

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

EROSIÓN HÍDRICA INFLUIDA POR LA ESPECIE INVASORA *Sus
scrofa*, EN TRES ESTADIOS DE SUCESIÓN EN LOS BOSQUES DE
LA CUENCA DEL RÍO GENIO, PARQUE NACIONAL ISLA DEL COCO,
COSTA RICA

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA CON ÉNFASIS EN CONSERVACIÓN
Y RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS FORESTALES

LUIS CARLOS VEGA VARGAS

CARTAGO, COSTA RICA

NOVIEMBRE 2024

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

EROSIÓN HÍDRICA INFLUIDA POR LA ESPECIE INVASORA
Sus scrofa, EN TRES ESTADIOS DE SUCESIÓN EN LOS
BOSQUES DE LA CUENCA DEL RÍO GENIO, PARQUE
NACIONAL ISLA DEL COCO, COSTA RICA

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA CON ÉNFASIS EN CONSERVACIÓN
Y RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS FORESTALES

LUIS CARLOS VEGA VARGAS

CARTAGO, COSTA RICA

NOVIEMBRE 2024

EROSIÓN HÍDRICA INFLUIDA POR LA ESPECIE INVASORA *Sus scrofa*, EN TRES ESTADIOS DE SUCESIÓN EN LOS BOSQUES DE LA CUENCA DEL RÍO GENIO, PARQUE NACIONAL ISLA DEL COCO, COSTA RICA

Luis Carlos Vega Vargas¹

RESUMEN

La erosión es una de las principales amenazas para la degradación de suelos a nivel mundial, mientras que las especies exóticas invasoras representan un desafío global para la conservación. Este estudio evaluó la erosión hídrica en distintos estados de sucesión vegetal y su relación con la presencia de la especie invasora *Sus scrofa* en el Parque Nacional Isla del Coco. Se instalaron pines de erosión en diferentes etapas sucesionales del bosque y en zonas previamente hozadas, se caracterizaron las perturbaciones causadas por los cerdos y se compararon con las de su hábitat nativo. Además, se estimaron las tasas de encuentro de la especie en los distintos estados sucesionales y se calculó la pérdida de suelo mediante el modelo RUSLE. Los resultados mostraron mayor erosión en bosques tempranos perturbados, mientras que los estados intermedios tienden a acumular sedimento en áreas hozadas. Por su parte, el modelo RUSLE evidenció una tasa de erosión ligera o nula, no mayor a 10 toneladas por hectárea al año, lo que sugiere que, en condiciones naturales y sin la presencia de cerdos, la cuenca del río Genio presenta poca erosión. Las perturbaciones de los cerdos mostraron una relación positiva entre superficie y profundidad alterada, siendo los suelos de la isla más afectados en comparación con sus homólogos europeos. No se observaron patrones claros en el tamaño de las superficies afectadas según el estado sucesional, lo que se asocia con las características generalistas de la especie. La reciente eliminación de cerdos como medida de restauración en la isla parece haber disminuido las tasas de encuentro en los estados tempranos e intermedios, aunque estas siguen siendo mayores en bosques maduros, donde no hay actividad de eliminación. Este estudio sugiere que los procesos erosivos están influenciados por las perturbaciones de *Sus scrofa* y varían según el estado de sucesión vegetal,

exponiendo a esta especie como una amenaza significativa para la conservación del ambiente nativo.

Palabras clave: Sedimentación, Islas oceánicas, pines de erosión, sucesión vegetal, hozadura.



Esta obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Vega Vargas, LC. 2024. Erosión hídrica influida por la especie invasora *Sus scrofa*, en tres estadios de sucesión en los bosques de la cuenca del río Genio, Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

ABSTRACT

Erosion is one of the main threats to soil degradation worldwide, while invasive exotic species represent a global challenge for conservation. This study assessed water erosion in different stages of vegetation succession and its relationship with the presence of the invasive species *Sus scrofa* in the Isla del Coco National Park. Erosion pins were installed at different successional stages of the forest and in previously disturbed areas, where disturbances caused by pigs were characterized and compared to those in their native habitat. In addition, the encounter rates of the species across different successional stages were estimated, and soil loss was calculated using the RUSLE model. The results showed greater erosion in disturbed early-stage forests, while intermediate stages tended to accumulate sediment in disturbed areas. The RUSLE model showed light or negligible erosion rates, no greater than 10 tons per hectare per year, suggesting that, under natural conditions and in the absence of pigs, the Genio River basin experiences low erosion. Disturbances caused by pigs showed a positive correlation between the altered surface area and depth, with island soils being more affected compared to their European counterparts. No clear patterns in the size of affected areas were observed based on successional stage, which is associated with the generalist characteristics of the species. The recent removal of pigs as a restoration measure on the island appears to have decreased encounter rates in early and intermediate stages, though they remain higher in mature forests, where no removal activities have taken place. This study suggests that erosive processes are influenced by *Sus scrofa* disturbances and vary according to vegetation succession stage, highlighting this species as a significant threat to the conservation of the native environment.

Keywords: Sedimentation, oceanic islands, erosion pins, plant succession, rooting.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Luis Guillermo Acosta Vargas, Dagoberto Arias Aguilar, Ana María Monge Ortiz, Esteban Herrera Herrera y Dorian Carvajal Venegas, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal con Énfasis en Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Luis Guillermo Acosta Vargas, Dr.
Director de tesis

Dagoberto Arias Aguilar, Ph.D
Profesor lector

Ana María Monge Ortiz, M. Sc
Coordinadora Programa de Vida
Silvestre
Área de Conservación Marina Coco
Lectora

Esteban Herrera Herrera, Lic
Encargado de Investigaciones
Área de Conservación Marina Coco
Lector

Dorian Carvajal Venegas M.Sc.
Coordinador Trabajos Finales de
Graduación y lector



Luis Carlos Vega Vargas
Estudiante

DEDICATORIA

A mi padre Carlos y a mi madre Luz por ser el agua que mojaba mis raíces y me motivaba a crecer,

a mis hermanos, sobrinas y familiares que alimentaban mi deseo de aprender,

a mis amistades por ser luz de sol que motiva a florecer,

a mi abuela que a los ángeles canta ahora,

a la vida en todas sus manifestaciones,

a las aguas por dejarme surcarlas,

a la tierra por permitirme pisarla, sentirla, estudiarla y sobre todo amarla,

a la Isla más bonita del mundo por permanecer etérea en ultramar.

AGRADECIMIENTOS

Externo el agradecimiento a las personas e instituciones involucradas, al Parque Nacional Isla del Coco y su personal de guardaparques por abrirme las puertas de la Isla del Coco, a los voluntarios que viajaban hasta aquel sitio para colaborar con la naturaleza, a los investigadores que como yo buscaban respuestas para mejorar la Isla y en especial a Don Guillermo Blanco por su compromiso con la naturaleza.

Agradezco a la Escuela de Ingeniería Forestal, a profesores por ser la constante fuente de aprendizaje. A mis compañeros y compañeras principalmente quienes viajaron y durmieron muchas noches fuera de casa y aprendieron de la naturaleza junto a mí.

Al Instituto Botánico de Barcelona por brindarme un espacio para ampliar mis conocimientos y superar mis metas.

A la Fundación Amigos de la Isla del Coco por el apoyo económico en las implicaciones de la metodología.

A mi tutor Luis Acosta Vargas por sus valiosos consejos y constante guía.

A mis compañeras y compañero, Analy Montilla, Paula Rojas, Sofía Jiménez y Beñat Orbea, por su apoyo en mi investigación.

A mis lectores y lectora Esteban Herrera, Dorian Carvajal, Dagoberto Arias y Ana María Monge por sus consejos y presencia.

INDICE GENERAL

RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN.....	vii
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMEINTOS	ix
INDICE DE CUADROS	xii
INDICE DE FIGURAS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
MATERIALES Y METODOS.....	3
Área de estudio	3
Medición de erosión y sedimentación	5
Perturbación de suelo por <i>S. scrofa</i>	9
Cámaras trampa	11
Factores asociados a la Ecuación Universal de perdida de Suelo (RUSLE)	12
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
Erosión y sedimentación en distintos estados de sucesión de bosques perturbados por <i>Sus scrofa</i>	17
Relación entre profundidad y superficie del suelo en las perturbaciones de <i>S.</i> <i>scrofa</i>	21
Diferencias en el grado de perturbación en Collserola y la cuenca del rio Genio	22
Nivel de perturbación por <i>Sus scrofa</i> en los distintos estados sucesionales	24
Encuentros de <i>Sus scrofa</i> en bosques perturbados.....	29
Ecuación Universal de Perdida de Suelo (RUSLE) para la cuenca del rio Genio.	31

Influencia de la especie <i>Sus scrofa</i> en los procesos erosivos.	40
CONCLUSIONES.....	43
RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS.....	47

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores de K propuestos para diferentes porcentajes de materia orgánica y textura [29].	14
Cuadro 2. Sistema de clasificación de cobertura de SIMOCUTE.	15
Cuadro 3. Resumen estadístico de erosión y sedimentación de suelo por estado de sucesión y perturbación por S. scrofa.	17
Cuadro 4. Resumen de los resultados de la prueba de Wilcoxon para comparar perturbación por S. scrofa entre sitios.	19
Cuadro 5. Resumen de estadísticos de profundidad y superficie del suelo por acción de S. scrofa.	22
Cuadro 6. Comparación estadística de la profundidad y superficie de perturbaciones por S. scrofa en los distintos estados de sucesión (nativo y exótico)	27
Cuadro 7. Tasa de encuentro de S. scrofa en los distintos estados de sucesión del bosque.	29
Cuadro 8. Índice Modificado de Fournier y factor R de erosividad para cuenca del río Genio.	31
Cuadro 9. Valoración del factor R de erosividad.	32
Cuadro 10. Valor de K asociado a la textura y %MO para cuenca del río Genio. P= Parcela, E = estado de sucesión, 1= Temprano, 2= Medio, 3= Tardío, C= con perturbación por Sus scrofa.	33
Cuadro 11. Matriz de confusión para la validación de una clasificación supervisada, Cuenca del río Genio	38
Cuadro 12. Valor de C asociado a los tipos de cobertura de la cuenca del río Genio.	38
Cuadro 13. Erosión hídrica para cuenca del río Genio. [61]	39

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio, cuenca del río Genio, Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica.....	4
Figura 2. Parcelas de pines de erosión en la cuenca del río Genio.....	6
Figura 3. Diseño de la unidad de muestreo con pines de erosión.....	7
Figura 4. Transectos en el Parque Natural Collserola y la cuenca del río Genio. ...	9
Figura 5. Gráfico de “boxplots” para sedimentación y erosión (g/cm^3) en tres estados de sucesión del bosque.	18
Figura 6. Gráficos “boxplot” de profundidad y superficie por perturbación de <i>S. scrofa</i> en el Parque Natural Collserola y la cuenca del río Genio, Isla del Coco...	23
Figura 7. Gráficos de “boxplot” para la profundidad del suelo (cm) en la perturbación de <i>S. scrofa</i>	25
Figura 8. Gráficos de “boxplot” para la superficie del suelo (m^2) en la perturbación de <i>S. scrofa</i>	26
Figura 9. Factor R (Ton/MJ mm) asociado a la cuenca del Río Genio.....	34
Figura 10. Factor L asociado para la cuenca del río Genio.	35
Figura 11. Factor S asociado a la cuenca del río Genio.	36
Figura 12. Clasificación supervisada a partir de una imagen Sentinel-2A, para la cuenca del río Genio.	37
Figura 13. RUSLE para la cuenca del río Genio, Parque Nacional Isla del Coco.	39

INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo es un fenómeno global afectando el 80% de los suelos a nivel mundial. La erosión es un tipo de degradación y actualmente representa una de las principales amenazas para la conservación de los ecosistemas [1] [2]. Entre las diversas formas de degradación, la erosión hídrica se reconoce como la más significativa. Aunque es un proceso natural, puede verse exacerbado por factores externos como el cambio climático, que altera los patrones de precipitación, así como por la acción humana directa, incluyendo el cambio de uso del suelo o la presencia de animales exóticos invasores [3].

Los ecosistemas de las islas oceánicas, como la Isla del Coco, suelen ser vulnerables a los impactos generados por las especies introducidas debido a la acción evolutiva que ha moldeado a las especies, generando, en algunos casos, cambios morfológicos y conductuales que las hacen excepcionalmente susceptibles a la invasión de depredadores y a factores ambientales [4]. El cerdo salvaje (*Sus scrofa*, Linnaeus, 1758) es considerada una de las especies invasoras más destructivas a nivel mundial según la UICN, debido a su dieta generalista, la falta de depredadores naturales y su alta tasa reproductiva [5]. Su presencia provoca efectos adversos significativos en los ecosistemas donde se distribuye [6]. En la Isla del Coco, se evidenció que los cerdos escarbaron entre el 11,9% y el 18,8% de la superficie de la isla, y el contenido estomacal de estos animales estaba compuesto mayoritariamente por plantas y frutos [7] [8].

En el contexto en que *S. scrofa* es considerada una especie exótica invasora, se ha constatado que la mayor parte de su dieta se compone de materia vegetal, predominantemente, de especies autóctonas [9] [10]. Además, la actividad de los cerdos inhibe la regeneración natural y elimina los primeros estadios vegetales, lo que contribuye a la erosión, especialmente en estados de sucesión tempranos, donde se observa la mayor cantidad de erosión [11]. En contraste, los sitios en estados de sucesión avanzados presentan un menor riesgo de erosión [1].

Por consiguiente, la convergencia de la singularidad insular oceánica con altos grados de endemismo y la presencia de especies exóticas invasoras como *S. scrofa*, resalta la importancia de comprender cómo los suelos en diferentes etapas de sucesión responden a esta combinación de factores. En este contexto, nace la interrogante de saber cuáles etapas de la sucesión ecológica son más susceptibles a la erosión en la cuenca del río Genio en la Isla del Coco, y cómo pueden los cerdos relacionarse con estos procesos erosivos. De esta manera, se planteó como objetivo principal evaluar la erosión hídrica en diversos estados de sucesión vegetal y su posible relación con la presencia de la especie invasora *S. scrofa*, para contribuir con la toma de decisiones de conservación de la cuenca del río Genio en el Parque Nacional Isla del Coco.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el Parque Nacional Isla del Coco (PNIC), isla oceánica del Pacífico Oriental Tropical costarricense ($5^{\circ}30'06''$ - $5^{\circ}33'26''$ N, $87^{\circ}01'47''$ - $87^{\circ}05'46''$ O; Figura 1), con una extensión aproximada de 24 km² [12]. La topografía de la isla es irregular, con altitudes que varían desde el nivel del mar hasta 575,5 msnm. La zona de vida de la isla es bosque pluvial premontano transición a basal, caracterizada por precipitaciones anuales de entre 4500 y 6000 mm, y una temperatura media de 25,5 °C. Las precipitaciones disminuyen entre enero y marzo, y aumentan de abril a diciembre debido a la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Estas condiciones promueven un exuberante bosque húmedo tropical. En la isla se han identificado 25 cuencas hidrográficas, destacando la cuenca del río Chatham, la cuenca del río Yglesias y la cuenca del río Genio, siendo esta última la más extensa con 3,2 km² y sitio de estudio [8] [12] [13] [14].

