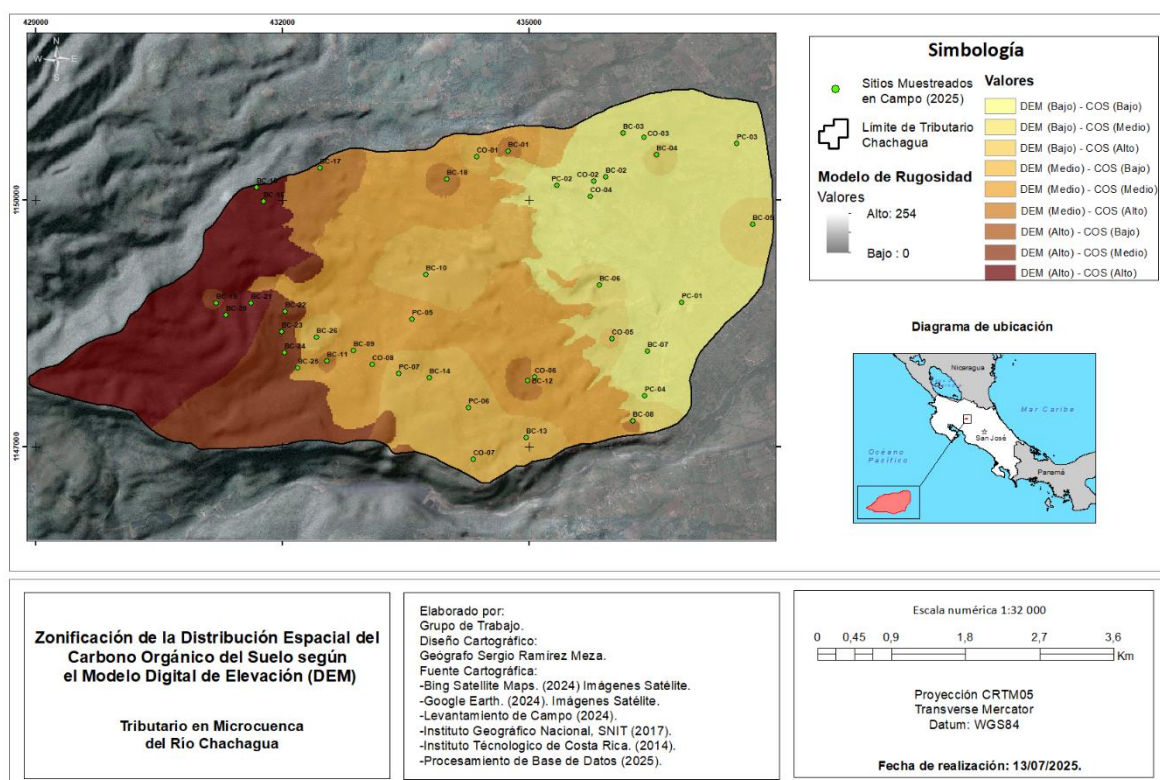
lo descrito por Brady y Weil (2016) respecto al potencial de recuperación de suelos bajo prácticas agroforestales y manejo regenerativo.

La zona baja concentró la principal mancha urbana y áreas agrícolas de mayor intervención. En estos sectores, la reducción del COS fue coherente con lo planteado en el marco teórico sobre el efecto del cambio de uso de la tierra en la pérdida de materia orgánica del suelo (Post & Kwon, 2000; Lal, 2004).

Por su parte, el Mapa 14 presentó la zonificación del COS en función de los terciles de elevación derivados del DEM.

Mapa 14.

Zonificación de la Distribución Espacial del COS según el Modelo Digital de Elevación (DEM)



El patrón espacial observado confirmó la relación positiva entre altitud y almacenamiento de carbono. Aunque el coeficiente de determinación del DEM fue moderado ($\approx 17\%$), permitió identificar gradientes altitudinales relevantes. Garten y Hanson (2006) señalaron que la disminución de temperatura con la altitud reduce la tasa de descomposición de la materia orgánica, favoreciendo su acumulación, comportamiento que se observó en los sectores altos del tributario.

A partir de la integración de variables físico-geográficas y edáficas, se definieron cuatro zonas funcionales (Tabla 9), con rangos de COS establecidos según los terciles calculados a partir de los datos de campo, laboratorio y análisis estadístico.

Tabla 9.

Zonificación del Tributario y Propuesta de Lineamientos para el Ordenamiento Territorial

Zona	Rango COS (t/ha)	Condición topográfica (Pendiente / Elevación)	Uso actual de la Tierra	Condición físico-ambiental	Lineamientos de ordenamiento territorial
Zona A	> 94,9	-Pendiente Baja (<15%). -Elevación intermedia. -Sectores de colinas denudacionales.	Bosque primario / secundario	-Alta captación de carbono, buena cobertura. -Alta humedad superficial. -Temperatura Moderada / Baja. -Geología con lavas y depósitos lateríticos.	- Conservar la cobertura boscosa. - Incentivar el pago de servicios ecosistémicos. - Fomentar un turismo sostenible. - Evitar cambio de uso de la tierra.
Zona B	68,8 – 94,9	-Pendiente Media (15–30%) -Elevación media a alta.	Bosque secundario / cultivos mixtos, pastos con árboles.	-Moderada captación de carbono, zonas con potencial productivo. -Humedad intermedia. -Temperatura variable según altitud. -Suelos con potencial de recuperación.	- Fomentar agroforestería. - Implementar agricultura regenerativa y uso sostenible del suelo. - Mantener cobertura vegetal y barreras vivas.

Zona	Rango COS (t/ha)	Condición topográfica (Pendiente / Elevación)	Uso actual de la Tierra	Condición físico-ambiental	Lineamientos de ordenamiento territorial
Zona C	≤ 68,7	<ul style="list-style-type: none"> -Pendiente Alta (>30%). -Elevación variable. -Áreas con alta escorrentía. 	Pastos degradados / cultivos intensivos.	<ul style="list-style-type: none"> -Alta vulnerabilidad, baja retención de carbono. - Baja humedad superficial. -Temperatura elevada. -Geología aluvial y suelos erosionados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Usar terrazas e incorporar criterios ecológicos de producción. - Reforestar con especies nativas. - Aplicar prácticas de manejo y conservación de suelos. - Controlar expansión agrícola. -Restaurar zonas de recarga hídrica. -Evitar cultivos degradantes.
Zona D	Variable (normalmente baja o nula)	Variable.	Urbano / periurbano	<ul style="list-style-type: none"> -Fragmentación del ecosistema. -Baja o nula acumulación de COS. - Baja cobertura vegetal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Controlar expansión urbana hacia suelos de alto valor edáfico. - Establecer zonas de amortiguamiento. - Integrar criterios de COS en la planificación territorial. -Implementar corredores verdes.

Las áreas identificadas mediante la zonificación reflejan diferencias en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS), así como variaciones en factores edáficos y físico-geográficos, como la pendiente del terreno, el orden de suelo y la cobertura vegetal, la geología, la geomorfología y las condiciones de temperatura y humedad superficial.

