

ESCUELA DE POSGRADO

Efectos de la cobertura forestal en el control de erosión hídrica – Estudio de caso Subcuenca del Arroyo Pirapyta, Región Oriental del Paraguay

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTAE

en MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

José Manuel Vera Sosa

Turrialba, Costa Rica

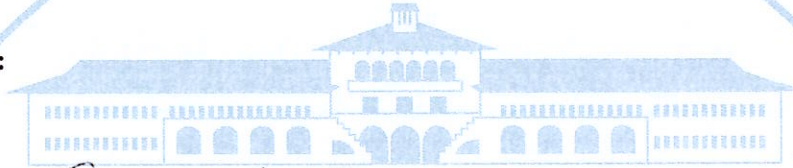
2024

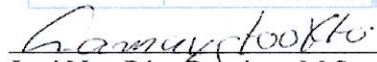
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

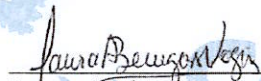
División de Educación


**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

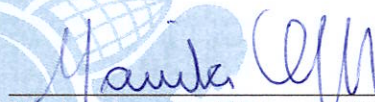
FIRMANTES:

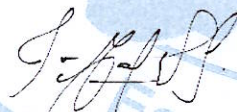



José Ney Ríos Ramírez, M.Sc.
Codirector de tesis


Laura Andrea Benegas Negri, Ph.D.
Codirectora de tesis


Haroldo Silva Imas, M.Sc.
Miembro Comité Consejero


Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, a.i. Escuela de Posgrado


José Manuel Vera Sosa
Candidato

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a mi hijo Gabriel; a mi abuela, Chichita, que me cuida desde arriba; y a mis padres, por apoyarme y motivarme en todo momento en mi formación profesional y académica.

Agradecimientos

A mi compañero, Ing. Jimmy Melgarejo, por darme la oportunidad de cursar esta maestría.

A mi compañero, Ing. Aldo Santacruz, por encaminar las gestiones correspondientes para la realización del curso de maestría.

A todos mis compañeros de trabajo de la División MAPA.CE, por su constante colaboración durante el periodo de trabajo de campo de esta investigación.

A mi compañera Rosalva Ramírez, por su ayuda para la gestión de mi viaje hasta el CATIE.

A mis profesores, Ney Ríos y Laura Benegas, por orientarme en la realización de este trabajo.

A mi compañero, Ing. Haroldo Silva, por su apoyo y orientación en la realización de este trabajo.

A los Sres. Benjamín Marín, Tobías Cáceres y Rogger Candia, por su asistencia durante la fase de trabajo de campo de esta investigación.

A mi compañero del Curso de Maestría, Rafael, por su amistad incondicional y compañerismo durante la estadía en el CATIE.

A mis compañeros Cassio, Pancho, José Daniel, Paula y Guido, por su amistad y los buenos momentos durante la estadía en CATIE.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	1
2. Materiales y Métodos.....	4
2.1. Área de estudio.....	4
2.2. Datos climatológicos	5
2.3. Tratamientos.....	5
2.4. Cuantificación de erosión.....	6
2.5. Caracterización vegetal	9
2. 6. Análisis estadísticos	10
3. Resultados y Discusión.....	12
3.1. Caracterización vegetal de los escenarios de cobertura forestal evaluados	12
3.1.1. Escenario cobertura forestal natural (T_0)	15
3.1.2. Escenario con cobertura forestal implantada (T_1).....	15
3.1.3. Escenario cobertura forestal degradada (T_2).....	15
3.2. Caracterización del suelo	15
3.3. Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica.....	18
3.4 Análisis estadísticos	18
4. Conclusiones.....	22
5. Recomendaciones	23
6. Bibliografía	24
7. Anexos	29