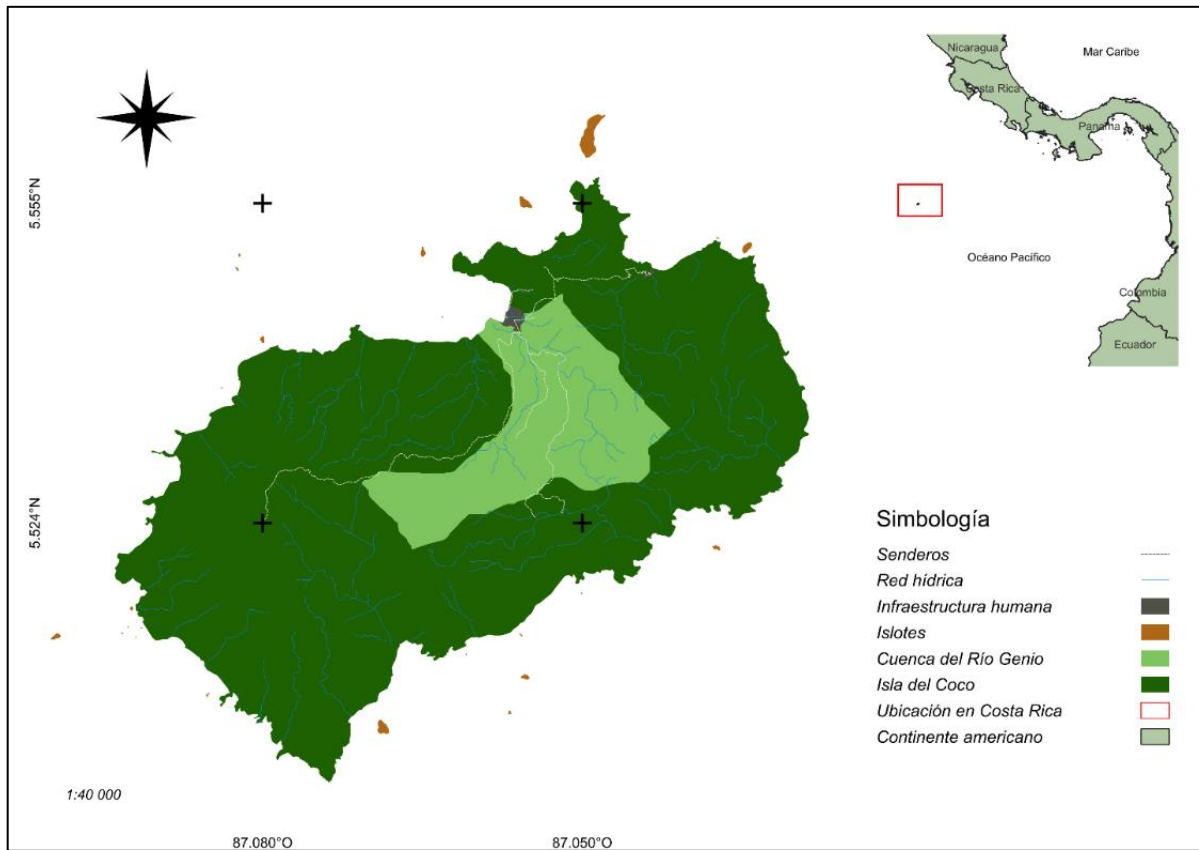


Figura 1. Área de estudio, cuenca del río Genio, Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica.

La flora de la isla incluye 296 especies de plantas vasculares distribuidas en 199 géneros y 82 familias. De estas, 219 son nativas, con 48 especies endémicas y 77 introducidas. Las plantas nativas comprenden 117 angiospermas, 96 helechos y 6 licófitos [15]. En cuanto a la fauna, se han registrado 162 especies de aves, de las cuales 14 son residentes, incluyendo tres especies endémicas. La isla alberga dos especies de reptiles terrestres endémicos. Aunque no posee mamíferos autóctonos, se han introducido seis especies mediante actividades humanas: ratas (*Rattus rattus* Linnaeus, 1758 y *Rattus norvegicus* Berkenhout, 1769), cerdos (*S. scrofa*), gatos (*Felis catus* Linnaeus, 1758), cabras (*Capra hircus* Linnaeus, 1758; extintas) y venados cola blanca (*Odocoileus virginianus* Zimmermann, 1780) [16].

Medición de erosión y sedimentación

El muestreo se desarrolló mediante un método sistemático, se realizó un recorrido por la cuenca del río Genio para identificar los tres diferentes estados sucesionales del bosque a evaluar. El estado sucesional temprano se definió por la dominancia de hierbas y arbustos, mientras que el estado sucesional medio se caracterizó por la presencia de árboles pioneros o especies heliófitas efímeras. Finalmente, el estado sucesional tardío estuvo compuesto por especies heliófitas de mayor longevidad y especies esciófitas [17].

Se buscaron evidencias de perturbación por la especie invasora *S. scrofa* en los distintos estados sucesionales (temprano, medio y tardío). Los sitios afectados presentaban hozaderos con suelos removidos entre 5 y 10 cm de profundidad, además de huellas, excretas y rascaderos, indicando la presencia de estos animales. Cabe destacar que, los efectos de la perturbación se vuelven indistinguibles 20 días después de la actividad [8] [18].

Se establecieron cinco parcelas en cada estado sucesional (15 en total), de las cuales una en cada estado fue ubicada en un área identificada como perturbada por la presencia de cerdos (Figura 2).

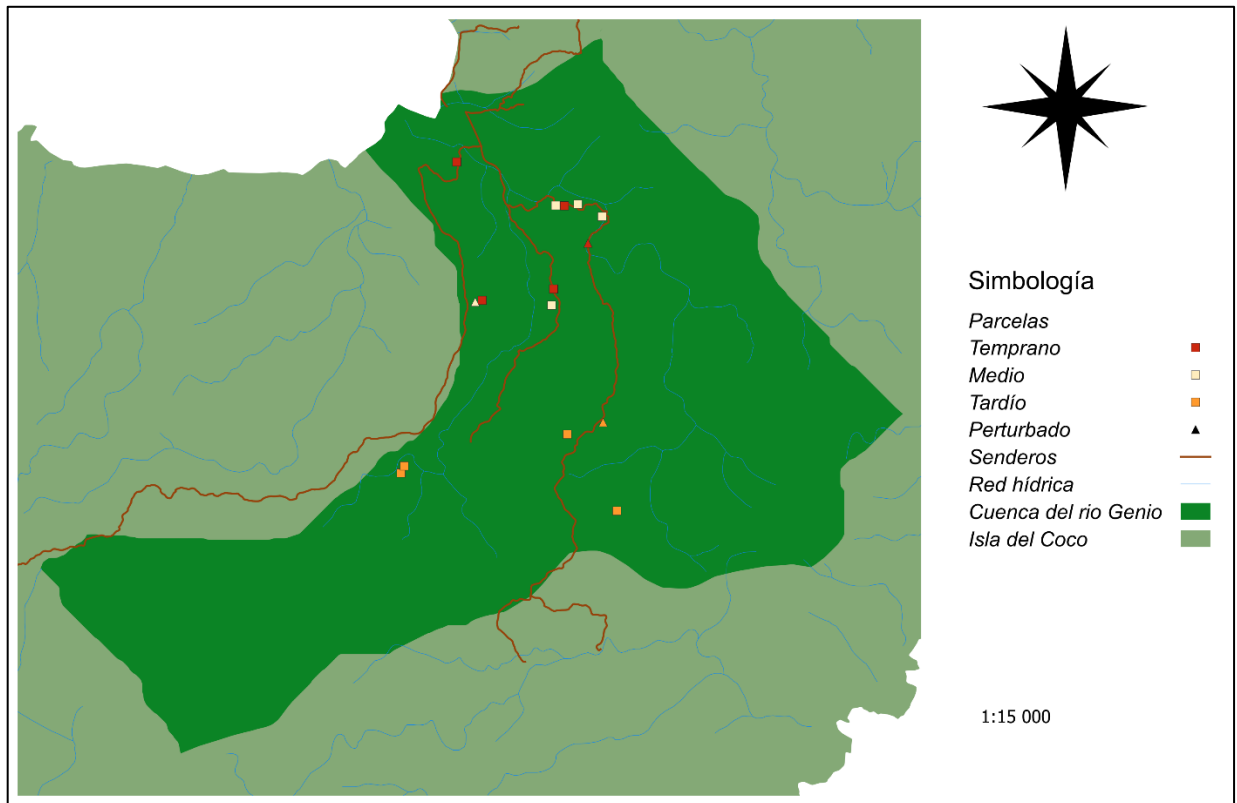


Figura 2. Parcelas de pinos de erosión en la cuenca del río Genio.

En cada parcela, se colocaron 41 pinos para cuantificar la erosión o sedimentación, excepto una parcela que, debido a las condiciones del suelo, solo se equipó con 39 pinos, sumando un total de 613 pinos en el diseño inicial. Los pinos fueron distribuidos espacialmente en cada parcela a una distancia de 20 x 15 cm, formando una malla triangular, y dejando de manera estándar 10 cm o 16 cm sobre el nivel del suelo cada pin, dependiendo de la profundidad del suelo donde se colocó la parcela para determinar la erosión o sedimentación en cada pin. Esta distribución permitió asignar a cada pin un área útil (A), calculada mediante la fórmula básica de un triángulo [19]. Los pinos fueron instalados el 28 de junio de 2024 y se realizó una segunda medición el 21 septiembre del mismo año.

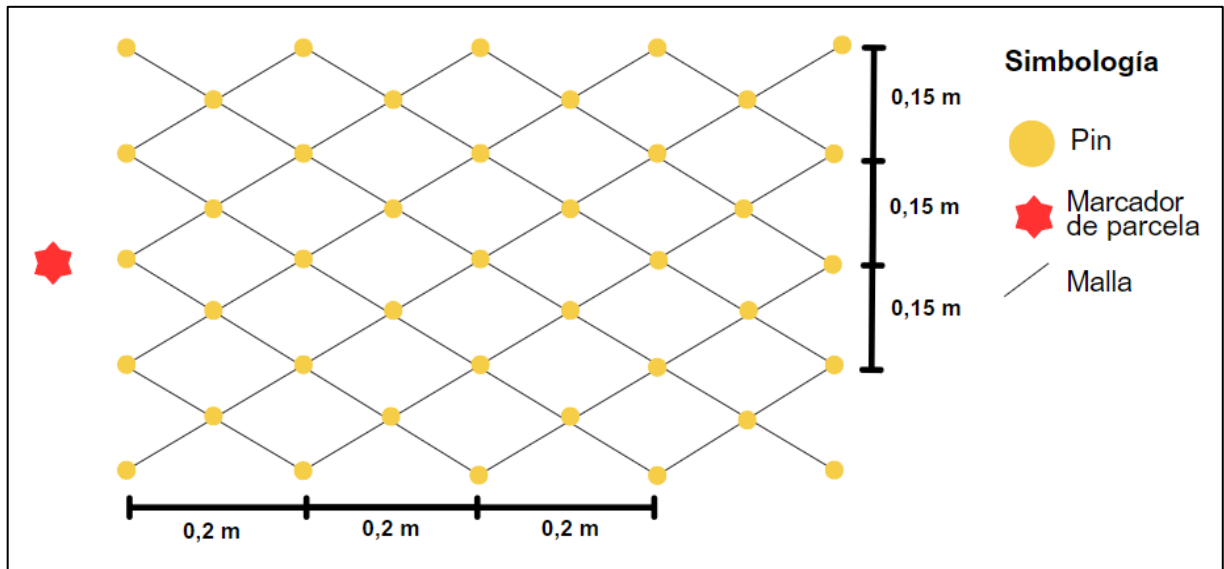


Figura 3. Diseño de la unidad de muestreo con pines de erosión.

Además, de la colocación de los pines, se realizaron muestreos de suelo por triplicado utilizando el método del cilindro para determinar la densidad del suelo [20]. Se emplearon cilindros metálicos con una altura de 4,8 cm y un radio de 2,05 cm, cuyas dimensiones permitieron calcular su volumen en centímetros cúbicos (V). Para tomar la muestra los cilindros fueron introducidos con un mazo, teniendo el cuidado de no compactar el suelo, posteriormente, cada cilindro fue sacado con la ayuda de una cuchilla, misma que se utilizó para cortar al ras de los cilindros. Por disponibilidad de cilindros, cada muestra fue extraída del cilindro y colocadas en bolsas por separado para ser llevadas al laboratorio. Una vez en el laboratorio, las muestras se secaron al aire para luego ser secadas en un horno a 105 grados Celsius para determinar su masa en gramos (m). Con el volumen (V) de los cilindros y la masa (m) de las muestras, fue posible calcular la densidad (D) mediante la ecuación 1. Las muestras en triplicado por parcela permitieron crear un promedio de la densidad de cada parcela.

$$D \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{m (g)}{V (cm^3)} \quad 1$$

Donde:

D = densidad del suelo (g/cm³);

M = masa del suelo dentro del cilindro después de dos días en el horno a 105 C°(g);

V = volumen del cilindro (cm³).

Con el área útil (A) de cada pin, la diferencia entre la primera y la segunda medición (R) de los pines y la densidad promedio por parcela (D), se calculó la pérdida de suelo (P) en gramos entre centímetros cúbicos para cada pin como muestra la ecuación 2.

$$P \left(\frac{g}{cm^3} \right) = A(cm^2) \cdot R (cm) \cdot D \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad 2$$

Donde:

P= Pérdida de suelo (g/cm³);

A= área de influencia de cada pin (cm²);

R= diferencia entre la primera y segunda medición del pin (cm)

D= densidad del suelo (g/cm³).

Una vez aplicada la ecuación 2, los datos fueron sistematizados en Microsoft Excel y posteriormente exportados al programa R (versión 4.4.1) y RStudio. En este entorno, los datos se organizaron en dos grupos: valores positivos (Sedimentación) y valores negativos (Erosión). A su vez se clasificó según su estado de perturbación, si la parcela provenía de un sitio perturbado por *S. scrofa* o no, y finalmente se categorizó según el estado sucesional: temprano (E1), medio (E2) y tardío (E3).

Con esta clasificación, se generaron gráficos de tipo "boxplot" para visualizar el comportamiento de los datos. Además, se calcularon los principales estadísticos descriptivos para cada grupo, incluyendo tamaño de la muestra (N), promedio,

mediana, desviación estándar y rango intercuartílico (IQR). Se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk a cada grupo para verificar la normalidad en la distribución de los datos.

Finalmente, se realizó una prueba no paramétrica de Wilcoxon (Mann-Whitney U) para determinar si existían diferencias significativas entre los sitios en diferentes estados sucesionales, con y sin perturbación.

Perturbación de suelo por *S. scrofa*

El muestreo de las áreas perturbadas se llevó a cabo en dos localidades: La cuenca del río Genio en el PNIC (Trópico), que se constituyó como el área principal de este estudio, y el bosque mediterráneo de Collserola, ubicado en Barcelona, Catalunya, España (Figura 3). Se utilizó un muestreo sistemático utilizando transectos que se establecieron a lo largo de los senderos existentes dentro de la cuenca del río Genio y en el Parque Natural de Collserola.

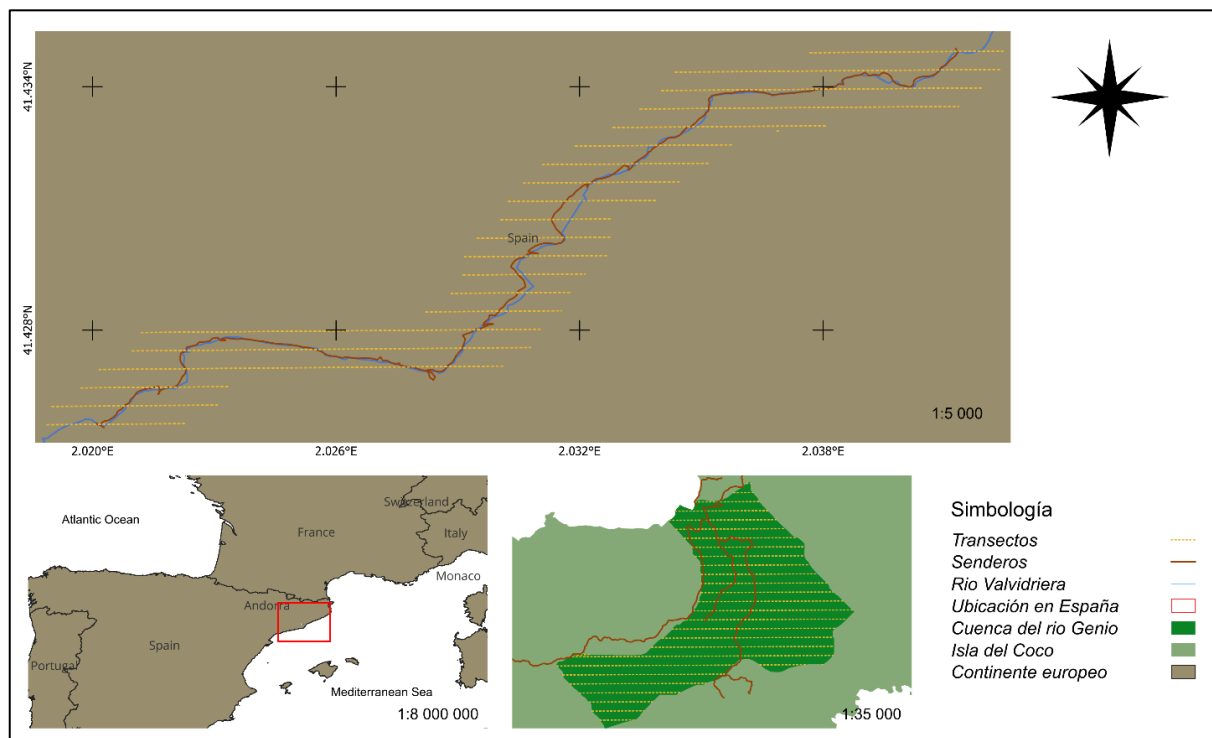


Figura 4. Transectos en el Parque Natural Collserola y la cuenca del río Genio.