- **Zona A (>94,9 t/ha)**

Correspondió a sectores con baja a media pendiente, elevación intermedia a alta, colinas denudacionales y geología volcánica (lavas y depósitos lateríticos), bajo cobertura boscosa estable. Estas condiciones favorecieron la acumulación y estabilización del carbono, coherente con lo reportado por FAO (2017) para bosques tropicales con suelos conservados.

La propuesta de conservación estricta, pago por servicios ecosistémicos y prevención del cambio de uso respondió a la necesidad de mantener estos núcleos de alta eficiencia en almacenamiento de carbono.

- **Zona B (68,8-94,9 t/ha)**

Presentó pendientes medias, elevaciones intermedias y usos mixtos (bosque secundario, cultivos, pastos arbolados). Aunque el almacenamiento fue moderado, mostró potencial de recuperación bajo prácticas sostenibles. Esta zona fue considerada apta para sistemas agroforestales y agricultura regenerativa, en concordancia con la literatura sobre manejo sostenible del suelo (Brady & Weil, 2016).

- **Zona C (\leq 68,7 t/ha)**

Se caracterizó por pendientes altas, mayor escorrentía, geología aluvial y menor retención de carbono. Estas condiciones incrementaron la vulnerabilidad a la erosión y degradación, lo que coincidió con lo señalado por Lal (2004) respecto al impacto del manejo inadecuado en suelos tropicales.

Se propusieron medidas de restauración ecológica, reforestación y prácticas de conservación de suelos como estrategias prioritarias.

- **Zona D (urbano / periurbano)**

Mostró baja o nula acumulación de COS y alta fragmentación ecológica. Aunque no formó parte directa del muestreo edáfico, su influencia territorial fue importante. La integración

de criterios ambientales en la planificación urbana resultó coherente con enfoques contemporáneos de ordenamiento territorial sostenible (INEC, 2018).

En conjunto, la zonificación funcional integró variables biofísicas y socioambientales, confirmando que la distribución del COS respondió a la interacción entre altitud, uso de la tierra, tipo de suelo, geología, geomorfología y condiciones climáticas superficiales.

Estos resultados validaron las hipótesis planteadas en la investigación, con respecto a la influencia conjunta de factores físico-geográficos y antrópicos en la acumulación de carbono orgánico del suelo. Asimismo, proporcionaron una base técnica para la formulación de lineamientos de ordenamiento territorial, orientados a la conservación, restauración y uso sostenible del recurso suelo en el tributario del río Chachagua.

5. Conclusiones

La presente investigación analizó la relación entre el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) y los usos de la tierra en un tributario de la microcuenca del río Chachagua. A partir del análisis espacial y estadístico realizado, se concluyó lo siguiente:

- El bosque constituyó el uso de la tierra con mayor capacidad de almacenamiento de COS dentro del área de estudio. Esta condición se asoció a su localización en zonas de mayor altitud, menor intervención antrópica y condiciones microclimáticas favorables para la acumulación de materia orgánica.
- Los pastos presentaron un comportamiento intermedio en términos de almacenamiento de COS, evidenciando heterogeneidad interna asociada a la intensidad de uso y a los procesos de regeneración natural.
- Los cultivos mostraron los valores más bajos y mayor variabilidad en el almacenamiento de COS, esto evidenció que el tipo de cultivo y el manejo influyeron en la dinámica del carbono del suelo.
- Entre las variables numéricas analizadas, la altitud derivada del Modelo Digital de Elevación (DEM) presentó la relación estadística más consistente con el COS, seguida por la humedad superficial. La temperatura mostró una relación inversa débil, mientras que la pendiente no evidenció un efecto significativo de forma aislada.
- El almacenamiento de COS respondió mejor a la interacción entre factores geográficos, edáficos, geomorfológicos, geológicos, topográficos y de uso de la tierra, que al efecto individual de una sola variable.
- La zonificación funcional del tributario permitió diferenciar áreas con alto, medio y bajo potencial de almacenamiento de carbono, evidenciando que las zonas con cobertura boscosa y condiciones ambientales favorables concentraron los valores más elevados de COS.
- Los modelos predictivos evaluados no lograron explicar de manera robusta la variabilidad del COS a partir de las variables numéricas analizadas, esto evidenció la complejidad multicausal del fenómeno y la necesidad de abordajes integrados.

6. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, se plantean las siguientes recomendaciones orientadas a fortalecer la gestión territorial y el manejo sostenible del carbono orgánico del suelo (COS) en el tributario estudiado:

- Impulsar desde la academia, y en articulación con instituciones públicas y privadas, el desarrollo de proyectos de investigación sobre carbono orgánico del suelo, que permitan ampliar la escala de análisis, fortalecer la base de datos existente y mejorar la comprensión de la dinámica espacial del COS en el territorio.
- Fortalecer los procesos de divulgación y capacitación dirigidos a actores locales, especialmente del sector agropecuario, con el fin de promover prácticas productivas que favorezcan la conservación del suelo y el mantenimiento del carbono orgánico.
- Consolidar estrategias de conectividad ecológica en zonas de transición entre bosque y áreas productivas, mediante el establecimiento de corredores biológicos, áreas de amortiguamiento y sistemas agroforestales que reduzcan la fragmentación y favorezcan la estabilidad del COS.
- Promover incentivos orientados a la adopción de prácticas sostenibles en áreas agropecuarias y de uso mixto, priorizando zonas con potencial de recuperación y almacenamiento intermedio de carbono, más que aquellas cuya protección legal ya se encuentra garantizada.
- Implementar prácticas de conservación de suelos en zonas de alta pendiente, tales como barreras vivas, terrazas, sistemas silvopastoriles o cortinas forestales, con el propósito de reducir procesos de escorrentía, erosión y pérdida de materia orgánica.
- Incorporar los resultados de la caracterización espacial del COS como insumo técnico en instrumentos de planificación territorial, incluyendo procesos de zonificación, ordenamiento urbano y definición de áreas prioritarias para conservación o restauración.
- Establecer esquemas de monitoreo periódico del carbono orgánico del suelo mediante campañas de muestreo, integración de sensores remotos y análisis multitemporal, con el fin de evaluar la evolución del almacenamiento de COS y apoyar la toma de decisiones basada en evidencia del estudio.

7. Referencias

- Agüero, K., Castro, J. P., Hidalgo, J., & Loría, A. (2014). *La bioregión Monteverde-Arenal: Una propuesta de delimitación a partir de las cuencas y la cobertura de la tierra* [Práctica profesional supervisada, Universidad Nacional de Costa Rica]. Mapoteca de la Escuela de Ciencias Geográficas, UNA.
- Agencia Europea del Medio Ambiente. (2019). *El suelo la tierra, y el cambio climático*. En señales 2019: El cambio climático y Europa (pp. 1–7). Copenhague: Agencia Europea del Medio Ambiente. <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2019/articulos/el-suelo-la-tierra-y>
- Alarcón, J., Blanco, S., Colín, J., Cantú, C., Ceballos, G., Challenger, A., Enkerlin, E., Esquivel, R., Figueroa, F., Flores, O., Illoldi, P., Kolb, M., Koleff, P., Linaje, M., Lira, A., Maeda, P., March, I., Martínez, E., Moreno, E., Urbina, N. (2007). *Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad terrestre de México: espacios y especies*. Talleres Gráficos de México.
https://simec.conanp.gob.mx/pdf_evaluacion/terrestre.pdf
- Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, 29(1), 85-94.
- Avendaño, D., Cedeño B., y Arroyo, M. (2020). Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial. *Revista Geográfica de América Central*, (65), 63-90.
- Báez, S., & Cortizas, L. (2021). Una aproximación al manejo de cuencas hidrográficas desde el ordenamiento territorial en la Región Metropolitana de Buenos Aires. *Geograficando*, 17(2), 1-13. <https://doi.org/10.24215/2346898Xe104>
- Balvanera, P., & Cotler, H. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta Ecológica*, (84-85), 8-15. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53908502>
- Barrantes, G. (2022). Problemas conceptuales, metodológicos y epistemológicos en la metodología oficial para la consideración del ambiente en los Planes de Ordenamiento Territorial. *Revista Ambientico*, (282), 4-10.
<https://www.ambientico.una.ac.cr/revista-ambientico/problemas-conceptuales->