Lista de cuadros

Cuadro 1. Definición de tratamientos del estudio.....	6
Cuadro 2. Coordenadas UTM de parcelas de medición de erosión.....	7
Cuadro 3. Porcentaje de cobertura por estratos y cobertura de copa por tratamiento	13
Cuadro 4. Porcentaje de cobertura de suelo por tratamiento	15
Cuadro 5. Resultado de análisis de suelo.....	16
Cuadro 6. Densidad Aparente promedio.....	17
Cuadro 7. Pérdida de suelo promedio por erosión hídrica.....	18
Cuadro 8. Prueba DGC	19

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.....	4
Figura 2. Localización de parcelas de medición de erosión superficial por tratamiento.....	7
Figura 3. Esquema de parcela de medición de erosión.....	8
Figura 4. Esquema de parcela de estimación de diversidad vegetal.....	9
Figura 5. Esquema de parcela de estimación de cobertura de suelo.....	10
Figura 6. Precipitación total mensual en el área de estudio.....	12
Figura 7. Porcentaje de cobertura por estratos.....	14
Figura 8. Porcentaje de cobertura de copa por tratamiento.....	14
Figura 9. Densidad aparente del suelo.....	17
Figura 10. Pérdida de suelo promedio.....	18
Figura 11. Varianza entre tratamientos.....	19

Lista de acrónimos

BAAPA	Bosque Atlántico del Alto Paraná
BPCH	Bosques protectores de cauces hídricos
EBI	Entidad Binacional Itaipu
FPE	Franja de protección del embalse
MD	Margen derecha
PE	Poligonal Envolvente

Efectos de la cobertura forestal riparia en el control de erosión hídrica – Estudio de caso
Subcuenca del Arroyo Pirapyta, Región Oriental del Paraguay

José Manuel Vera Sosa¹

**¹Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza,
CATIE, Costa Rica.
Jose.vera@catie.ac.cr**

Resumen

La cobertura forestal brinda, entre otros beneficios, la protección de cauces hídricos ante procesos erosivos del suelo. En emprendimientos hidroeléctricos deriva en reducción de costos de mantenimiento y prolongación de vida útil del embalse, ya que contribuye al control de la colmatación del mismo. El emprendimiento hidroeléctrico gestionado por la Entidad Itaipu Binacional, en la Margen Derecha del Río Paraná (Paraguay), administra una franja terrestre, establecida para la protección del embalse, dentro de la cual se promueven la conservación de la naturaleza y la restauración forestal en sitios desprovistos de cobertura forestal. En su estado actual, dentro de esta franja se identifican diversos estados de cobertura forestal, como cobertura forestal natural e implantada, así como sitios desprovistos de esta, a consecuencia de uso de suelo agropecuario en épocas anteriores al establecimiento de la franja protectora. El objetivo de este trabajo consistió en estudiar el efecto de la cobertura forestal en el control de la erosión hídrica superficial, comparando distintos escenarios de cobertura forestal identificados en la franja riparia de protección del embalse, localizados dentro de la subcuenca del Arroyo Pirapyta, tributario del embalse de Itaipu (Departamento de Alto Paraná, Región Oriental del Paraguay), para lo cual fue estimada, de forma directa, la tasa de erosión en ton/ha. en los escenarios antes mencionados, y posteriormente, sometidos a análisis estadístico ANOVA, con el fin de determinar diferencias significativas entre tratamientos. Los resultados indican que el mayor valor promedio de erosión se da en el escenario “cobertura forestal degradada”, sin embargo, solo el escenario “cobertura forestal natural” se diferencia significativamente de los demás tratamientos. Se concluye que la cobertura forestal, principalmente si esta se observa en varios estratos, incluyendo cobertura a nivel suelo, contribuye efectivamente al control de la erosión hídrica, lo cual implicaría una mayor retención de sedimentos, y por ende la mitigación los impactos negativos y reducción de costos relacionados al emprendimiento hidroeléctrico. Se infiere, además, que a medida que la cobertura forestal implantada se vaya desarrollando a través del tiempo, se logrará una mayor efectividad en el control de sedimentos.