En la cuenca del río Genio, se establecieron transectos cada 100 metros, orientados de este a oeste, utilizando la herramienta QGIS para su planificación. La visualización

en campo se llevó a cabo mediante la aplicación AvenzaMaps, disponible para dispositivos móviles. Esta metodología permitió aprovechar la configuración de los senderos existentes, que en su mayoría se orientan de norte a sur. Como resultado, la mayoría de los transectos creados quedaron perpendiculares al sendero principal, lo que facilitó la cobertura de una mayor área de la cuenca. Es importante destacar que, las distancias entre los transectos presentaron variaciones debido a la irregular topografía y las limitaciones de acceso a los diferentes sitios dentro de la cuenca del río Genio.

Se aplicó una metodología similar en el Parque Natural de Collserola, con la diferencia en la frecuencia de los transectos, los cuales fueron establecidos cada 50 metros. En cada transecto, se recorrió una distancia total de 200 metros, distribuyéndose 100 metros hacia el este y 100 metros hacia el oeste del sendero como punto central. Esta estrategia se adoptó debido a que el sendero utilizado en esta área era paralelo a la Riera de Vallvidrera, un pequeño río que atraviesa el bosque, caracterizado por la presencia de bosques secundarios y alta humedad. Sin embargo, la irregularidad de la topografía y la densa vegetación en algunas secciones limitaron la posibilidad de completar todos los transectos planificados.

Una vez ubicado el transecto, se llevó a cabo un recorrido para identificar áreas perturbadas. Esta identificación se basó en un reconocimiento visual en el que se buscaron signos característicos de perturbación, como suelo volteado, escarbaderos, zonas de rascaduras donde los cerdos se frotan y evidencias en la vegetación circundante, tales como plántulas mordidas o cortadas, semillas digeridas o destruidas, raíces expuestas y la presencia de excrementos [8] [18] [21] [22].

Identificados los sitios perturbados, se procedió a medir el largo, ancho y la profundidad del área afectada. Además, se llevó a cabo una evaluación detallada de la perturbación, registrando el tipo específico de perturbación observada, como áreas de rascadero o signos de hozadura. También, se registró si el sitio de perturbación se encontraba sobre el sendero principal o sobre los transectos. Cada área donde se encontró perturbación se clasificó según su estado sucesional [17]. Metodologías

similares utilizando transectos fueron aplicadas por distintos autores tanto para evaluar poblaciones de plantas y animales [8] [23] [24] [25].

A partir de las mediciones de largo (cm) y ancho (cm), se calculó la superficie (m²) de cada hozadura utilizando la fórmula $ab\pi$ asumiendo que cada hozadura tiene forma elíptica, tal como se observó en el campo y se reporta en la literatura [26].

El análisis de datos se utilizó mediante el programa R (versión 4.4.1) y RStudio. Se hizo un análisis de regresión simple para las variables de profundidad y superficie perturbada. Se evaluó la significancia estadística del modelo a través de los valores p , y se reportó el coeficiente de determinación (R^2). A manera de comparativa se calcularon los estadísticos principales tamaño de la muestra (N), mínimo (min), máximo (max) el promedio. Se crearon “*boxplot*” para los datos de profundidad (cm) y superficie (m²) de las perturbaciones del suelo hechas por los cerdos en la cuenca del río Genio (Trópico) con respecto a las tomadas en Collserola (Mediterráneo); así como para la profundidad (cm) y superficie (m²), según el estado sucesional del bosque secundario (temprano, medio y tardío), así como su ubicación (cuenca del río Genio o Collserola) creando cuatro categorías: BS Tropical temprano, BS Tropical medio, BS Tropical tardío y BS Mediterráneo medio. A cada conjunto de datos se le aplicaron pruebas de Shapiro-Wilks para corroborar la normalidad los datos, y la prueba de Wilcoxon (Mann-Whitney U test) para determinar si hay diferencias significativas.

Cámaras trampa

En la cuenca del río Genio se colocaron nueve cámaras trampa de manera sistemática en los tres estados de sucesión del bosque. Tres cámaras fueron colocadas en el estado de sucesión temprano, con una de estas en dirección a la parcela perturbada (P5-E1). De igual manera tres en el estado de sucesión medio, con una cámara cercana a la parcela perturbada (P5-E2) y tres cámaras en el estado tardío con una de ellas en dirección a la parcela (P5-E3). Cada cámara estaba configurada de la misma manera. Tomando fotografías durante 65 días (del 9 de julio al 12 de setiembre del 2024).

Una vez recuperadas las cámaras, las fotos fueron procesadas. Se consideró como un evento cuando una foto mostraba un cerdo y había una diferencia de al menos 10 minutos respecto a la foto anterior, siempre que no fueran parte de la misma secuencia. Si en una misma foto aparecían varios individuos, cada uno fue contado como un evento separado.

Para calcular la tasa de encuentro por 100 días, se empleó el esfuerzo de muestreo (65 días de actividad por cámara) junto con el número de eventos por cámara, y se estandarizó a 100 días mediante la siguiente ecuación 3.

$$Tasa\ de\ encuentro = \left(\frac{Número\ de\ eventos}{Esfuerzo\ de\ muestreo} \right) \times 100 \quad 3$$

Factores asociados a la Ecuación Universal de pérdida de Suelo (RUSLE)

Se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) mediante los softwares QGIS (versión 3.34.2) y ArcGIS (10.3). La ecuación, compuesta por diferentes factores independientes para obtener el nivel de erosión en Ton/ha/año, se calculó con información obtenida por distintos métodos.

Factor R erosividad:

Representa la erosividad de las precipitaciones, se calculó a partir de los datos meteorológicos de la estación ubicada en la base de guardaparques Wafer, en la cuenca del río Genio. Con esta información, se estimaron la precipitación media mensual (p) y la precipitación media anual (P), las cuales permitieron obtener el Índice Modificado de Fournier (IMF). Otros autores han usado el valor de IMF como el valor de R por lo tanto en la ecuación 4 se muestra el proceso para obtener el valor de R, este valor fue calculado tres veces para los tres años en los que había registros completos de la estación meteorológica y como valor final se utilizó el promedio resultante de esos tres registros [27]. Estos valores fueron asociados a cada píxel de una capa raster.

$$R = IMF = \left(\frac{\sum p^2}{P} \right) \quad 4$$

Donde:

R = Factor erosividad (MJ mm /ha h);

IMF = Índice Modificado de Fournier (*IMF*);

p = precipitación media mensual en mm;

P = precipitación media anual en mm.

Factor K erodabilidad: Relacionado con la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, se calculó a partir de las propiedades del suelo, específicamente el porcentaje de materia orgánica y la textura. La materia orgánica se determinó mediante análisis realizados en el Laboratorio de Análisis Agronómico del Instituto Tecnológico de Costa Rica, utilizando un total de 15 muestras de suelo recolectadas en las parcelas destinadas al estudio de erosión (Figura 2). La textura del suelo, por su parte, se identificó mediante el método organoléptico, que combina el tacto y la observación, siguiendo la metodología establecida para este fin [28]. Para esto, se tomaron otras 15 muestras cercanas a las parcelas de pines de erosión (Figura 2).

Con los valores obtenidos de materia orgánica y textura, se asignó a cada punto un valor de K según es propuesto en la literatura [29] (Cuadro 1), posteriormente el valor asignado de K fue utilizado para generar una interpolación en QGIS. Esta interpolación, basada en los puntos georreferenciados de las muestras, permitió crear una capa raster que representa la distribución espacial del factor K .

Cuadro 1. Valores de *K* propuestos para diferentes porcentajes de materia orgánica y textura [29].

Textura del suelo	Porcentaje de materia orgánica		
	<0,5%	2%	>4%
Arcilla	0,017	0,038	----
Arcilla arenosa	0,018	0,017	0,016
Arcilla limosa	0,033	0,030	0,025
Arena fina	0,0021	0,018	0,013
Arena fina franca	0,032	0,026	0,021
Arena franca	0,016	0,013	0,011
Arena muy fina franca	0,058	0,050	0,040
Franco (graba)	0,050	0,045	0,038
Franco arcillo-lomoso	0,049	0,042	0,034
Franco arenoso fino	0,046	0,040	0,032
Franco arenoso muy fino	0,064	0,054	0,043
Franco limoso	0,063	0,055	0,043
Limoso	0,079	0,068	0,055

Factor *LS* pendiente:

Para el cálculo del factor *L* de la ecuación RUSLE, se utilizó un Modelo de Elevación Digital (MED). A partir de este, se realizó un llenado de depresiones con la herramienta y “*r.fill.dir*” de QGIS. Además, se calculó la pendiente en grados mediante la herramienta “*r.slope.aspect*” de QGIS. Posteriormente, se estimaron los factores intermedios *F* y *m* utilizando expresiones en la calculadora ráster. Finalmente, el factor *L* se obtuvo mediante la fórmula modificada para SIG, que incorpora la acumulación de flujos generada con la herramienta “*Hydrology*” de ArcGIS versión 10.3 y los valores calculados de *m*.

El factor *S*, correspondiente a la inclinación de la pendiente, se calculó directamente a partir de la capa de pendientes en grados, empleando una expresión condicional en la calculadora ráster. Los resultados permitieron generar una capa rasterizada del factor *S* para toda el área de estudio.

Factor C cobertura:

Debido a la ausencia de un mapa o capas de cobertura del suelo para la cuenca del río Genio, se recolectaron una serie de puntos georreferenciados a los cuales se asignó una categoría de cobertura. Esta clasificación se realizó utilizando como referencia el Sistema de Clasificación de Uso y Cobertura de la Tierra propuesto por el Sistema Nacional de Monitoreo de Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE) [30]. Sin embargo, debido a las particularidades de la Isla del Coco, fue necesario realizar ajustes en algunas categorías, específicamente en la de ganadería y pastos (3000). En la isla no existe actividad ganadera, y los pastos naturales, en la mayoría de los casos, están asociados a vegetación circundante, como helechos de porte reducido (aproximadamente 50 cm). En el cuadro 2 se presentan las categorías identificadas dentro de la cuenca del río Genio.

Cuadro 2. Sistema de clasificación de cobertura de SIMOCUTE

Sistema de clasificación SIMOCUTE	Código de clasificación
Bosque secundario	1300
Pastos y helechales	3000
Cuerpos de agua	4200
Infraestructura	5000
Playas y arenales	6100
Nubes	7200

A partir de los datos georreferenciados, estos se dividieron en dos grupos: el 80% se utilizó para realizar una clasificación supervisada y el 20% restante para validar dicha clasificación. El 80% de los datos clasificados se procesó en Google Earth Engine, empleando una imagen satelital Sentinel-2A con una tolerancia de nubes del 10%. Aunque no se georreferenciaron sitios cubiertos por nubes, estas se consideraron como una categoría en el análisis. El resultado fue una capa raster con las categorías establecidas, a las cuales se les asignó un valor de C de acuerdo con lo reportado en la literatura. Finalmente, con el 20% de los datos restantes, se generó una matriz de

validación para evaluar la clasificación supervisada, determinando así la exactitud total y el índice de Kappa (κ) [31].

Factor P prácticas de conservación:

Este factor es utilizado cuando existen labores asociadas a la protección del suelo principalmente cultivos como la labranza en curvas de nivel o terrazas. Sin embargo, por las características de la cuenca y al ser este parque nacional este factor fue ignorado pues no existen dentro del perímetro condiciones que se asocien a factores de conservación.

Ecuación universal de pérdida de suelo:

Con el resultado de todas las capas en formato raster se aplicó la ecuación 5 dada de la siguiente manera en Ton/ha/año.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad 5$$

Donde:

A = Pérdida de suelos por unidad de superficie (Ton/ha/año).

R = Índice de erosividad de la lluvia (MJ mm /ha h).

K = Factor de erodabilidad del suelo (Ton/MJ mm).

LS = Factor pendiente o topográfico.

C = Factor de cobertura o cultivos (adimensional).

P = Practicas de conservación (adimensional).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Erosión y sedimentación en distintos estados de sucesión de bosques perturbados por *Sus scrofa*.

Debido a las condiciones del suelo y la perturbación causada por los cerdos, algunos pines no pudieron ser medidos, y una de las parcelas no se logró localizar durante la segunda medición lo que imposibilitó sus cálculos de pérdida de suelo g/cm^3 resultando en un tamaño de la muestra (N) de 525 pines.

Los datos fueron organizados tres estados sucesionales en la cuenca del río Genio: temprano (E1), medio (E2) y tardío (E3) [17]. Además, se distinguió entre las condiciones de perturbado y no perturbado por la presencia de *S. scrofa*. Los resultados indican una mayor variabilidad según el IQR en los sitios perturbados para todos los estados sucesionales, tanto en erosión como en sedimentación (Cuadro 1), lo que sugiere una mayor heterogeneidad en estos sitios. Adicionalmente, la mediana (cuadro 1) es consistentemente más alta en los sitios perturbados (Figura 4).

Cuadro 3. Resumen estadístico de erosión y sedimentación de suelo por estado de sucesión y perturbación por *S. scrofa*.

Tipo	Perturbación	Sucesión	N	Promedio (g/cm^3)	Mediana (g/cm^3)	Desv. Est. (g/cm^3)	IQR (g/cm^3)	Normalidad (p)
Erosión	C (perturbado)	E1 (Temprano)	11	-184,32	-138,77	126,09	134,91	0,115
		E2 (Medio)	14	-108,78	-117,44	78,10	130,70	0,316
		E3 (Tardío)	20	-127,57	-71,73	123,38	102,47	0,00137
	N (no perturbado)	E1 (Temprano)	104	-92,80	-58,72	131,85	71,56	9,73e-17
		E2 (Medio)	75	-67,30	-48,68	70,54	57,95	1,28e-09
		E3 (Tardío)	113	-84,37	-62,16	86,00	87,93	2,16e-11
Sedimentación	C (perturbado)	E1 (Temprano)	14	89,76	77,09	92,14	75,16	0,00121
		E2 (Medio)	26	188,25	151,53	157,37	155,32	0,00513
		E3 (Tardío)	17	130,79	61,48	218,13	92,22	4,05e-06
	N (no perturbado)	E1 (Temprano)	45	100,35	47,18	136,91	93,95	9,06e-08
		E2 (Medio)	39	52,65	33,22	50,38	64,64	3,97e-04
		E3 (Tardío)	49	73,56	32,13	116,26	71,03	1,20e-09

Un aspecto importante es la mayor cantidad de valores atípicos “*outliers*” encontrados en los sitios no perturbados. Esto puede indicar que hay una mayor variabilidad en cómo se pierde o gana suelo en comparación con los sitios perturbados.

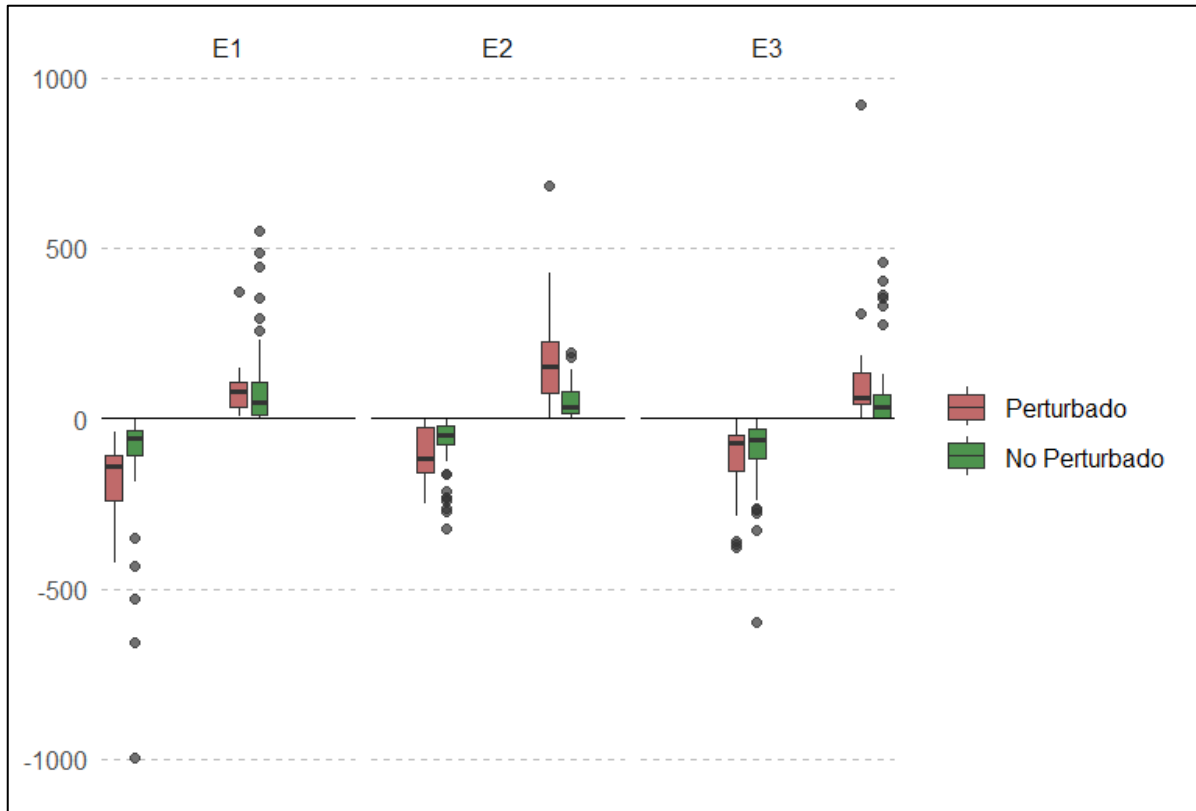


Figura 5. Gráfico de “*boxplots*” para sedimentación y erosión (g/cm³) en tres estados de sucesión del bosque.