metodologicos-y-epistemologicos-en-la-metodologia-oficial-para-la-consideracion-del-ambiente-en-los-planes-de-ordenamiento-territorial/

- Berhe, A. A., Harte, J., Harden, J. W., & Torn, M. S. (2007). The significance of erosion-induced terrestrial carbon sink. *Global Change Biology*, 13(10), 2221–2234.
- Bertzky, M., Ravilious, C., Araujo Navas, A.L., Kapos, V., Carrión, D., Chiu, M., Dickson, B. (2011). *Carbono, biodiversidad y servicios ecosistémicos: explorando los beneficios múltiples*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Centro de Monitoreo de la Conservación Mundial. <https://www.un-redd.org/document-library/ecuador-carbono-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos-explorando-los-0>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Bonde, T. A., Christensen, B. T., & Cerri, C. C. (1992). Dynamics of soil organic matter as reflected by natural C abundance in particle size fractions of forested and cultivated Oxisols. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(3), 275–277.
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90200-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90200-9)
- Buol, S. W., (1973). *Soil genesis and classification*. North Carolina State University.
https://www.researchgate.net/publication/48377211_Soil_Genesis_and_Classification
- Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 82-96.
<https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- Carney, K. M., Hungate, B. A., Drake, B. G., & Megonigal, J. P. (2007). Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(13), 4990–4995.
- CIA, (2020). *Mapa de suelos de Costa Rica*, Centro de Investigaciones. Universidad de Costa Rica.
<http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>

- CIA, (2023). Metodología utilizada en el laboratorio de suelos y foliares. Gestoría Técnica. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica.
- Cifuentes, M., Jobse, J., Watson, V., & Kauffman, B. (2004). Determinación de carbono total en suelos de diferentes tipos de uso de tierra a lo largo de una gradiente climática en Costa Rica. *Reducciones de Emisiones por Deforestación y Degradación del Bosque y más*, 1-12. <https://reddcr.go.cr/es/determinacion-de-carbono-total-en-suelos-de-diferentes-tipos-de-uso-de-tierra-lo-largo-de-una>
- CONAFOR, (2014). Estrategia Nacional para la reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal (ENAREDD+). Comisión Nacional Forestal de México. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195978/Propuesta de Nota de Idea de la Iniciativa de Reducion de Emisiones de Mexico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195978/Propuesta_de_Nota_de_Idea_de_la_Iniciativa_de_Reducion_de_Emisiones_de_Mexico.pdf)
- Conant, R. T., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, & P. E., Bradford, M. A. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates – Synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17(11), 3392–3404. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x>
- Coomes, D. A., Holdaway, R. J., Kobe, R. K., Lines, E. R., & Allen, R. B. (2012). A general integrative framework for modelling woody biomass production and carbon sequestration rates in forests. *Journal of Ecology*, 100(1), 42–64. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01920.x>
- Crowther, T. W., Todd-Brown, K. E. O., Rowe, C. W., Wieder, W. R., Carey, J. C., Machmuller, M. B., & Bradford, M. A. (2016). Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 540 (7631), 104–108. <https://www.nature.com/articles/nature20150>
- Davis, M. R., Alves, B. J., Karlen, D. L., Kline, K. L., Galdos, M., & Abulebdeh, D. (2017). Review of soil organic carbon measurement protocols: A US and Brazil comparison and recommendation. *Sustainability*, 10(1), 1-20. <https://doi.org/10.3390/su10010053>
- Di Gregorio, A., & Jansen, L. (1998). A new concept for a land cover classification system. *The Land*, 2(1), 55-65.

https://www.academia.edu/48573534/A_new_concept_for_a_land_cover_classification_system

Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Santiago, Chile: CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6407-gestion-agua-nivel-cuencas-teoria-practica>

Duarte, J. A. M. (2007). Ordenación de las cuencas hidrográficas. Universidad Nacional de Misiones. Recuperado de https://editorial.unam.edu.ar/images/documentos_digiales/c_978-950-579-072-2.pdf

Eyherabide, M., Saínz, H., Barbieri, P., y Echeverría, H., (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en el suelo. *Asociación Argentina Ciencia del suelo*, 32(19), 13-19. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000100002

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1976). *A framework for land evaluation* (FAO Soils Bulletin No. 32). FAO.

Garten, C. T., & Hanson, P. J. (2006). Measured forest soil C stocks and estimated change are limited by sampling depth. *Geoderma*, 136(3–4), 665–674. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.04.042>

Garzón-Sánchez, H., Loaiza-Usuga, J. C., & Vélez-Upégui, J. I. (2021). Soil moisture behavior in relation to topography and land use for two Andean Colombian catchments. *Water*, 13(11), 1448. <https://doi.org/10.3390/w13111448>

Gómez, K. A., & Gómez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

González, E. (2017). El Centro Soltis para la Investigación y Educación de Texas A&M University en Costa Rica. *Ambientico*, 264(5), 33-37. <https://www.ambientico.una.ac.cr/revista-ambientico/el-centro-soltis-para-la-investigacion-y-educacion-de-texas-am-university-en-costa-rica/>

- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Grand, A., Michel, V., (2020) *Materia orgánica del suelo*. Best4 Soil. <https://orgprints.org/id/eprint/43417/7/MATERIA%20ORGA%CC%81NICA%20DE%20SUELO.pdf>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Hernández Sampieri, R., y Mendoza Torres, C. (2020). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (3.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez A., y Cerra, M. (2014). *Los páramos Andinos ¿Qué Sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. <https://portals.iucn.org/library/node/44760>
- Huamán-Carrión, M. L., Espinoza-Montes, F., Barrial-Lujan, A. I., & Ponce-Atencio, Y. (2021). Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 83-90.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172021000100083#:~:text=Conclusiones-.La%20capacidad%20de%20almacenamiento%20de%20carbono%20org%C3%A1nico%20en%20el%20suelo,de%20almacenamiento%20de%20carbono%20org%C3%A1nico.
- Hiederer, R., & Köchy, M. (2011). Global soil organic carbon estimates and the harmonized world soil database. European Commission, Joint Research Centre. <https://doi.org/10.2788/13267>
- Huggett, R. J. (2011). *Fundamentals of geomorphology* (3rd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203869343>

Huguet Villar, E. (1983). Geo-edaforología: método universal de tipología de los suelos como base de su cartografía harmónica. Barcelona: Ediciones Universidad de Barcelona.
Recuperado de

<https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/67007/7/9788491687849.pdf>

Ibrahim, M., Chacón M., Cuartas C., Naranjo, J., Ponce G., Vega, P., Casasola F., Rojas, J. (2006). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, (45), 27-36.