Palabras clave: cobertura forestal, erosión hídrica, sedimentación, embalse, emprendimiento hidroeléctrico, subcuenca.

Riparian forest cover effects on soil erosion control – Case study of Pirapyta Creek Sub watershed,
Oriental Region of Paraguay

José Manuel Vera Sosa¹

¹Tropical Agricultural of Research and Education Center.

CATIE, Costa Rica.

Jose.vera@catie.ac.cr

Abstract

Forest cover provides, among other benefits, the protection of water channels against soil erosion processes. In hydroelectric projects, they lead to a reduction in maintenance costs and extension of the useful life of the reservoir, since they contribute to mitigate the impacts of sedimentation on the reservoir. The hydroelectric venture managed by the Itaipu Binational Entity, on the Right Bank of the Paraná River (Paraguay), manages a land strip, established for the protection of the reservoir, within which nature conservation and forest restoration on degraded forest cover are promoted. In its current state, within this strip, various states of forest cover are identified, such as natural and implanted forest cover, as well as sites devoid of this, as a consequence of agricultural land use in times prior to the establishment of the protective strip. The objective of this work was to study the effect of forest cover on the control of surface water erosion, comparing different forest cover scenarios identified in the riparian strip protecting the reservoir, located within the Pirapyta Stream sub-basin, a tributary of the Itaipu Reservoir (Department of Alto Paraná, Eastern Region of Paraguay), for which the erosion rate in tons/ha was directly estimated. in the aforementioned scenarios. The results indicate that the highest erosion values occurred in the “degraded forest cover” scenario. Anyway, the “natural forest cover” scenario was the only treatment that has significant differences compared to her other treatments. It is concluded that forest cover, especially if it is observed at various canopy layers, including soil cover, effectively contributes to the control of water erosion, which would imply greater sediment retention, and therefore mitigating the negative impacts and reduction of costs related to the hydroelectric venture. It is also inferred that as the “implanted forest cover” scenario develops over time, greater effectiveness in sediment control will be achieved.

Palabras clave: forest cover, wáter erosion, sedimentation, reservoir, hydroelectric ventura, sub-basin.

1. Introducción

El ciclo hidrológico describe el movimiento del agua en sus diferentes estados y por medio de diferentes procesos (Encyclopedia Britannica, 2023), representado un continuo movimiento o transferencia de masas de agua impulsado por un flujo energético (Pulido-Bosch, 2007). Dentro del mismo, la escorrentía es el proceso por el cual el agua precipitada y no interceptada llega a la superficie terrestre y escurre por acción de la gravedad hacia los cauces hídricos (Davie, 2002), y el cual, a su vez, puede ocasionar en mayor o menor medida el desprendimiento y arrastre de partículas del suelo, dando origen a la erosión hídrica, y depositando finalmente estas partículas en forma de sedimentos en los cauces hídricos (Morgan, 2005; Cisneros et al, 2012). Estos procesos ocurren de forma natural y gradual, de forma casi imperceptible a corto plazo (Leopold et al, 1992) dentro de una cuenca hidrográfica, razón por la cual constituyen la unidad territorial adecuada para comprender el ciclo hidrológico y estudiar los impactos en ella generados por actividades antropogénicas (Ríos et al, 2013; Vázquez et al, 2016).

La cobertura forestal protege el suelo de la erosión hídrica, ya que la cobertura de copa de los árboles, presentes en diferentes estratos dentro del bosque, actúa como una barrera del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo (intercepción). Parte del agua interceptada regresa a la atmósfera (evaporación), y gran parte del agua que finalmente llega a la superficie terrestre se infiltra en el suelo, dada la capacidad de infiltración que presentan los suelos boscosos, reduciendo el agua de escorrentía y en consecuencia, el arrastre de las partículas de suelo (Lal, 1998; Durán-Zuazo y Rodríguez-Pleguezuelo, 2008; Hamilton, 2009; García-Chevesich, 2010), contribuyendo de esta manera a la preservación de los recursos hídricos.