En los sitios perturbados, se observan promedios, medianas y desviaciones estándar más elevados, sugiriendo una mayor variabilidad en la pérdida o ganancia de suelo (Cuadro 1). No obstante, es importante considerar que el tamaño de muestra (N) en los sitios perturbados fue menor, lo cual puede influir en la precisión de los resultados y responde al diseño experimental.

Las pruebas de normalidad Shapiro-Wilk mostraron que la mayoría de los datos no siguen una distribución normal ($p < 0,05$), con excepción de los datos de erosión en los sitios perturbados de las sucesiones E1 y E2, donde se observó normalidad. Esta

excepción sugiere que, en ciertas condiciones de perturbación y erosión, los procesos pueden ser más homogéneos.

Debido a que la mayoría de los datos no siguieron una distribución normal, se aplicó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para comparar la sedimentación y erosión entre sitios perturbados y no perturbados por *S. scrofa* en diferentes estados de sucesión. Los resultados muestran que las diferencias significativas solo se encontraron en dos casos: en la erosión en el estado temprano de sucesión y en la sedimentación en el estado medio de sucesión (E2) y (E1; Cuadro 2).

Esto sugiere que, en la cuenca del río Genio los bosques secundarios de estado medio (E2), la sedimentación es significativamente mayor en presencia de perturbación por *S. scrofa*. Por otro lado, en bosques secundarios de estado temprano (E1), la erosión es significativamente mayor cuando hay perturbación por *S. scrofa*. No se observaron diferencias significativas en los estados tardíos (E3) ni para sedimentación ni para erosión.

Cuadro 4. Resumen de los resultados de la prueba de Wilcoxon para comparar perturbación por *S. scrofa* entre sitios.

Tipo	Sucesión	Wilcoxon (p-valor)	Significativo (p<0.05)
Sedimentación	E1 (Temprano)	0,396	No
	E2 (Medio)	0,00001	Sí
	E3 (Tardío)	0,063	No
Erosión	E1 (Temprano)	0,0017	Sí
	E2 (Medio)	0,064	No
	E3 (Tardío)	0,146	No

La perturbación causada por *S. scrofa* tiene efectos significativos tanto en la erosión como en la sedimentación, especialmente en los estadios sucesionales tempranos y medios. Estos resultados coinciden con estudios previos que destacan la relación inversa entre la cobertura vegetal y los procesos erosivos. Los suelos sin vegetación quedan expuestos a la erosión hídrica, mientras que la presencia de vegetación densa, como en los bosques maduros, protege el suelo de estos efectos. Este equilibrio

natural entre el suelo, el clima y la vegetación, conocido como biostasia, favorece la formación de suelos saludables [32] [33] [34]. En los sitios no perturbados, de los estadios avanzados de sucesión, estos parecen no mostrar diferencias significativas de la erosión y sedimentación con respecto a las perturbaciones asociado a la capacidad del dosel forestal y las raíces para interceptar la lluvia y estabilizar el suelo, reduciendo su exposición a la erosión hídrica [11]. Las raíces de especies leñosas juegan un papel clave al generar un entretejido que refuerza el suelo, en contraste con las raíces más superficiales de plantas herbáceas predominantes en estadios tempranos de sucesión, las cuales ofrecen menor protección contra la erosión [35].

La mayor erosión en los sitios perturbados de estado sucesional temprano (E1), puede atribuirse a la ausencia de una cobertura vegetal densa, lo que deja el suelo expuesto a la escorrentía y la pérdida de partículas finas. Esto coincide con estudios en Hawái, donde, se observó que *S. scrofa* incrementa los niveles de sólidos suspendidos en el agua, contribuyendo a la erosión en suelos sin suficiente vegetación [36].

Además, la perturbación física causada por los cerdos parece generar cambios en la dinámica del suelo. Se ha documentado que, las excavaciones por cerdos generan pozos y montículos que alteran la pendiente y la conectividad del suelo, lo que puede favorecer la acumulación de sedimentos en algunas zonas [22]. Este fenómeno se refleja en los resultados de nuestro estudio, donde la sedimentación fue significativamente mayor en el estado medio de sucesión (E2) en los sitios perturbados. Asimismo, se ha observado que las áreas excavadas por cerdos tienden a retener más agua, lo que favorece la infiltración. Esta retención de agua y la formación de pozos y montículos pueden alterar los patrones de escorrentía, provocando la acumulación de sedimentos en zonas específicas [37]. Las perturbaciones por cerdos pueden acelerar la lixiviación de macronutrientes que su vez alteran las redes tróficas del suelo aumentando o disminuyendo la disponibilidad de nutrientes, lo que a su vez afecta la compactación y cohesión del suelo. Suelos menos compactos son más propensos a ser erosionados por el agua o el viento [38]. Aquí es importante anotar que este estudio fue realizado en un periodo de tres meses

coincidiendo con la época lluviosa de la Isla del Coco, por ende, es prudente analizar este efecto en periodos más extensos y evidenciar si esta acumulación de suelo se sostiene en el tiempo.

Finalmente, los efectos de *S. scrofa* también influyen en la biota del suelo, lo que indirectamente afecta los procesos de erosión y sedimentación. En un estudio donde la especie es exótica invasora se encontró que las áreas perturbadas por cerdos mostraban una mayor abundancia de lombrices de tierra (Lumbricidae y Megascolicidae) y escarabajos de tierra (Carabidae), no nativos, los cuales pueden modificar la estructura del suelo y su capacidad para retener o perder sedimentos y a su vez atraer nuevamente los individuos de *S. scrofa*, pues la abundancia de estos macroinvertebrados implica un interés alimenticio para la especie [39]. Aunque nuestro estudio no evaluó la biota del suelo, la perturbación por *S. scrofa* afecta tanto la cantidad como la variabilidad de la erosión y sedimentación, alineándose con estudios previos que documentan alteraciones físicas, químicas y biológicas en los suelos perturbados [22] [37] [40]. Estos hallazgos resaltan la complejidad de los efectos de esta especie invasora en los ecosistemas y subrayan la necesidad de tomar en cuenta estos factores al diseñar estrategias de manejo y conservación.

Relación entre profundidad y superficie del suelo en las perturbaciones de *S. scrofa*

Se destaca que, la mayoría de los datos correspondieron a signos de hozadura, por lo que se consideró únicamente este tipo de perturbación para evaluar los resultados.

Se realizó una prueba de correlación lineal simple para evidenciar la relación entre la profundidad y la superficie de la perturbación causada por *Sus scrofa*. Los resultados muestran que la relación es significativa ($p < 2,2e-16$). Sin embargo, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,2309$) indica que, solo el 23,09% de la variación en la superficie puede explicarse por la variación en la profundidad. Este resultado sugiere que hay otras variables que también, podrían influir en la relación entre profundidad y superficie. Algunos estudios han señalado factores como la estacionalidad [26], la edad de los individuos, y variables ambientales como temperatura, precipitaciones y

humedad [41]. Además, la altitud, el tipo de vegetación [8], y la disponibilidad de recursos alimenticios esporádicos, como la fructificación de ciertas especies de árboles, podrían influir en la magnitud de las perturbaciones tanto en superficie como en profundidad [42].

Diferencias en el grado de perturbación en Collserola y la cuenca del río Genio

Se calcularon los valores estadísticos principales (N, media, min y max), tanto para el Trópico como para el Mediterráneo, así como para profundidad (cm) y superficie de la perturbación (m²), indicando mayor grado de perturbación en el Trópico, además a estos datos se le aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y no mostraron distribuciones normales ($p < 0,05$; Cuadro 1). Debido a esto se procedió a aplicar pruebas no paramétricas como la prueba Wilcoxon (Mann-Whitney U test) (p -value: 0,05) para evidenciar la diferencia entre los sitios.

Cuadro 5. Resumen de estadísticos de profundidad y superficie del suelo por acción de *S. scrofa*.

Variable	Sitio	N	Media	Min	Max	Shapiro-Wilk valor de p
Profundidad (cm)	Trópico	165	7,72	1,0	24,0	2,927e-09
Profundidad (cm)	Mediterráneo	144	5,59	1,0	20,0	3,074e-11
Superficie (m ²)	Trópico	165	4,39	0,031	101,33	<2,2e-16
Superficie (m ²)	Mediterráneo	144	2,00	0,016	24,19	<2,2e-16

Se aplicó una prueba no paramétrica de Wilcoxon para la variable profundidad, la que indicó que existen diferencias significativas entre el Trópico y el Mediterráneo ($p = 2,93e-09$). Al aplicar la misma prueba para la variable superficie (m²), se confirmando también, diferencias significativas en el tamaño del área perturbada entre los sitios de estudio ($p = 0,0001327$: Figura 3).

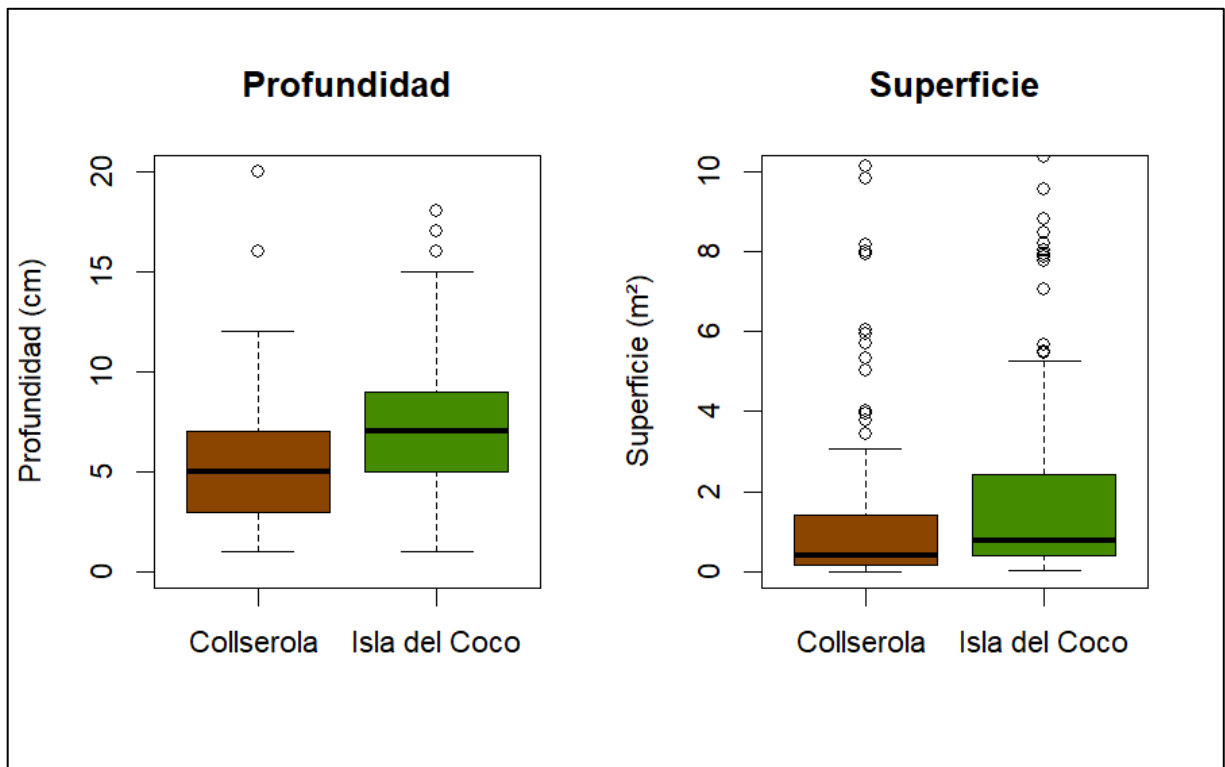


Figura 6. Gráficos “*boxplot*” de profundidad y superficie por perturbación de *S. scrofa* en el Parque Natural Collserola y la cuenca del río Genio, Isla del Coco.

La diferencia en las perturbaciones entre la cuenca del río Genio y el Parque Natural de Collserola muestra una mayor magnitud en la primera, lo que puede atribuirse a diversas disparidades ambientales. El clima mediterráneo de Collserola tiene una precipitación media anual de 614,6 mm [43], mientras que en la Isla del Coco alcanza los 6500 mm [44]. Estas diferencias, junto con la latitud y longitud de ambos sitios, generan una marcada estacionalidad en Collserola, con estaciones secas en verano e invierno y húmedas en primavera y otoño [45]. En contraste, la Isla del Coco experimenta un aumento de precipitaciones entre abril y diciembre, sin una estacionalidad tan marcada [13]. Cabe destacar que los datos de la isla fueron recolectados en época lluviosa (junio-setiembre 2024), mientras que, en Collserola, en pleno verano seco (agosto 2024). Estas diferencias climáticas pueden influir en el comportamiento de *S. scrofa* y su impacto en el suelo, ya que, la perturbación se ha reportado mayor en estaciones húmedas [26] [46]. Esto sugiere que, en la Isla del Coco

la perturbación es continúa debido a la alta humedad, como se ha recalado en otros estudios [8], mientras que en Collserola se evaluó durante un período de baja actividad de la especie. La condición del suelo es un factor clave que influye en la actividad de hozadura de *S. scrofa*. La alta humedad en los suelos permite que la especie realice esta actividad de manera más eficiente en comparación con suelos más secos y pedregosos [47]. Aunque *S. scrofa* presenta perturbaciones similares en su hábitat nativo y exótico, es de relevancia recalcar que los suelos de la Isla no se encuentran adaptados a esta perturbación constante y si no fuese por acción humana estos suelos estarían con perturbaciones nulas pues no existen mamíferos ni grandes animales capaces de movilizar el suelo, los datos revelan diferencias significativas en la magnitud de estas perturbaciones, siendo más persistentes en los sitios exóticos, donde se registraron niveles máximos de perturbación superiores a 100 m² por hozadura.

Nivel de perturbación por *Sus scrofa* en los distintos estados sucesionales

En la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para cada estado de sucesión, se encontró que, ninguno de los estados mostraba normalidad en sus datos ($p > 0,05$). La prueba de Kruskal-Wallis para la profundidad del suelo entre los diferentes estados sucesionales (BS tropical temprano, BS tropical medio, BS tropical tardío y BS mediterráneo medio) indicó que existen diferencias significativas en las profundidades de los suelos entre al menos uno de los grupos (estadístico= 37,659; gl: 3; $p= 3,337e-08$). De manera similar, la prueba de Kruskal-Wallis para la superficie del suelo indicó diferencias significativas en las superficies del suelo entre al menos uno de los estados sucesionales (estadístico= 32,562; gl= 3; $p= 3,984e-07$)

La mayoría de las medianas se sitúan cercanas a los 5 cm de profundidad. Sin embargo, los datos del BS tropical temprano muestran una mayor variabilidad en comparación con los otros estados sucesionales, lo que sugiere una mayor heterogeneidad en la distribución de la profundidad en este estado (Figura 6).