<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7934>

Instituto Geográfico Nacional (IGN). (2017). Hoja topográfica Fortuna, escala 1:50 000. Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), Servicios Open Geospatial Consortium. San José, Costa Rica: IGN.

https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). México ante el cambio climático: Acción climática. INECC.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), (2018). Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Crecimiento Verde. Secuestro de carbono en ecosistemas terrestres de México.

https://www.inecc.gob.mx/transparencia/transparencia/libro_blanco.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2018). *Clasificación de distritos según grado de urbanización: Metodología*. INEC. Costa Rica.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (Directriz volumen 3).

<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol3.html>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Procesos industriales y uso de productos (Directriz volumen 4).

<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol3.html>

- Jiménez, F. (2004). El manejo integrado de cuencas hidrográficas como enfoque para la gestión de los recursos naturales y el ambiente. *Revista Recursos Naturales y Ambiente*, (43), 4. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8299>
- Kloster, N., Pérez, M., y Bono, A. (2016). Análisis del carbono total, orgánico e inorgánico en suelos de la región semiárida pampeana Argentina. *Asociación Argentina Ciencia del suelo*, 34(2), 365-372. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/3825>
- Lal, R., (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂ – enrichment. *Soil Till. Res.* 43, 81-107.
[https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00036-6)
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Lark, R. M. (2012). *Statistics for soil and environmental scientists*. Oxford University Press.
- Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). *Soil Organic Carbon the Hidden Potential*. Food and Agricultural Organization of the United Nations.
https://www.researchgate.net/publication/328345849_Soil_organic_carbon_the_hidden_potential
- López, B. F. (1994). Degradación del Suelo ¿Fatalidad Climática o mala Gestión Humana? Hacia una gestión sostenible del recurso en el contexto mediterráneo. Área de la Geografía Física. Universidad de Murcia. *Papeles de Geografía*, N° 20, 1994. Págs. 49-64. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/44371>
- López, G. (2020). *Desarrollo sostenible*. Editorial Elearning, SL.
https://books.google.co.cr/books?id=ZSPvDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary&r&pli=1#v=onepage&q&f=false

Martínez, J., & Fernández, A. (2004). *Climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología.

https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/cambio_climatico_una_vision_desde_mexico_martinez_bremauntz.pdf

Martínez, E., Fuentes, J. P., y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.

<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>

Marín-Spiotta, E., Silver, W. L., Swanston, C. W., & Ostertag, R. (2009). *Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures*. *Global Change Biology*, 15(6), 1584–1597.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (1995). *Metodología para la Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras de Costa Rica*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P01-0684.pdf>

Mondragón, V. A., Moreno, F., y Jaramillo, D. F. (2022). Impacto del uso de suelo sobre el secuestro del carbono orgánico en un área natural de Medellín, Colombia. *Acta Agronómica*, 71(1), 39-46. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n1.101342>

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis* (5th ed.). John Wiley & Sons.

Moreira, A., Mirándola, P. H., Pinto, A., Salinas, E., y Oliveira, I. J. D. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 69-85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>

Moyano, F. E., Manzoni, S., & Chenu, C. (2013). Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology and Biochemistry*, 59, 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.002>

Nelson, D., & Sommers, L. (1996). Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. Chapter 34. United States.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1976). A framework for land evaluation. FAO Soils Bulletin 32. FAO.

<https://www.fao.org/3/x5310e/x5310e00.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

<https://www.fao.org/4/Y2779S/y2779s00.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). El potencial del carbono orgánico del suelo: base para la seguridad alimentaria y climática.

<https://www.fao.org/3/i6937es/i6937es.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (s.f). *Enfoque, enfrentando el desafío del desafío*.

<https://www.fao.org/3/X3810S/x3810s04.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management*. World soil reports.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/7f745787-9e3d-476c-9120-1c9ea9a8b6d7/content#:~:text=Carbon%20sequestration%20in%20agricultural%20soils%20from%20conservation%20tillage%20and%20other,by%20experience%20of%20its%20benefits>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). *Soil organic carbon: the hidden potential*. Rome, Italy: FAO.

<http://www.fao.org/3/i6937e/i6937e.pdf>

Ortiz, R. (2015). Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología. *Revista Eubacteria*, (34), 51-64.

[https://www.um.es/eubacteria/Sintesis de la evoluci%C3%B3n del conocimiento e n Edafolog%C3%ADa Eubacteria34.pdf](https://www.um.es/eubacteria/Sintesis%20de%20la%20evoluci%C3%B3n%20del%20conocimiento%20en%20Edafolog%C3%ADa%20Eubacteria34.pdf)

Osborne, J. W. (2010). Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 15(12), 1–9.

Pastor, Mogollón, J., Rivas, W., Martínez, A., Campos, Y., & Márquez, E. (2015). Carbono orgánico del suelo en un gradiente altitudinal en la Península de Paraguaná, Venezuela. *Multiciencias*, 15(3), 271-280.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90444727005>

Pimienta Prieto, J. H., De la Orden Hoz, A., & Estrada Coronado, R. M. (2018). Metodología de la investigación (1.ª ed.). Pearson Educación de México.

Pinos, N. (2016). Prospectiva del uso de suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial-Caso cantón Cuenca. *Revista ESTOA de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 5(9), 7-19.

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27512>

Pires, E., Fuini, L., Mancini, R., Neto, D. (2011). Governanca territorial. Conceito, fatos e modalidades, UNESP--IGCE, Rio Claro (SP), 192 págs.

<https://economiadoterritorio.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/11/livro-governanca-territorial.pdf>

Polzot, C. (2004). Carbon Storage in Coffee Agroecosystems of Southern Costa Rica: Potential Applications for the Clean Development Mechanism [Tesis de maestría para optar por el grado de máster en Estudios Ambientales, Universidad de York]. Repositorio York U Las nubes Project. <https://lasnubes.euc.yorku.ca/publication/carbon-storage-in-coffee-agroecosystems-of-southern-costa-rica-potential-applications-for-the-clean-development-mechanism/>

Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 6(3), 317–328.

<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>

Richters, E. J. (1995). *Manejo del uso de la tierra en América Central: hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

<https://repositorio.iica.int/handle/11324/16626>

Rojas, J., Brenes, S., & Abarca, S. (2022). Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque. *InterSedes*, 23(47), 184-205.

https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S221524582022000100184&script=sci_arttext

Rojas-Barrantes, M. (2022). Geología de la hoja 3247-i Monterrey, Alajuela, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 67, 1–29.

<https://doi.org/10.15517/rgac.v67i0.52191>

Rojas Chaves, G. (1978). Geomorfología y uso del suelo. *Revista Geográfica de América Central*, 1(7–8), 95–108.

<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2921>

Sachs, J. D. (2015). *La era del desarrollo sostenible*. Columbia University Press.

https://planetadelibroscom.cdnstatics2.com/libros_contenido_extra/31/30978_La_era_del_desarrollo_sostenible.pdf

Sánchez, D., (2016). Evaluación del carbono almacenado en la biomasa, necromasa y carbono orgánico del suelo de tres diferentes hábitats en la península de Osa [Tesis para optar al grado de Licenciatura en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal, Universidad Nacional]. Repositorio de la Universidad Nacional, Costa Rica.

<http://hdl.handle.net/11056/13491>

Serrano, D. O, González S, De la Rosa, Aguilera, Y, y Ramírez, E. (2017). Estrategia de manejo y conservación del suelo en áreas de producción agrícola. *Ingeniería Agrícola*, 7(1), 41–48.

<https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/512/513>

Sistema Nacional de Monitoreo de la Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE). (2023). *Sistema de clasificación de la cobertura y uso de la tierra para Costa Rica: versión 2.0*. (H. Acevedo & Y. Villalobos, Eds.). San José, Costa Rica.

<https://simocute.go.cr/docs>

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155–176.

<https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>

- Texas A&M Soltis Center. (2010). Capas vectoriales de microcuencas y usos de la tierra en la región de San Ramón, Costa Rica. Texas A&M University. Recuperado de <http://soltiscentercostarica.org/>
- Trinidad-Santos, A., & Velasco-Velasco, J. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad*, 9(8), 52–58.
https://www.researchgate.net/publication/315114517_Importancia_de_la_materia_org%C3%A1nica_en_el_suelo
- Trumper, K., Bertzky, M., Dickson, B., Van der Heijden, G., Jenkins, M., & Manning, P. (2009). ¿La solución natural? El papel de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático: Evaluación rápida del PNUMA. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Recuperado de http://www.unep.org/pdf/Naturalfixfinal_Spanish.pdf
- Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20666–20671.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>
- Varvel, G.E. (1994). Rotation and nitrogen fertilization effects on changes in soil carbon and nitrogen. *Agronomy & Horticulture*, (86) 319-325.
<https://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/323>
- Villareal, N. S. (2007). Metodología, estrategia y aspectos técnicos en el manejo de conservación de cuencas. *Revista Biocenosis*, 20(1-2), 147-153.
<https://revistas.uned.ac.cr/index.php/biocenosis/article/view/1313>

Anexos

Anexo 1. Estructura de la Base de Datos Generada

Tabla 10.

Ejemplo de la estructura de la base de datos generada.

Código	Uso de la Tierra	Ubicación	Fecha	Densidad Aparente (DA)	COS Tonelada por hectárea
BC-01	Bosque	Chachagua	25/7/2024	1,5	107,6
CO-01	Cultivo	Chachagua	25/7/2024	1,93	65,3
PC-05	Pasto	San Isidro	27/7/2024	1,19	94,99

Anexo 2. LSD (Least Significant Difference) de Fisher de COS (Box-Cox)

Figura 15.

Relación de COS (Box-Cox) según DEM (Z) / Altitud (LSD Fisher)