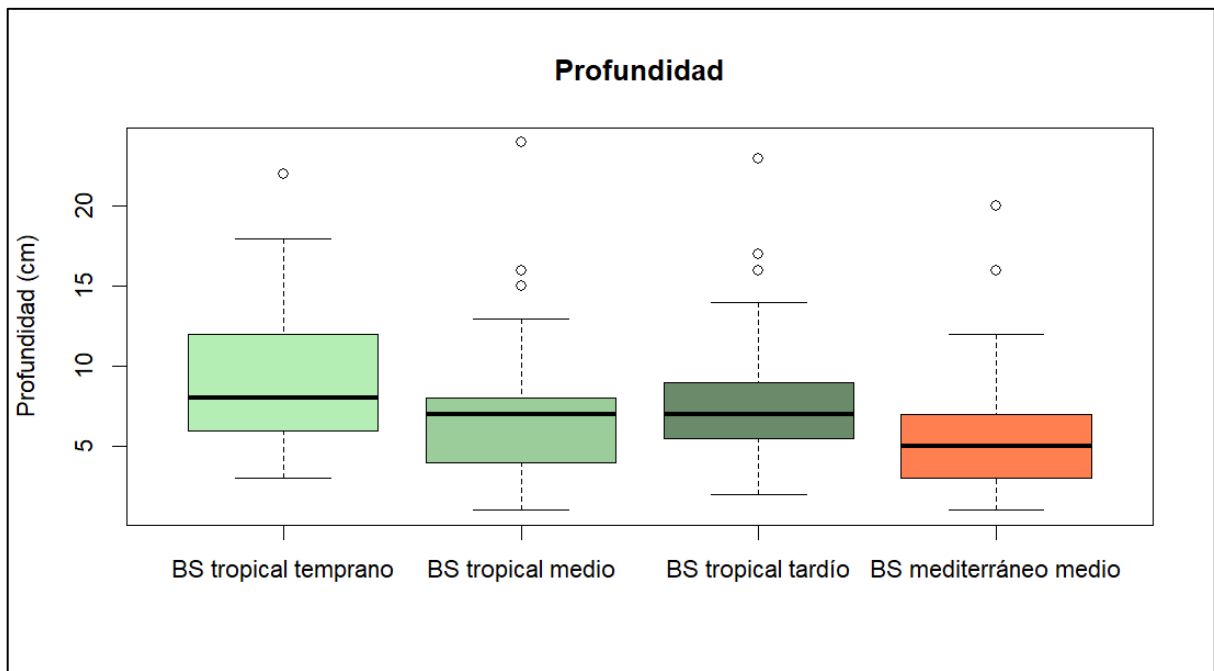


Figura 7. Gráficos de “*boxplot*” para la profundidad del suelo (cm) en la perturbación de *S. scrofa*

Al igual que con la profundidad, el bosque secundario tropical temprano exhibe la mayor heterogeneidad en comparación con los demás sitios (Figura 7). Las medianas de todos los bosques se encuentran por debajo de 5 m². Es notable la presencia de una gran cantidad de valores atípicos “*outliers*” en el bosque secundario mediterráneo medio, lo cual podría explicarse por la menor diversidad estructural del sitio. Mientras que en el área tropical se observó una mayor variedad de estados sucesionales (temprano, medio y tardío), en el área mediterránea solo se encontró bosque secundario medio, a pesar de que las cantidades de datos recolectados fueron similares.

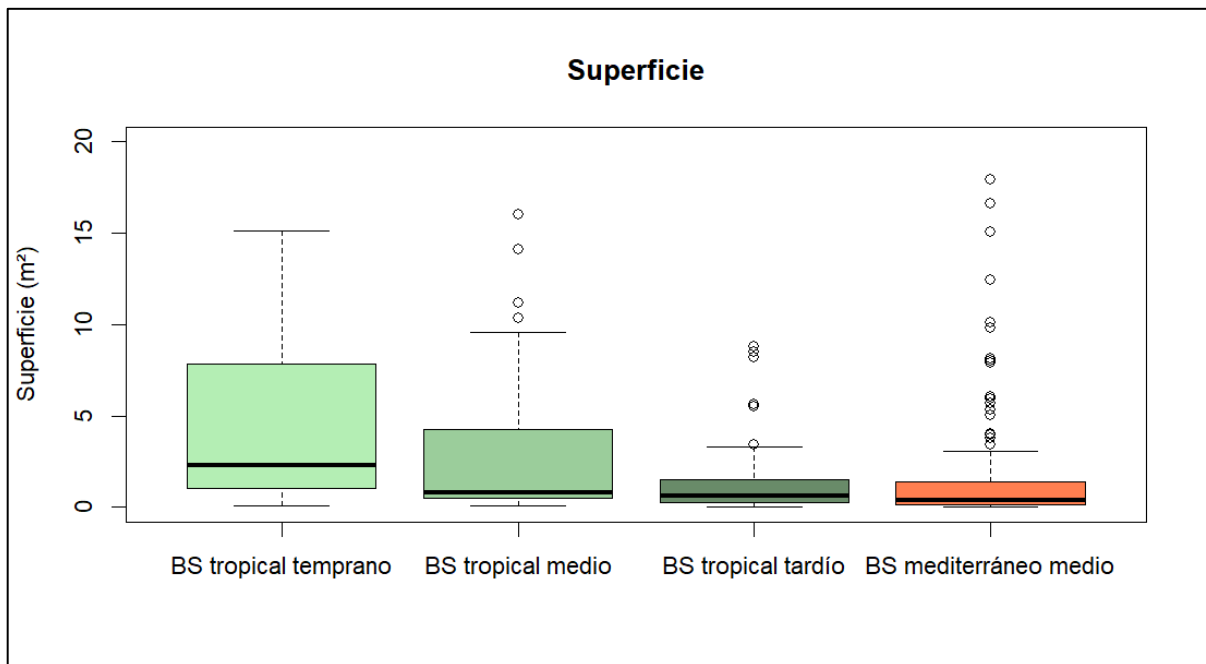


Figura 8. Gráficos de “*boxplot*” para la superficie del suelo (m²) en la perturbación de *S. scrofa*

Se realizaron pruebas de Wilcoxon (Mann-Whitney U test) con un nivel de significancia de 0,05 para identificar diferencias significativas entre los distintos estados sucesionales. Para la variable profundidad (cm) todos los tipos de bosque secundario tropical mostraron diferencias significativas con el bosque secundario mediterráneo medio (Cuadro 4). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los bosques secundarios tropicales entre sí. Es importante destacar que, aunque el BS tropical temprano y el BS tropical medio presentaron diferencias significativas, su valor p es marginal, ya que se aproxima al umbral de 0,05. Esto sugiere que, aunque estadísticamente son diferentes, la magnitud de la diferencia no es tan marcada como la que se observa entre los bosques tropicales y el mediterráneo.

Por su parte, al aplicar la misma prueba, pero en este caso para la variable superficie (m²), la mayoría de los estados sucesionales mostraron diferencias entre sí, exceptuando el BS tropical tardío vs el BS mediterráneo, explicando que, los datos en estos sitios no muestran diferencia entre sí (Cuadro 4). Esta gran diferencia entre cada

estado de sucesión indica que la superficie perturbada varía considerablemente con el estado de sucesión en que se encuentre.

Cuadro 6. Comparación estadística de la profundidad y superficie de perturbaciones por *S. scrofa* en los distintos estados de sucesión (nativo y exótico)

Comparación	Variable	W (Wilcoxon)	p-valor	Significativo (p<0.05)
BS vs tropical temprano mediterráneo medio	BS Profundidad	5472.5	0.005155	Sí
BS tropical medio vs mediterráneo medio	BS Profundidad	2848	2,13e-05	Sí
BS tropical tardío vs mediterráneo medio	BS Profundidad	8019,5	1,219e-07	Sí
BS tropical temprano vs tropical medio	BS Profundidad	573.5	0,04138	Sí (marginamente)
BS tropical temprano vs tropical tardío	BS Profundidad	831	0,1684	No
BS tropical medio vs BS tropical tardío	Profundidad	2677	0,2046	No
BS vs tropical temprano mediterráneo medio	BS Superficie	2895	9,532e-06	Sí
BS tropical medio vs mediterráneo medio	BS Superficie	5847	0,0001796	Sí
BS tropical tardío vs mediterráneo medio	BS Superficie	6132	0,2591	No
BS tropical temprano vs tropical medio	BS Superficie	553	0,02635	Sí (marginamente)
BS tropical temprano vs tropical tardío	BS Superficie	427	1,065e-05	Sí
BS tropical medio vs BS tropical tardío	Superficie	1700,5	0,004	Sí

Al evaluar una especie invasora es importante conocer su estado poblacional, tanto en su condición nativa como en su condición exótica. En la Isla del Coco datos de la dinámica población de cerdos ferales en los 24 km insulares, registraron una

abundancia relativa de entre 452 y 530 individuos. Esto constituye una densidad de 21,9 cerdos/km² y un promedio de la población de 526 cerdos [48]. Por su parte en Collserola la abundancia registrada para 2024 fue apenas de 8,7 cerdos/km². En Collserola es considerada una especie cinegética, debido a que, mediante la caza las poblaciones de esta especie se mantienen estables debido a la falta de depredadores naturales y a la pérdida de hábitat y que ha llevado a la especie a una frecuente interacción con humanos [49]. Esta actividad influye en el tamaño poblacional pues se reporta que, para el 2022, la población era de 17 cerdos/km². Sin embargo, la literatura reporta que en gran parte de Europa la abundancia de esta especie apenas oscila entre 1 y 0,2 cerdos/km² [26].

La gran densidad poblacional que presenta la isla podría explicar las diferencias en profundidad de la perturbación, debido a que en la isla se reporta que los cerdos visitan nuevamente las hozaduras en busca de lombrices principalmente [8], y al existir tanta abundancia es probable que, los cerdos vuelvan constante a los sitios ya perturbados y que los datos recolectados no sean de perturbaciones nuevas sino más bien, de perturbaciones continuamente visitadas por estos animales sumado a lo antes mencionado sobre la humedad del suelo y la facilidad de este a desprenderse [47].

Por su parte, las muchas diferencias entre los estados de sucesión en la variable de superficie (m²), se pueden explicar debido al comportamiento altamente generalista de la especie [50]. En la Isla del Coco, por su parte mencionan que, tiene tipos de hábitat preferenciales en algunos periodos del año [48], En un estudio en Baja California Sur en México, un 90% de la dieta de los cerdos eran bellotas, esto debido a la abundancia de estos frutos y las características oportunistas de los cerdos [18]. Esto nos lleva a pensar que, consecuentemente los cerdos podrían en el momento de la toma de datos en la isla haber tenido mayor persistencia en los bosques tempranos, debido a mayor abundancia de alimentos; sin embargo, para hacer esta aseveración implicaría un estudio más robusto donde se contemplen las fuentes alimenticias de los cerdos en cada estado sucesional.

Encuentros de *Sus scrofa* en bosques perturbados

De las nueve cámaras colocadas y sus registros fotográficos durante 65 días, las tasas de encuentro calculadas por 100 días evidencian una mayor preferencia de *S. scrofa* para los sitios previamente perturbados con hozaduras (Cuadro 5). Los bosques en estado de sucesión temprano presentan la menor tasa de encuentro en sus repeticiones (0 y 1,54), pero, aun así, en las áreas perturbadas la tasa es notablemente mayor (7,69). De manera similar, en los bosques de sucesión media, la tasa de encuentro en sitios perturbados es significativamente más alta (35,38) que en los no perturbados (1,54 y 3,08). En el caso de los bosques tardíos, estos registraron el mayor número de avistamientos (201,54; Cuadro 5), especialmente en los sitios con hozaduras previas (335,38). Sin embargo, cabe destacar que en algunas cámaras no se detectaron avistamientos, lo que puede deberse a varios factores, como la falta de interés alimenticio en ese momento o que los cerdos no utilizaron esos sitios como corredores. Es interesante notar que estas cámaras sin detecciones estaban a no más de 200 metros de las que sí registraron encuentros, lo que sugiere una alta variabilidad local en el uso del espacio por parte de los cerdos.

Cuadro 7. Tasa de encuentro de *S. scrofa* en los distintos estados de sucesión del bosque.

Estado de Sucesión	Perturbación	Avistamientos	Tasa de encuentro
Temprano	No	1	1,54
Temprano	No	0	0,00
Temprano	Sí	5	7,69
Medio	No	2	3,08
Medio	No	1	1,54
Medio	Sí	23	35,38
Tardío	No	131	201,54
Tardío	No	0	0,00
Tardío	Sí	218	335,38

Antes de analizar estos datos, es importante considerar que, en los últimos seis meses, el personal de guardaparques del PNIC ha llevado a cabo un manejo activo en la eliminación de cerdos. Esto es parte de las pruebas y la preparación para la

elaboración del plan de erradicación de mamíferos exóticos en la Isla del Coco, durante el cual se han eliminado cerca de 89 individuos, como así lo informó Monge-Ortiz en una comunicación personal en setiembre del 2024. Es una cifra alta considerando la población de 526 cerdos estimada para la isla. Este manejo ha ocurrido principalmente cerca de la desembocadura del río Genio, y río arriba de este, contiguo al sendero disponible para acceder a una hidroeléctrica, lo que parece estar influyendo en las tasas de encuentro observadas. Las cámaras instaladas en los bosques de sucesión temprana y media estaban más cerca de la desembocadura, mientras que las ubicadas en los bosques tardíos estaban a una distancia considerablemente mayor. Coincidentemente, dos de los sitios más lejanos presentaron las tasas de encuentro más altas, lo que sugiere que la eliminación cerca de la desembocadura puede generar que los avistamientos en las cámaras de los sitios tempranos y medio sean individuos que se están desplazando hacia estos ambientes por la disponibilidad de recursos que se asocia a la eliminación de cerdos y baja competencia. Las áreas tardías del bosque presentan la mayor cantidad de individuos de gran tamaño de *Sacoglottis holdrigei* (especie arbórea endémica y dominante de la Isla del Coco), especie que ha evidenciado problemas en la continuidad de su regeneración y ha permitido teorizar en qué; la presencia de mamíferos introducidos es el agente causal de esta disminución [51].

A pesar de estas intervenciones, es difícil establecer un patrón claro de preferencia por parte de los cerdos, tal como se ha reportado en la literatura [52]. Se sabe que, los cerdos ferales son altamente generalistas [53], y su uso del hábitat depende en gran medida de la disponibilidad de recursos en ese momento [54]. Sin embargo, se ha documentado una preferencia por hábitats con coberturas boscosas y sitios inundables, donde la humedad favorece la disponibilidad de alimentos visibles en el suelo, como raíces, bulbos y artrópodos. Además, los sitios inundables ayudan a los cerdos en la termorregulación conductual debido a sus necesidades de mantener la temperatura corporal [55] [56]. En línea con lo mencionado previamente, en la Isla del Coco los cerdos tienden a visitar los sitios perturbados por hozaduras con regularidad,

cada menos de seis meses [8]. Coincidente con lo encontrado en bosques tropicales de Colombia con presencia de *S. scrofa* [49]. Por lo tanto, nuestros resultados concuerdan con esta observación, mostrando tasas de encuentro mayores en sitios previamente perturbados. Evidencias fotográficas capturadas en secuencias muestran a los cerdos hozando en los mismos sitios perturbados, lo que refuerza esta tendencia.

Ecuación Universal de Perdida de Suelo (RUSLE) para la cuenca del río Genio.

R erosividad:

Se analizaron los registros completos de precipitación de tres años disponibles en la estación meteorológica ubicada en la bahía Wafer. A partir de la precipitación media mensual (p , mm) y la precipitación media anual (P , mm), se obtuvo el Índice Modificado de Fournier (IMF) anual. Posteriormente, el promedio de los valores de IMF fue utilizado para estimar el factor R de erosividad. En el Cuadro 8 se presentan los valores de IMF para cada año y el factor R resultante.

Cuadro 8. Índice Modificado de Fournier y factor R de erosividad para cuenca del río Genio, Parque Nacional Isla del Coco.

Año	IMF
2014	624,57
2015	524,44
2016	791,66
Factor R (MJ mm /ha h):	646,89

Este índice ha sido empleado previamente por la FAO en la elaboración del mapa universal de degradación de suelos [57]. En el Cuadro 9 se describen las categorías de valoración para el factor R . Para la cuenca del río Genio, se obtuvo un valor de 646,89 MJ mm / ha·h, clasificado como alto. Esto indica que, las lluvias en la región poseen un nivel significativo de erosividad, lo cual, se asocia a las altas precipitaciones características del área y a su distribución relativamente uniforme a lo largo del año, resultando en lluvias constantes durante la mayor parte del tiempo [58], [13], [27].

Es importante destacar que, se utilizó un único valor de factor R para toda la cuenca debido a la limitada disponibilidad de estaciones meteorológicas en el sitio y al tamaño reducido de la cuenca, que abarca apenas 3,2 km.

Cuadro 9. Valoración del factor R de erosividad.