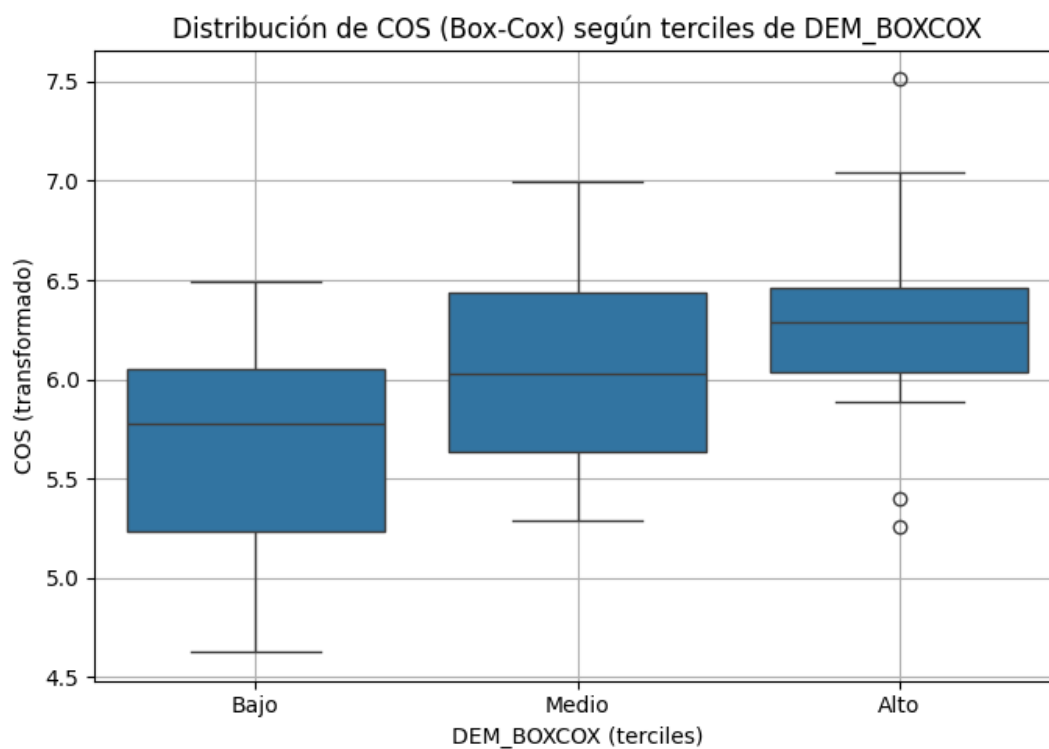


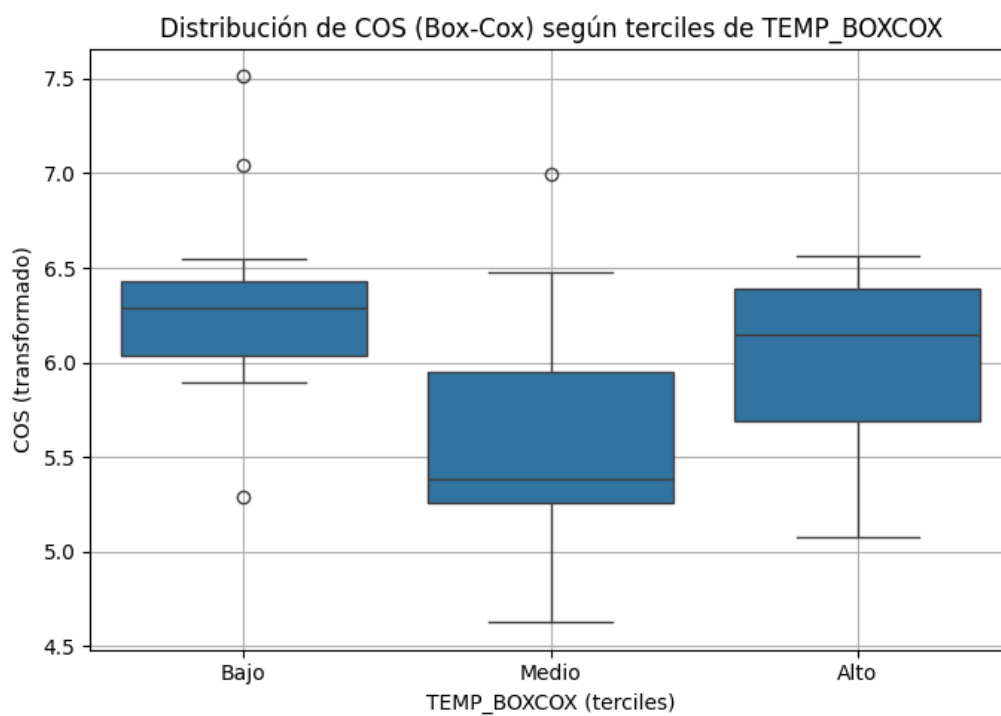
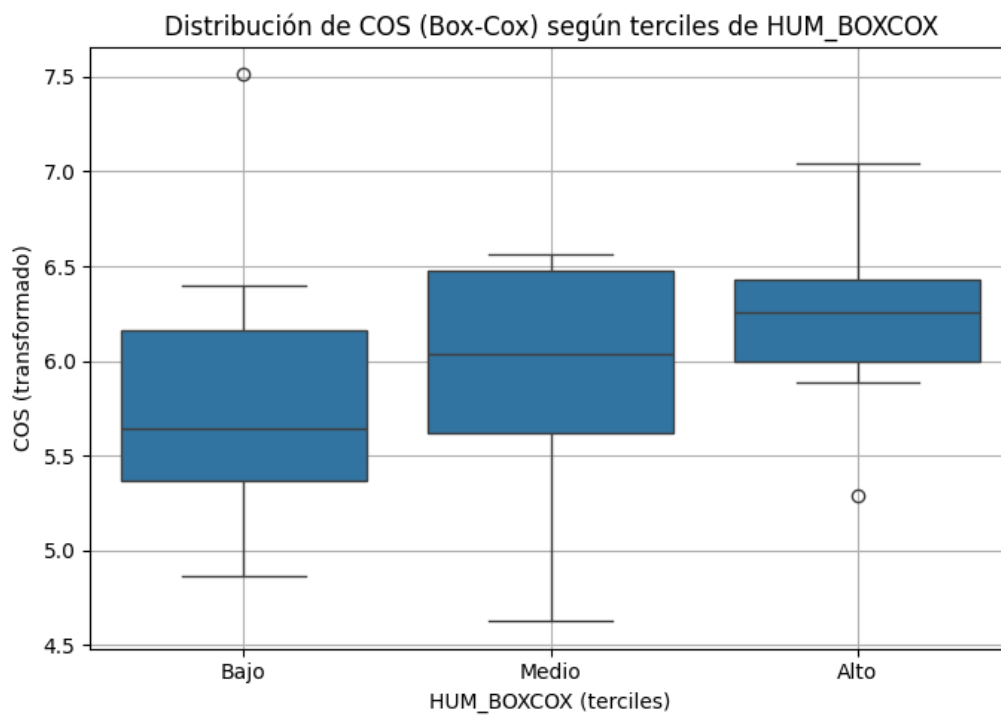
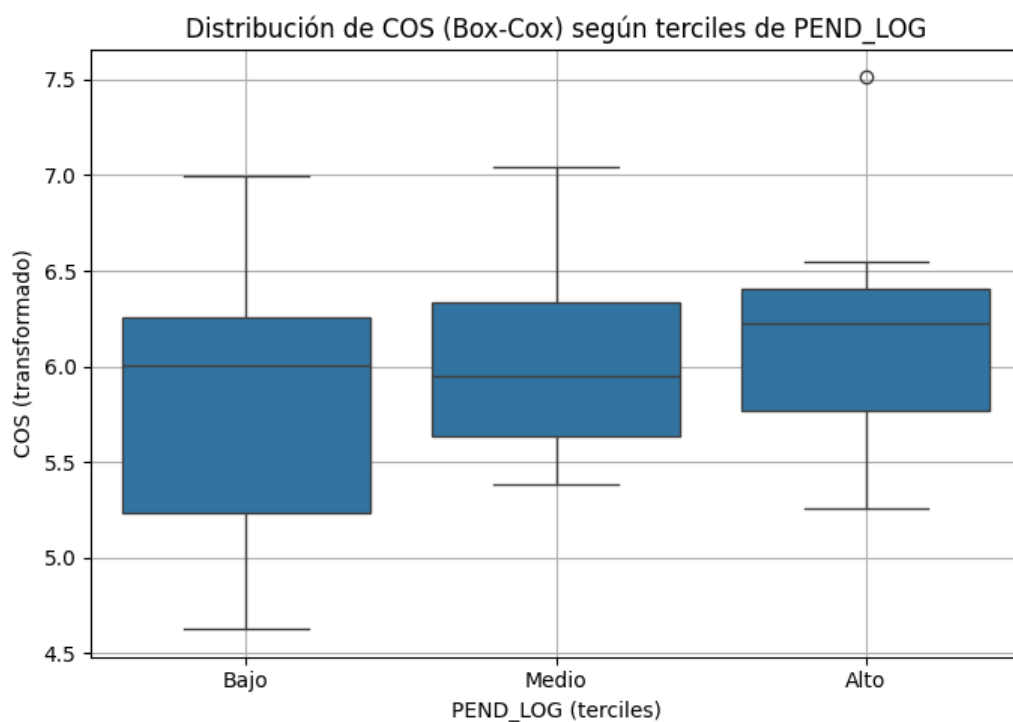
Figura 16.*Relación de COS (Box-Cox) según Temperatura (LSD Fisher)***Figura 17.***Relación de COS (Box-Cox) según Humedad (LSD Fisher)*

Figura 18.

Relación de COS (Box-Cox) según Pendiente - Log (LSD Fisher)



Anexo 3. Regresiones Lineales (Transformadas)

Figura 19.

Regresión Lineal comparativa entre COS (Original / Box-Cox) con Temperatura Superficial (Box-Cox)

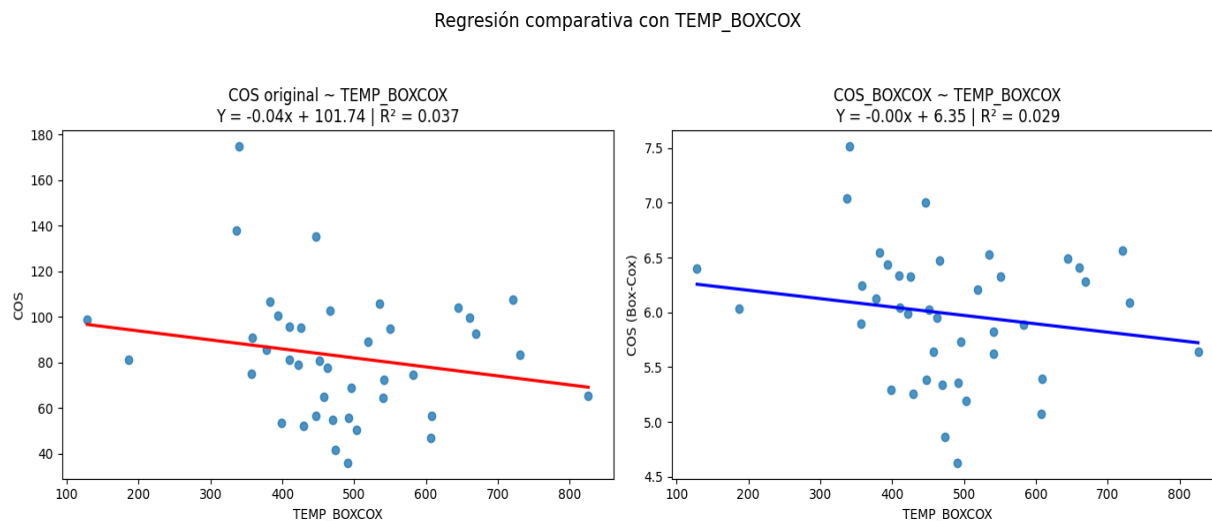
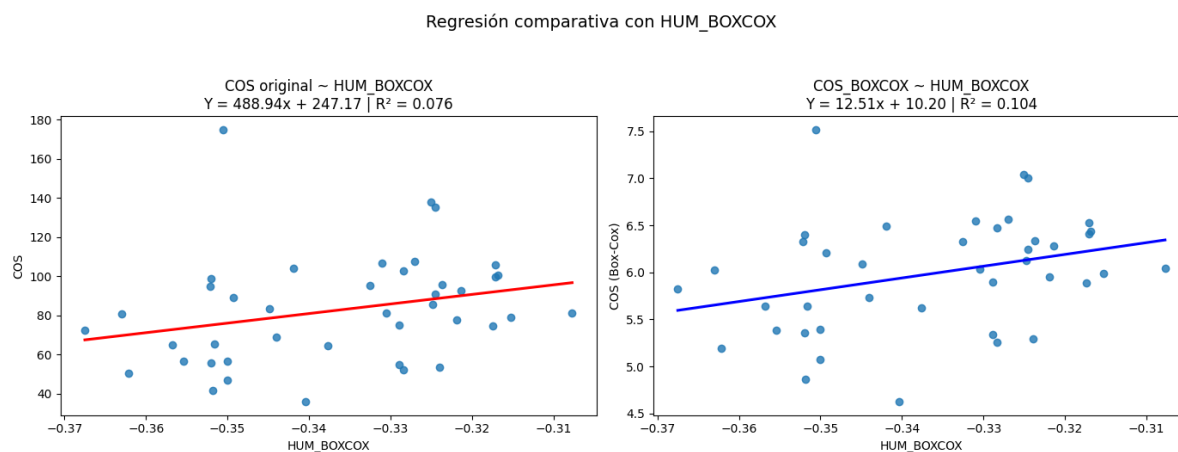


Figura 20.

Regresión Lineal comparativa entre COS (Original / Box-Cox) con Humedad Superficial (Box-Cox)

**Figura 21.**

Regresión Lineal comparativa entre COS (Original / Box-Cox) con Pendiente (Box-Cox)

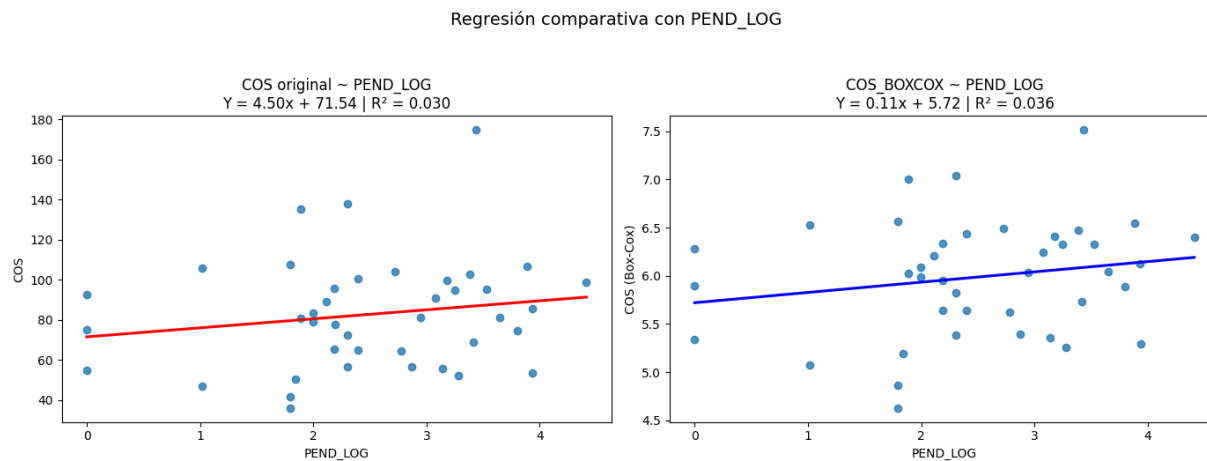
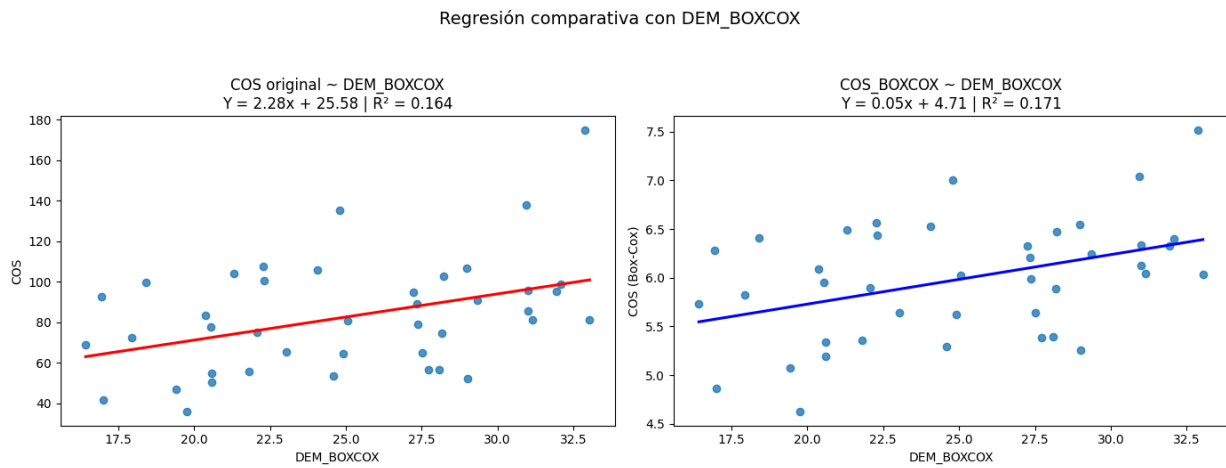


Figura 22.