0-50	50-500	500-100	>1000
Ligero	Moderado	Alto	Muy alto

K erodabilidad:

A partir de las muestras de porcentaje de materia orgánica y de textura del suelo se pudo clasificar el valor de K tal y como lo muestra el Cuadro 10, esta clasificación se hizo de acuerdo con el Cuadro 1 de la metodología de esta investigación. De esta información, se generó una capa interpolada que representa la distribución espacial del factor K a lo largo de la cuenca, como se muestra en la Figura 9. Los valores obtenidos oscilan entre 0,55 y 0,32, lo que corresponde a niveles de erodabilidad medios a bajos. Esto indica que el comportamiento del suelo en la cuenca del río Genio presenta una susceptibilidad moderada a baja frente a procesos erosivos [29].

Cuadro 10. Valor de *K* asociado a la textura y porcentaje de materia orgánica para cuenca del río Genio, Parque Nacional Isla del Coco. P= Parcela, E = estado de sucesión, 1= Temprano, 2= Medio, 3= Tardío, C= con perturbación por *Sus scrofa*.

Punto de recolección (Parcela)	Textura	Porcentaje de materia orgánica (%)	Valor <i>K</i>
P1-E1	Limoso	12,72	0,055
P1-E2	Limoso	8,19	0,055
P1-E3	Franco limoso	13,1	0,043
P2-E1	Franco limoso	8,45	0,043
P2-E2	Franco	3,55	0,045
P2-E3	Franco arenoso fino	7,07	0,032
P3-E1	Limoso	6,81	0,055
P3-E2	Limoso	10,79	0,055
P3-E3	Franco limoso	7,98	0,043
P4-E1	Limoso	10,36	0,055
P4-E2	Franco limoso	19,19	0,043
P4- E3	Franco limoso	11,46	0,043
P5-E1-C	Franco limoso	13,24	0,043
P5-E2-C	Franco limoso	11,72	0,043
P5-E3-C	Franco	9,02	0,038

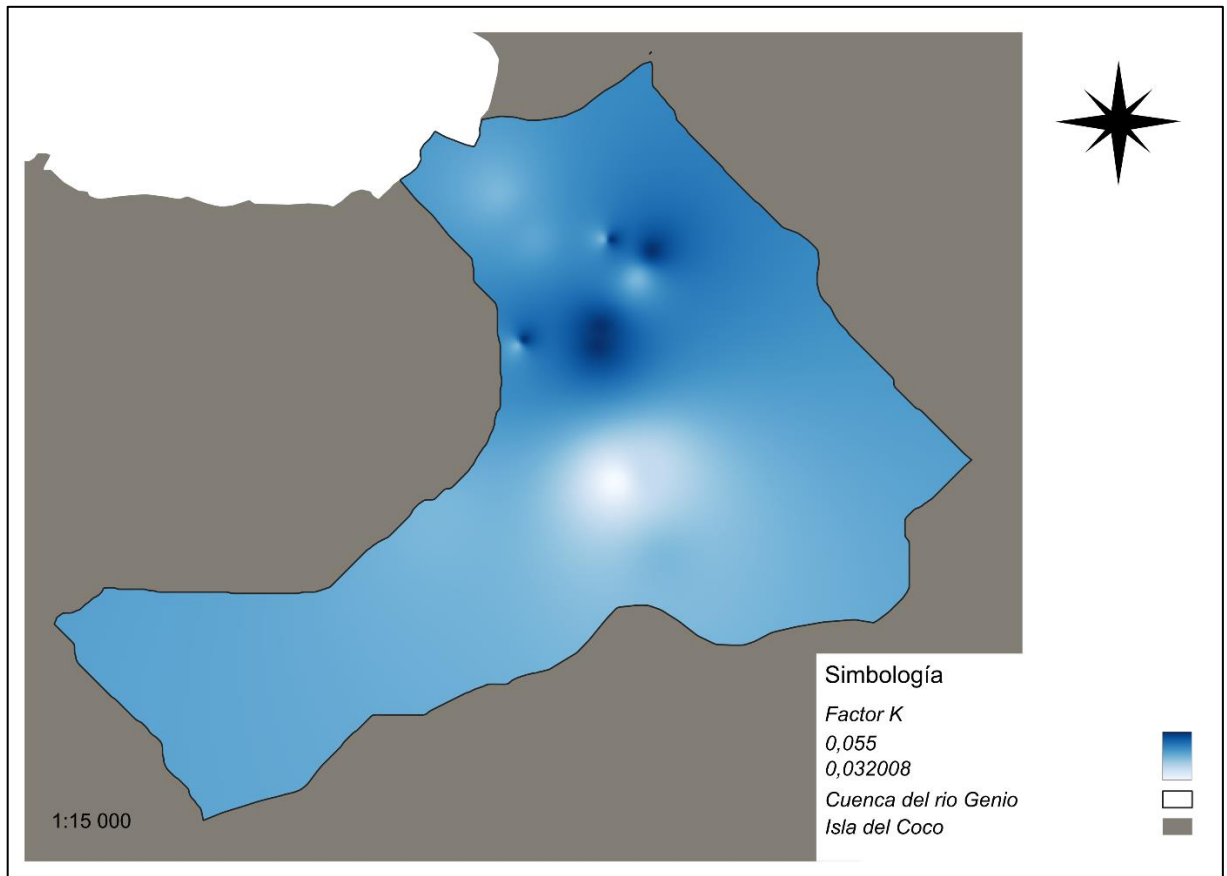


Figura 9. Factor R (Ton/MJ mm) asociado a la cuenca del Rio Genio.

LS pendiente o topografía:

Se obtuvo un factor L en el rango de 1,004 a 37,786 (Figura 10) lo que indica que las pendientes analizadas tienen longitudes variables que afectan de forma moderada a alta la acumulación de escorrentía. Esto se debe a que el factor L refleja cómo el incremento en la longitud de la pendiente aumenta la cantidad de agua que fluye [58].

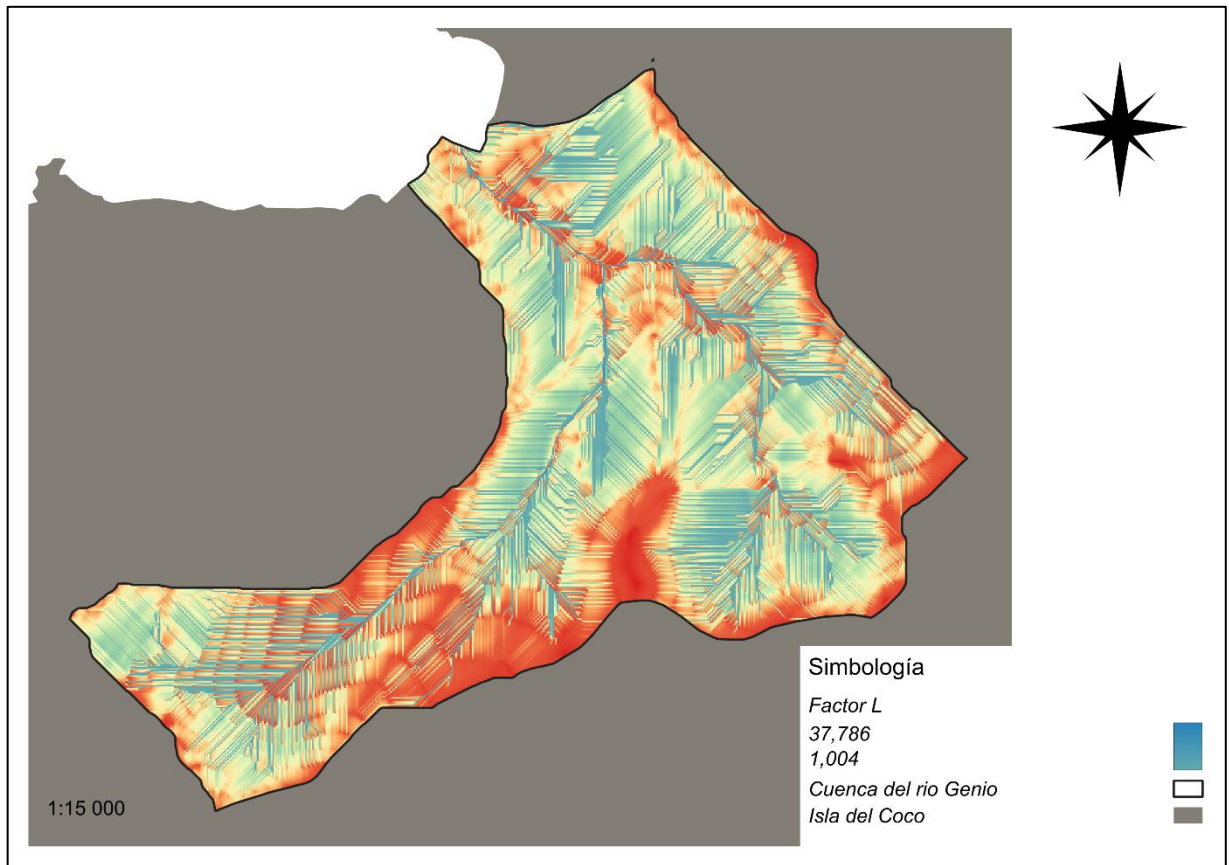


Figura 10. Factor L asociado para la cuenca del rio Genio.

El factor S se calculó con valores entre 0,037 y 10,402 (Figura 11), lo que sugiere pendientes con inclinaciones que van de leves a muy pronunciadas, influyendo significativamente en el potencial de erosión. Esto ocurre porque el factor S representa el impacto de la inclinación en la velocidad del flujo de agua, donde pendientes más inclinadas generan una mayor capacidad de arrastre del suelo [59].

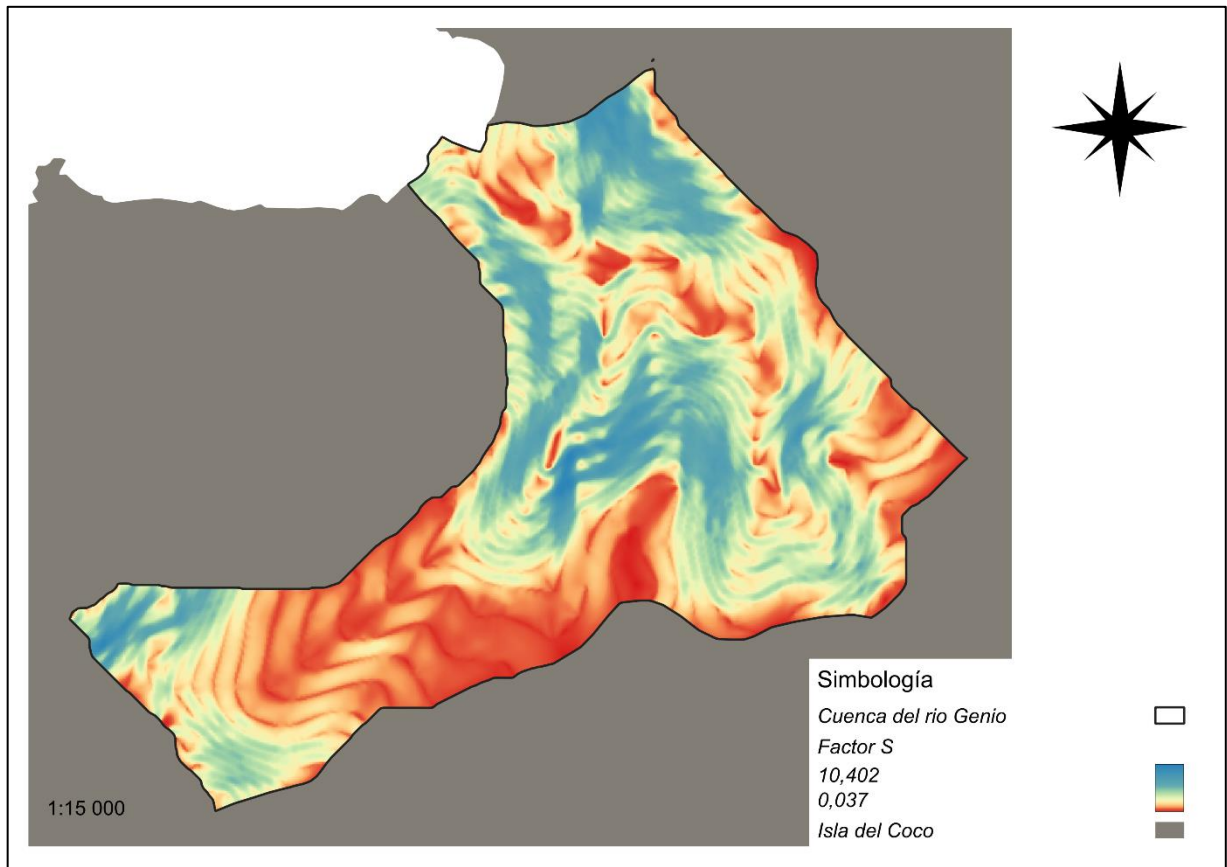


Figura 11. Factor S asociado a la cuenca del rio Genio.

C cobertura:

La clasificación supervisada realizada, permitió generar un mapa que incluye las categorías definidas según el sistema SIMOCUTE (Figura 10) [30]. Debido a que la isla presenta nubosidad la mayor parte del tiempo, las áreas afectadas por la presencia de nubes se incorporaron como una categoría adicional.

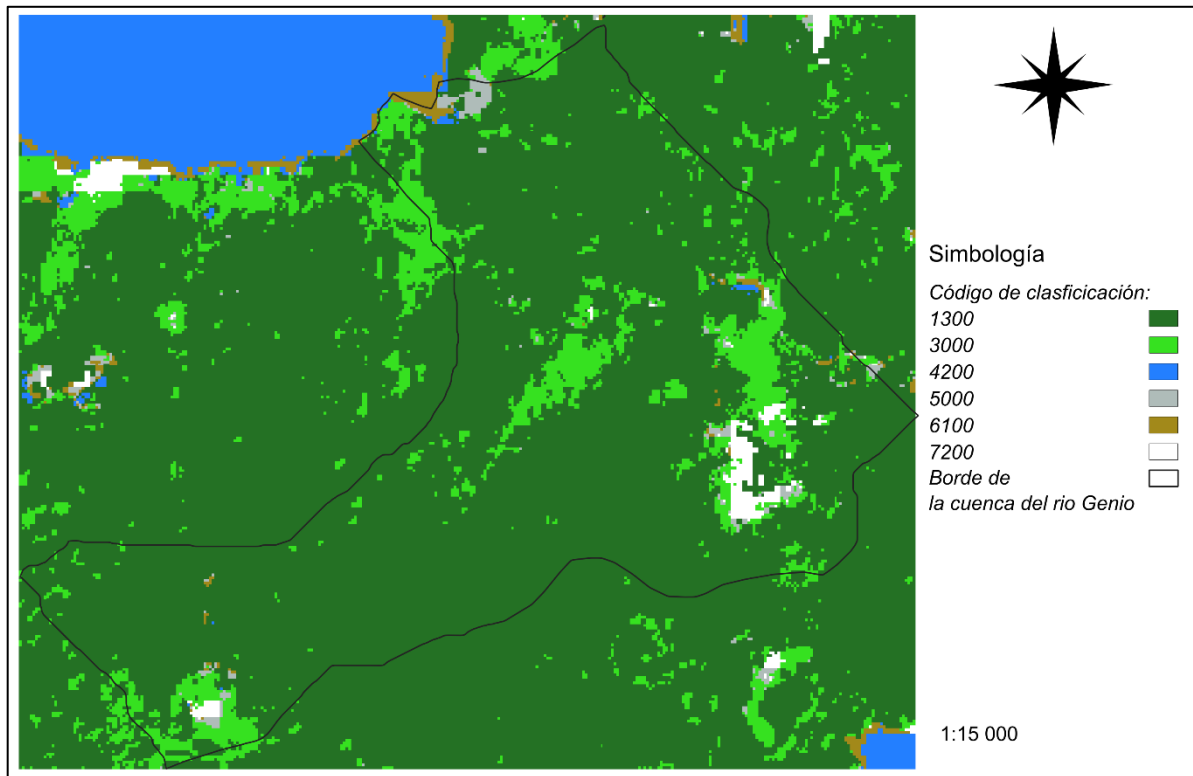


Figura 12. Clasificación supervisada a partir de una imagen Sentinel-2A, para la cuenca del rio Genio.

Se obtuvo el índice Kappa. Este índice es una métrica estadística ampliamente utilizada en el análisis de imágenes y sistemas de clasificación supervisada, ya que evalúa la precisión de la clasificación en comparación con lo esperado por azar [31]. La matriz de confusión muestra que todas las categorías lograron una exactitud del productor y del usuario del 100% (Cuadro 11). Como resultado, se obtuvo un índice Kappa igual a 1, lo que indica una concordancia perfecta entre la clasificación y los datos de referencia. Esto sugiere que la clasificación supervisada es altamente precisa y representa adecuadamente las categorías establecidas. Estos resultados se asocian a la poca cantidad de categorías establecidas.

Cuadro 11. Matriz de confusión para la validación de una clasificación supervisada, Cuenca del río Genio, Parque Nacional Isla del Coco.

Clasificación	Campo					Total, general	Exactitud del usuario (%)	
	1300	3000	4200	5000	6100			
1300	34					34	100	
3000		3				3	100	
4200			7			7	100	
5000				4		4	100	
6100					1	1	100	
Total, general	34	3	7	4	1	N = 49		
	Exactitud del productor (%)							
	100	100	100	100	100			

Con los datos de la clasificación correctamente validados, se procesó el raster resultante y se cambiaron los códigos de validación por factores de C; la manera de asignar los valores de C fue mediante una revisión de literatura, basándose en las características de la categoría de clasificación SIMOCUTE [30] y buscando la que mejor se ajuste a la categoría (Cuadro 12).

Cuadro 12. Valor de C asociado a los tipos de cobertura de la cuenca del río Genio.

Sistema de clasificación	Código de clasificación de SIMOCUTE	Valor de C asociado	Literatura
Bosque secundario	1300	0,003	[60] [61]
Pastos y helechales	3000	0,012	[61]
Cuerpos de agua	4200	0	[62]
Infraestructura	5000	0,001	[63]
Playas y arenales	6100	1	[64]
Nubes	7200	0	--

RUSLE para la cuenca del río Genio:

Con todos los factores calculados para la cuenca del río Genio, se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, siguiendo la metodología descrita en esta investigación (ecuación 5). Se obtuvo la representación espacial de los resultados en forma de una capa ráster, clasificada en cuatro categorías de erosión: nula o ligera, moderada, alta y muy alta (Figura 13).

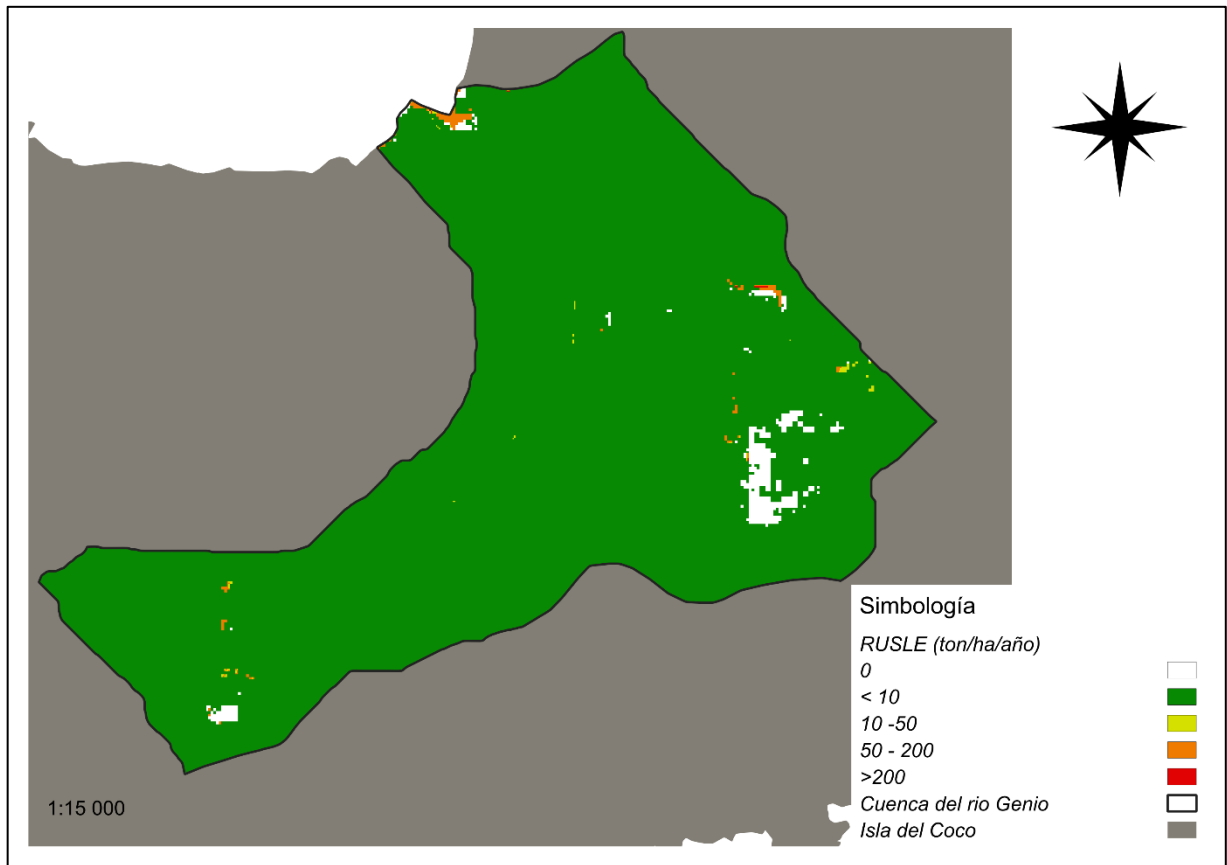


Figura 13. RUSLE para la cuenca del rio Genio, Parque Nacional Isla del Coco.

Los datos obtenidos se categorizaron según lo reportado en la literatura [57], donde se detalla el porcentaje de cada categoría dentro de la cuenca (Cuadro 13). De acuerdo con la categorización, la mayoría del área evaluada corresponde a la categoría de erosión nula o ligera, reflejando un impacto mínimo de pérdida de suelo (Figura 13).

Cuadro 13. Erosión hídrica para cuenca del rio Genio. [61]

Erosión hídrica	Pérdida de suelos en ton/ha/Año	Porcentaje (%) dentro de la cuenca del rio Genio
Nula o ligera	<10	98,026
Moderada	10-50	0,094
Alta	50-200	0,34
Muy Alta	>200	0,0000014
No clasificable	-	1,54

Aunque la isla presenta altas precipitaciones y una topografía irregular la mayor parte de la isla está cubierta por bosque tropical, que actúa como un amortiguador natural contra la erosión. Las raíces de los árboles estabilizan el suelo, y la hojarasca reduce el impacto directo de la lluvia [35]. Se suma además, la ausencia de actividades agrícolas, ganaderas o de construcción en la isla esto limita significativamente la exposición del suelo y, por ende, la erosión. Con respecto a la vegetación como helechos y pastos, estos también contribuyen a reducir la erosión al cubrir el suelo, disminuir la velocidad del flujo superficial y promover la infiltración de agua, la vegetación de bajo porte es particularmente eficiente en mitigar el impacto de las gotas de lluvia, superando incluso a bosques de dosel alto. Esto se debe a que, en los bosques de dosel alto, las gotas pueden recuperar velocidad al caer desde las copas, incrementando su potencial erosivo, mientras que, en áreas con vegetación baja porte, la energía de las gotas disminuye antes de llegar al suelo [60].

El modelo RUSLE presentado da una noción general de la potencial erosión en un momento dado, si bien debido a la poca disponibilidad de recursos, este modelo no se puede encasillar en un año en específico, pues consideró precipitaciones de los años 2014 al 2016, mientras que los valores de erodabilidad y cobertura fueron recolectados en 2024. Esto no le quita validez al modelo, sin embargo, de existir nuevos datos el modelo se puede recalcular y evidenciar posibles cambios, principalmente en años con las precipitaciones anormales o cambios en cobertura, como por ejemplo un deslizamiento.

Influencia de la especie *Sus scrofa* en los procesos erosivos.

Este estudio evidencia el impacto de *Sus scrofa* en los procesos erosivos, tanto en términos de erosión como de sedimentación (Figura 5). En el presente análisis, los valores promedio de pérdida de suelo en bosques tempranos fueron de $-92,80 \text{ g/cm}^3$ en sitios no perturbados y $-184,32 \text{ g/cm}^3$ en áreas con hozaduras previas. Por otro lado, en bosques medios, la sedimentación fue mayor en zonas perturbadas ($188,25 \text{ g/cm}^3$ frente a $52,65 \text{ g/cm}^3$). Se desconoce actualmente el porcentaje total de superficie afectada. Si bien un estudio realizado entre 1996 y 1997 estimó que las hozaduras de

Sus scrofa afectaban entre el 11,9 % y el 18,8 % de la Isla del Coco [8]. Estos datos sugieren que los procesos erosivos ocurren de manera natural en la cuenca del río Genio, sin embargo, la persistencia de hozaduras por parte de *Sus scrofa* altera significativamente la dinámica del suelo y pueden estar extendiéndose por mucho espacio a lo largo y ancho de la cuenca.

Es importante destacar que el modelo RUSLE, no considera la presencia de estos mamíferos ni las actividades localizadas de hozadura. Consecuentemente los resultados del modelo indican tasas de erosión bajas, no mayores a 10 toneladas por hectárea al año. Cabe destacar que el modelo se basa en imágenes satelitales, por lo que los procesos bajo el dosel forestal son inciertos para el modelo, mientras que los datos obtenidos con los pines de erosión reflejan cómo se comportan los procesos erosivos bajo algún tipo de cobertura forestal.

Los métodos para cuantificar la erosión del suelo se agrupan en directos e indirectos. Los métodos directos, como el uso de pines de erosión, permiten medir pérdidas de suelo en campo, mientras que los métodos indirectos, como RUSLE, se basan en modelos matemáticos [65]. Aunque los métodos directos son más costosos, ofrecen una mayor especificidad y permiten analizar situaciones particulares [66], en este caso la presencia de *Sus scrofa*. Por otro lado, los modelos matemáticos son herramientas valiosas para caracterizar sitios de manera general [65]. Estudios previos han señalado discrepancias entre métodos directos e indirectos, pero subrayan la importancia de emplear ambos enfoques de manera complementaria para obtener una visión integral de los procesos erosivos [66].

Un aspecto clave en este estudio son las hozaduras bajo el dosel forestal y la cobertura vegetal identificada por el modelo RUSLE. Estudios previos en la Isla del Coco indicaron que los cerdos limitan la regeneración natural [67] y favorecen la colonización de especies introducidas [25]. Esto podría explicar por qué los bosques aún albergan árboles adultos que escaparon a la actividad de los cerdos, lo que mantiene el factor C de cobertura (Figura 12) con dominancia de la categoría de bosque. Sin embargo,

la ausencia de regeneración natural bajo el dosel puede generar variaciones en los procesos erosivos, como lo muestran los datos obtenidos con los pines.

La persistencia de *Sus scrofa* representa una amenaza significativa para los bosques de la cuenca del río Genio y podría comprometer su permanencia en el tiempo. Esto resalta la importancia de la cobertura vegetal y de emplear diferentes métodos de estimación de erosión para entender los procesos en su totalidad. Adicionalmente, el aislamiento relativo de actividades humanas y la conservación de la cobertura vegetal emergen como factores clave para garantizar la estabilidad del suelo y con ello la permanencia de los bosques.

CONCLUSIONES

Este trabajo evaluó la influencia de la presencia de *Sus scrofa*, en los procesos de erosión y sedimentación de suelos en la cuenca del río Genio, Isla del Coco, y resalta la importancia del estado de sucesión del bosque secundario como factor determinante en la variabilidad de pérdida de suelo. Se concluye que los suelos en estadios tempranos de sucesión bajo los efectos de la hozadura presentan una mayor vulnerabilidad a la erosión, principalmente debido a la exposición directa al agua por la falta de un dosel establecido. En contraste, los sitios en estadios medios perturbados, con un dosel parcialmente desarrollado, muestran acumulación de sedimentos debido al empozamiento en áreas perturbadas, sugiriendo que la presencia de cobertura vegetal puede reducir la erosión directa, pero no mitiga por completo la sedimentación. Finalmente, los suelos en estadios avanzados de sucesión exhiben una mayor resistencia tanto a la erosión, sedimentación con presencia de *Sus scrofa*, lo que puede deberse a la complejidad estructural del dosel y a una posible resistencia biótica; sin embargo, esta respuesta también puede estar influenciada por el corto periodo de evaluación, ya que los procesos de erosión suelen desarrollarse de manera lenta y gradual en el tiempo.

Este estudio identificó importantes diferencias en el impacto de la hozadura de *Sus scrofa* entre la cuenca del río Genio en la Isla del Coco y su hábitat nativo. En la isla, se observa una mayor profundidad de suelo perturbado, y las características de las alteraciones causadas por el cerdo parecen ser constantes sin importar el estado sucesional del bosque, en cambio, en ecosistemas mediterráneos, las perturbaciones son menos intensas, probablemente debido a la mayor humedad del suelo en la Isla del Coco, atribuido a las precipitaciones que en sí mismas son mucho más altas. Por otro lado, la superficie de las áreas perturbadas parece depender más de factores como la disponibilidad de alimento o características propias del comportamiento del cerdo, ya que, los resultados muestran muchas diferencias en la superficie afectada entre tipos de bosque. Finalmente, aunque se encontró una relación positiva entre la profundidad y la superficie de las perturbaciones, esta es baja, concluyendo que hay

influencia de otros factores como variables ambientales (precipitación, temperatura), variables biológicas (presencia de microorganismos, cobertura vegetal, fenología de la flora) y físicas (profundidad y pedregosidad del suelo)

Con respecto a la preferencia de los cerdos por algún tipo de bosque en estado de sucesión específica, este trabajo no permite concluir correctamente, sin embargo, es de destacar que se evidenció una afectación ante la constante eliminación de individuos producto del programa de erradicación de la especie, implicando que; se registraran mayor cantidad de individuos en las áreas de bosques más avanzados en la sucesión vegetal, lo que implica que; los cerdos pueden estar volviendo a los sitios donde fueron eliminados (tempranos y medios) debido a la disponibilidad de alimentos y hábitats desocupados, sin embargo es de destacar la posible presión hacia sitios más avanzados en sucesión vegetal, que como evidencio este estudio, son lo que parecen resistirse más a los procesos de pérdida de suelo en presencia de hozaduras.

Para finalizar, los resultados obtenidos por el modelo RUSLE para la cuenca del río Genio se puede decir que, esta mantiene tasas de erosión notablemente bajas, no superiores a 10 toneladas por hectárea al año, gracias a su densa cobertura de bosque tropical, vegetación secundaria y la ausencia de actividades humanas significativas. El bosque estabiliza el suelo y reduce el impacto de las precipitaciones, mientras que las plantas de bajo porte, como helechos y pastos, mitigan eficazmente la erosión al disminuir la energía de las gotas de lluvia y fomentar la infiltración. Esto asocia que la presencia de cerdos ferales puede causar perturbaciones localizadas, y estas aumentar la erosión o sedimentación, sin embargo, destaca la importancia de la cobertura vegetal para mitigar los efectos de la erosión.

RECOMENDACIONES

Para el monitoreo de erosión mediante pines de erosión, se recomienda extender el estudio de manera continua por al menos un año. Esto permitiría observar cómo las precipitaciones afectan el suelo en diferentes momentos y permitir establecer períodos de mayor movimiento. En el caso particular de la Isla del Coco, es importante diferenciar el análisis según los estados de sucesión del bosque, ya que, es probable que en estados avanzados los procesos erosivos se presenten de manera más gradual, lo cual pudo no haberse registrado en estudios previos. Cabe mencionar que modelos como RUSLE permiten estimar la erosión de manera indirecta, sin embargo, para esto es necesario información, por lo que se recomienda invertir en estudios relevantes como las características físicas del suelo de la Isla, mantener un monitoreo constante de las precipitaciones, esto para poder darle mayor validez a estos métodos indirectos.

Además, es fundamental entender mejor otras características del suelo como las químicas y biológicas, para implementar metodologías y estrategias de conservación adecuadas. La presencia de *Sus scrofa* representa una presión significativa sobre estos suelos, afectando organismos del suelo, especialmente microorganismos, y vegetación nativa. Por ello, se recomienda llevar a cabo estudios integrales que analicen factores como la retención de materia orgánica, la germinación de plantas nativas, la exposición de raíces y los patrones de floración y fructificación en relación con las perturbaciones por *Sus scrofa*.