Regresión Lineal comparativa entre COS (Original / Box-Cox) con DEM (Z) / Altitud (Box-Cox)



Anexo 4. Gráficos Box Plots (Original o Sin Transformar)

Figura 23

Box Plot de COS (Original / Box-Cox) según Temperatura Superficial

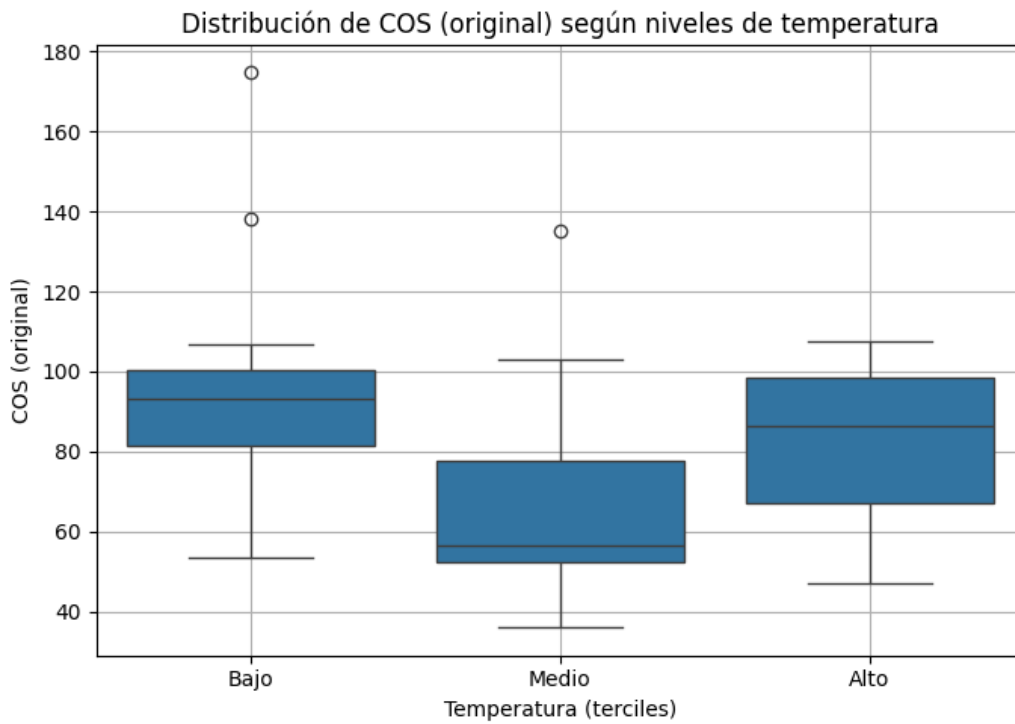
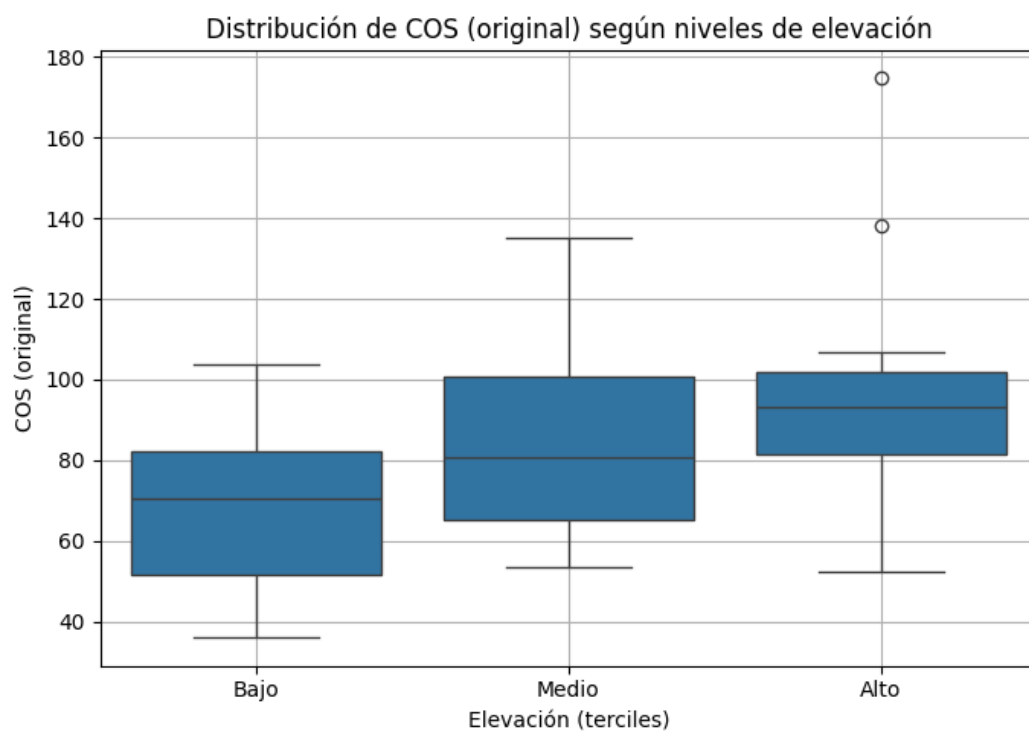


Figura 24.

Box Plot de COS (Original / Box-Cox) según DEM (Z) / Altitud

**Figura 25.**

Box Plot de COS (Original / Box-Cox) según Humedad Superficial

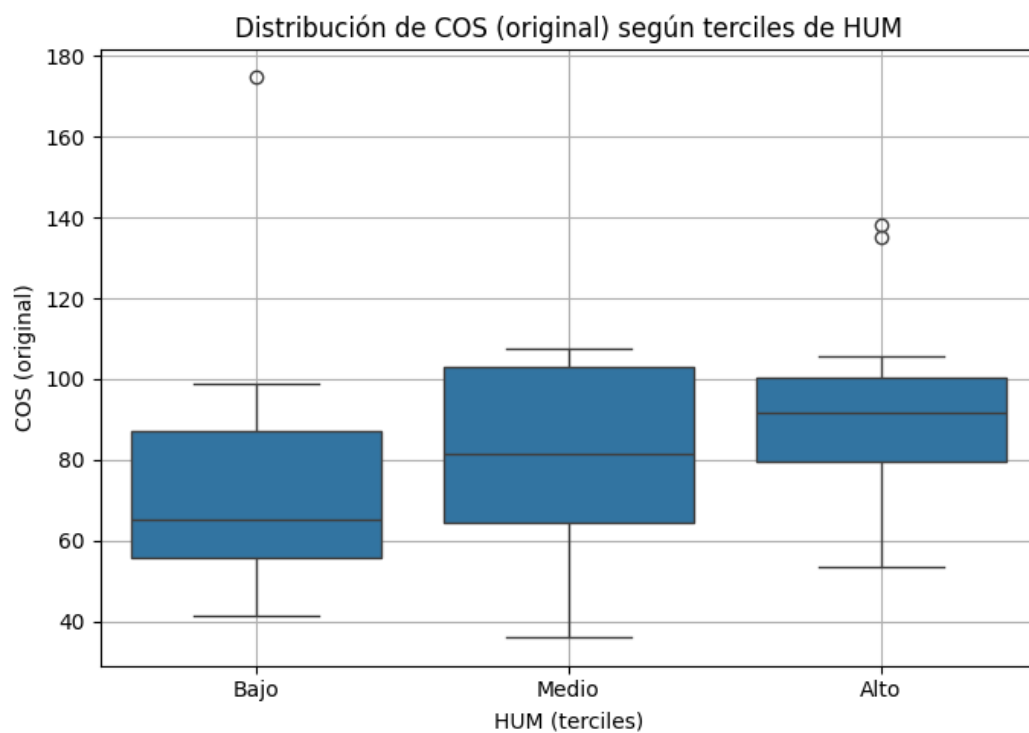


Figura 26.

Box Plot de COS (Original / Box-Cox) según Pendiente