Se recomienda además hacer un manejo activo de la especie para poder conservar y preservar en el tiempo un sitio tan particular y relevante para la ciencia como lo es la Isla del Coco, sitio con características excepcionales y únicas. Dado que el Parque Nacional Isla del Coco planea implementar un plan de erradicación de *Sus scrofa*, se recomienda evaluar los efectos sobre la vegetación en tres etapas clave: antes, durante y después del proceso. Es importante realizar un análisis de la regeneración de especies nativas para fundamentar decisiones informadas, especialmente sobre el posible uso de métodos de restauración activa en áreas altamente perturbadas si la

recuperación natural del ecosistema resulta insuficiente. La reciente actividad de caza ofrece una oportunidad valiosa para evaluar estos efectos, ya que actualmente existen sitios con distintas densidades de esta especie. Sería recomendable analizar el impacto real de *Sus scrofa* y prever escenarios de restauración para una situación sin la presencia completa de este mamífero invasor.

REFERENCIAS

- [1] I. Martínez, G. Pantoja, E. Cancán, D. Limaico, M. Vizcaíno, M. Añazco, y H. Uribe, "Evaluación de la erosión y selección de especies forestales para la rehabilitación de suelos degradados de origen volcánico de Ecuador," *Agro Sur*, vol. 47, no. 3, pp. 55-62, 2019.
- [2] J. T. Silva-García, G. Cruz-Cárdenas, S. Ochoa-Estrada, F. Estrada-Godoy, J. Nava-Velázquez, y D. Álvarez-Bernal, "Pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del lago de Chapala, Michoacán, México," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 8, no. 6, pp. 117-128, 2017, doi: 10.24850/j-tyca-2017-06-08.
- [3] Z. Li y H. Fang, "Impactos del cambio climático en la erosión hídrica: una revisión," *Earth-Science Reviews*, vol. 163, pp. 94-117, 2016.
- [4] R. Rozzi y M. Sherriffs, "El Visón (*Mustela Vison* Schreber, Carnivora: Mustelidae), un nuevo mamífero exótico para la Isla Navarino," *Anales Del Instituto De La Patagonia*, vol. 31, pp. 97-104, 2003.
- [5] S. Lowe, M. Browne, S. Boudjelas, y M. De Poorter, "100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo. Una selección del Global Invasive Species Database," Grupo Especialista de Especies Invasoras (GEEI), UICN, 12 pp., 2004.
- [6] J. H. Cushman, T. A. Tierney, y J. M. Hinds, "Efectos variables de las perturbaciones por cerdos salvajes en plantas nativas y exóticas en un pastizal de California," *Ecological Applications*, vol. 14, no. 6, pp. 1746-1756, 2004.
- [7] C. Sierra, "El cerdo cimarrón (*Sus scrofa*, Suidae) en la Isla del Coco, Costa Rica: Composición de su dieta, estado reproductivo y genética," *Revista de Biología Tropical*, vol. 49, no. 3-4, pp. 1147-1157, 2001a.
- [8] C. Sierra, "El cerdo cimarrón (*Sus scrofa*, Suidae) en la Isla del Coco, Costa Rica: Escarbaduras, alteraciones al suelo y erosión," *Revista de Biología Tropical*, vol. 49, no. 3-4, pp. 1158-1170, 2001b.

- [9] Ó. Skewes, R. Rodríguez, y F. M. Jaksic, "Ecología trófica del jabalí europeo (*Sus scrofa*) silvestre en Chile," *Revista Chilena de Historia Natural*, vol. 80, no. 3, pp. 295-307, 2007.
- [10] S. S. Nogueira y J. M. Fragoso, "Impactos ecológicos de los cerdos salvajes en las Islas Hawaianas," *Biodiversity and Conservation*, vol. 18, pp. 3677-3683, 2009.
- [11] I. J. Rojas-Zeledón, "Erosión hídrica bajo tres estadios de sucesión de bosque dentro del Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica," *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 15, no. 36, pp. 65-75, 2018.
- [12] L. G. Acosta-Vargas, "Restauración ecológica en el Parque Nacional Isla del Coco: evaluación del efecto de diferentes tratamientos en la regeneración del bosque," 2022.
- [13] P. E. Gutiérrez-Fonseca, A. Ramírez, G. Umaña, y M. Springer, "Macroinvertebrados dulceacuícolas de la Isla del Coco, Costa Rica: especies y comparación con otras islas del Pacífico Tropical Oriental," *Revista de Biología Tropical*, vol. 61, no. 2, pp. 657-668, 2013.
- [14] A. Ruiz-Boyer y A. Rodríguez-González, "Lista preliminar de hongos (Ascomycota y Basidiomycota) y mixomicetos (Myxomycota) de la Isla del Coco, Puntarenas, Costa Rica," *Revista de Biología Tropical*, vol. 68, pp. 33-56, 2020.
- [15] A. Estrada-Chavarría, J. Sánchez-González, y A. Rodríguez-González, "Catálogo actualizado de las plantas vasculares del Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica," *Revista de Biología Tropical*, vol. 68, pp. 73-88, 2020.
- [16] M. A. Porras-Jiménez, "Dinámica de los bosques del Parque Nacional Isla del Coco, Área de Conservación Marina Isla del Coco," 2012.
- [17] B. Finegan, "El potencial de manejo de los bosques húmedos secundarios neotropicales de las tierras bajas," *Colección Silvicultura y Manejo de Bosques Naturales*, número 5, 1992.

- [18] A. B. Solís-Cámara, G. Arnaud-Franco, S. Álvarez-Cárdenas, P. Galina-Tessaró, y J. J. Montes-Sánchez, "Evaluación de la población de cerdos asilvestrados (*Sus scrofa*) y su impacto en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, Baja California Sur, México," *Tropical Conservation Science*, vol. 2, no. 2, pp. 173-188, 2009.
- [19] J. Falcao-Sobrinho, S. F. Diniz, F. E. L. Barbosa, y P. H. E. de Assis, "Erosion Pins: Installation, Readings, and Calculations of Soil Losses under the Effect of Hydrogel," *Journal of Sustainable Development*, vol. 16, no. 4, pp. 1-57, 2023.
- [20] P. C. Teixeira, G. K. Donagemma, A. Fontana, y W. G. Teixeira, "Manual de métodos de análisis de suelo," 2017.
- [21] J. Granados-Chacón, "Composición y diversidad microbiana del suelo en tres coberturas vegetales del Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica," 2021.
- [22] G. R. Hancock y J. B. Lowry, "¿Los cerdos ferales aumentan la erosión del suelo? Un estudio de caso en el norte de Australia monzónico," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 48, no. 14, pp. 2828-2841, 2023.
- [23] D. Balderas González, "Depredación en tres localidades de la Sierra Madre Oriental (Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí) "Depredación y dispersión de semillas de *Dioon edule* por fauna," 2021.
- [24] M. S. Araya-Ramírez, "Interpretación ambiental basada en la diversidad de flora y fauna del INCAE, Alajuela, Costa Rica," 2022.
- [25] E. Arias-Leandro y A. P. Fuentes-León, "Estado de la regeneración de la flora en el Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica," 2023.
- [26] C. J. Sandom, J. Hughes, y D. W. Macdonald, "Rooting for rewilding: quantifying wild boar's *Sus scrofa* rooting rate in the Scottish Highlands," *Restoration Ecology*,
- [27] FAO, Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma: UNESCO, 1980.. 21, no. 3, pp. 329-335, 2013.

- [28] N. Ciancaglini, R-001: *Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina, 2010.
- [29] Y. M. Kirby and R. Morgan, *Soil Erosion*. Chichester, New York, Toronto: John Wiley & Sons, 1980.
- [30] H. Acevedo Mairena, R. Monge Vargas, X. Soto Solano, C. Ramírez Zea, M. Calvo Méndez, y R. Hamilton, "Descripción del Sistema de Clasificación de Uso y Cobertura de la Tierra propuesto para el SIMOCUTE." *Ambientico*, no. 273, pp. 23-34, Enero-Marzo 2020.
- [31] T. M. Lillesand and R. W. Kiefer, *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1979, p. 624.
- [32] J. Murillo, V. H. Méndez-Estrada, y S. B. Prendas, "Efecto de *Geophila macropoda* (Rubiaceae) como arvense de cobertura en la erosión hídrica en bananales de Guápiles, Limón, Costa Rica," *UNED Research Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 217-223, 2016.
- [33] C. E. C. Roa, C. Pacheco, y R. López, "Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica," *Gestión y Ambiente*, vol. 20, no. 2, pp. 265-280, 2017.
- [34] F. G. Echavarría-Cháirez, G. Medina-García, y J. A. Ruiz-Corral, "Efecto en la erosión hídrica del suelo en pastizales y otros tipos de vegetación por cambios en el patrón de lluvias por el calentamiento global en Zacatecas, México," *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, vol. 11, pp. 63-74, 2020.
- [35] A. Sepúlveda-Lozada, V. Geissen, S. Ochoa-Gaona, A. Jarquín-Sánchez, S. Hernández de la Cruz, E. Capetillo, y L. F. Zamora-Cornelio, "Influencia de tres tipos de vegetación ribereña en el control de la erosión fluvial en Pantanos de Centla, México," *Revista de Biología Tropical*, vol. 57, no. 4, pp. 1153-1163, 2009.

- [36] D. O. Dunkell, G. L. Bruland, C. I. Evensen, y C. M. Litton, "Runoff, Sediment Transport, and Effects of Feral Pig (*Sus scrofa*) Exclusion in a Forested Hawaiian Watershed," *Pacific Science*, vol. 65, no. 2, pp. 175-194, 2011.
- [37] N. Pitta-Osses, K. Katona, J. Grósz, y C. Centeri, "Potential of wild boar (*Sus scrofa*) rooting for slowing down erosion processes," in *Water Dynamics Changes in the Soil-Plant-Atmosphere System*, 2020, pp. 188-195.
- [38] A. Lundgren, "Effects of wild boar (*Sus scrofa*) on soil processes and tree growth," 2021.
- [39] N. H. Wehr, C. M. Litton, N. K. Lincoln, y S. C. Hess, "Relationships between soil macroinvertebrates and nonnative feral pigs (*Sus scrofa*) in Hawaiian tropical montane wet forests," *Biological Invasions*, vol. 22, no. 2, pp. 577-586, 2020.
- [40] M. N. Barrios-García, M. González-Polo, D. Simberloff, and A. T. Classen, "Wild boar rooting impacts soil function differently in different plant community types," *Biological Invasions*, vol. 25, no. 2, pp. 583-592, 2023.
- [41] M. F. Cuevas, R. A. Ojeda, y F. M. Jaksic, "Ecological strategies and impact of wild boar in phytogeographic provinces of Argentina with emphasis on aridlands," *Mastozoología Neotropical*, vol. 23, no. 2, pp. 239-254, 2016.
- [42] F. A. Álvarez Castillo, "Caracterización y cuantificación del efecto de las hozaduras de jabalí (*Sus scrofa Linnaeus, 1758*) en el sotobosque de un bosque de *Araucaria-Lenga* en la Reserva Nasampulli, región de la Araucanía, Chile," (Trabajo de titulación, Universidad Austral de Chile), Valdivia, Chile, 2017.
- [43] J. Martín Vide, "¿Llueve menos hoy en el Mediterráneo que hace un siglo? El caso de Barcelona," 2023.
- [44] M. A. Porrás-Jiménez, L. G. Acosta-Vargas, M. Castillo-Ugalde, y R. Quesada-Monge, "Estructura y composición florística del bosque nuboso de la Isla del Coco," *Revista Tecnología en Marcha*, á-22, 2014.

- [45] M. Lemus-Cánovas y J. A. López-Bustins, "Variabilidad espaciotemporal de la precipitación en el sur de Cataluña y su relación con la oscilación del Mediterráneo occidental (WEMO)," 2016.
- [46] J. Hone, "Spatial and temporal aspects of vertebrate pest damage with emphasis on feral pigs," *Journal of Applied Ecology*, pp. 311-319, 1995.
- [47] J. Welander, "Spatial and temporal dynamics of wild boar (*Sus scrofa*) rooting in a mosaic landscape," *Journal of Zoology*, vol. 252, no. 2, pp. 263-271, 2000.
- [48] A. M. Monge-Ortiz, "Informe técnico para la declaratoria del cerdo feral (*Sus scrofa*) como especie invasora en el Parque Nacional Isla del Coco," (Documento técnico), SF.
- [49] A. Fenollosa Busquets, "La población de jabalíes de Collserola cae a la mitad en dos años por la sequía," *Ara*, Nov. 4, 2024. [Online]. Available: <https://es.ara.cat/>.
- [50] J. J. Montes Sánchez, "Determinación de aspectos corporales, reproductivos y dieta del cerdo asilvestrado (*Sus scrofa*) en la Reserva de la Biósfera Sierra La Laguna, Baja California Sur, México," 2010.
- [51] L. G. Acosta-Vargas, "Population status of the tree *Sacoglottis holdridgei* (Humiriaceae) at Isla del Coco National Park, Costa Rica," 2016.
- [52] A. L. J. Desbiez, S. A. Santos, A. Keuroghlian, y R. E. Bodmer, "Niche partitioning among white-lipped peccaries (*Tayassu pecari*), collared peccaries (*Pecari tajacu*), and feral pigs (*Sus scrofa*)," *Journal of Mammalogy*, vol. 90, no. 1, pp. 119-128, 2009.
- [53] M. L. Merino y B. N. Carpinetti, "Feral pig *Sus scrofa* population estimates in Bahía Samborombón conservation area, Buenos Aires province, Argentina," *Mastozoología Neotropical*, vol. 10, no. 2, pp. 269-275, 2003.
- [54] T. M. Gabor, E. C. Hellgren, y N. J. Silvy, "Multi-scale habitat partitioning in sympatric suiforms," *The Journal of Wildlife Management*, pp. 99-110, 2001.

- [55] D. W. Baber y B. E. Coblentz, "Density, home range, habitat use, and reproduction in feral pigs on Santa Catalina Island," *Journal of Mammalogy*, vol. 67, no. 3, pp. 512-525, 1986.
- [56] C. G. Z. Hegel y M. Â. Marini, "Impact of the wild boar, *Sus scrofa*, on a fragment of Brazilian Atlantic Forest," *Neotropical Biology and Conservation*, vol. 8, no. 1, pp. 17, 2013.
- [57] H. Cordero-Rebolledo, *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el cálculo del índice de erosión usando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) en la cuenca del río de Oro del municipio de Girón, Santander*, 2021.
- [58] A. L. Pedraza Villafaña, *Estimación de la erosión hídrica mediante dos métodos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) en la cuenca del río Chapingo, Texcoco*, 2015.
- [59] M. H. Alvarado-Anampa, M. Y. Escobar-Soldevilla, y V. G. Sánchez-Araujo, "Estimación del factor topográfico LS (RUSLE) mediante la aplicación de sistemas de información geográfica. Caso subcuenca Ichu, Huancavelica–Perú," *Polo del Conocimiento*, vol. 6, no. 10, pp. 66–81, 2021.
- [60] Lianes, E., Marchamalo, M., & Roldán, M. (2009). Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*.
- [61] FAO, Evaluación de los estados de erosión hídrica de los suelos y delimitación de áreas críticas por pérdida del horizonte A en la cuenca del Río Reventazón. Gobierno de Costa Rica, Informe Técnico No. 1-E, Roma: FAO, 1989, p. 133.
- [62] J. D. Armour, L. R. Hateley, y G. L. Pitt, "Catchment modelling of sediment, nitrogen and phosphorus nutrient loads with SedNet/ANNEX in the Tully–Murray basin," *Marine and Freshwater Research*, vol. 60, no. 11, pp. 1091–1096, 2009.

- [63] I. Y. Rengifo-Rengifo, F. A. Muñoz-Gomez, y O. A. Toro-Trochez, "Modelo USLE para estimar la erosión hídrica en siete municipios de la zona andina colombiana," *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 20, no. 2, pp. 29–44, 2022.
- [64] D. Rozos, H. D. Skilodimou, C. Loupasakis, y G. D. Bathrellos, "Application of the revised universal soil loss equation model on landslide prevention. An example from N. Euboea (Evia) Island, Greece," *Environmental Earth Sciences*, vol. 70, pp. 3255–3266, 2013.
- [65] D. Rojas Paez and Z. P. Villegas Rapalino, "Determinación de pérdida de suelo bajo distintas prácticas de ganadería altoandina," 2016.
- [66] M. Pando Moreno, M. Gutiérrez Gutiérrez, A. Maldonado Hernández, J. L. Palacio Prieto, and A. E. Estrada Castellón, "Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica," **Investigaciones geográficas**, no. 51, pp. 23–36, 2003.
- [67] Acosta-Vargas, L. G., & Pinto-Tomas, A. (2019). Influencia de la interacción planta-microorganismos en la restauración del paisaje forestal del Parque Nacional Isla del Coco [Informe técnico]. [Instituto Tecnológico de Costa Rica].