De ese modo, troncos y tallos funcionan como obstáculos a nivel del suelo, promoviendo la sedimentación de partículas y contribuyendo al depósito de suelo. Las raíces, especialmente las de árboles con sistemas radiculares profundos, aumentan la capacidad de infiltración del agua en el subsuelo, reduciendo el volumen de escorrentía superficial y actuando como anclajes que previenen movimientos de masa o deslizamientos (Renard y Foster, 1983; Boix-Fayos et al., 2006; Quiroz-Marin e Hincapié-Gómez, 2007; Garcia-Chevesich, 2009, Brea y Balocchi, 2010; Mohammad y Mohammad, 2010).

En estudios sobre el efecto de los árboles en la erosión hidráulica, se destaca su capacidad general para mitigar la erosión superficial hídrica, especialmente cuando se encuentran intercalados en estratos diversos (Craswell et al., 1998). Sin embargo, es crucial considerar casos donde la presencia de árboles puede aumentar la erosión, debido a la acumulación de agua en hojas grandes y al fenómeno de stemflow a lo largo de los troncos (Gavito et al., 2012; Viles, 1990; Levia y Frost, 2003). Suelos bajo cobertura arbórea, ya sea natural o plantada, experimentan fuerzas erosivas menos agresivas, y las tasas de erosión son considerablemente menores en comparación con terrenos agrícolas (Pimentel y Kounang, 1998; McHugh et al., 2005).

En lo referente a embalses, la sedimentación podría, a su vez, ocasionar diversos impactos negativos a emprendimientos hidroeléctricos, como obstrucción de tomas, abrasión de máquinas hidráulicas, eutrofización, lo cual disminuye la eficiencia y aumenta los costes de reparación y mantenimiento (Morris et al, 1998; Alatorre y Beguería, 2009). La vida útil del embalse además varía en función de la capacidad de retención de sedimentos (Chaves, 2021).

La Entidad Binacional Itaipú (EBI) construida por medio del tratado para el aprovechamiento hidroeléctrico de los recursos hidráulicos del río Paraná (Tratado de Itaipu, 1973), administra el emprendimiento hidroeléctrico que dio origen al Lago Itaipú, embalse artificial de unos 29.000 hm³ con unos 170 km de extensión en línea recta y un área aproximada de 1.350 km² (Itaipu en números, s.f.).

En su Margen Derecha (MD) del río Paraná, fue establecida una franja de protección del embalse, también denominada Poligonal Envolvente (PE), delimitada entre la Cota 225 y una línea poligonal dentro de la cual se promueve la conservación natural y emprendimientos tendientes a la restauración de cobertura forestal, con el fin de proteger el embalse de la colmatación, además de dar cumplimiento a las acciones de responsabilidad medioambiental del emprendimiento (Ley n°. 752, 1973).

Desde el año 2015, dentro de la PE se viene ejecutando el Proyecto Itaipu Preserva, el cual pretende el restablecimiento de la cobertura forestal en la franja de protección del embalse para el año 2030, abarcando u área de 2.843 ha. (Proyecto Itaipu Preserva, s.f.). Sin embargo, dentro de la franja de protección del embalse fueron identificados sitios que aún se encuentran en estado de degradación, desprovistos de cobertura forestal y/o presencia de vegetación exótica, suelo

desnudo, cárcavas, y abrevaderos, evidenciando un uso de suelo con fines extractivos y/o agropecuarios en las décadas previas al establecimiento de la franja protectora, las cuales suman aproximadamente 1.246 ha. (Vera, 2019).

Desde el año 2017 viene realizándose el monitoreo de estas áreas en proceso de restauración forestal, a través de indicadores como cobertura forestal, abundancia y diversidad de especies forestales (Silva, 2017). La presente investigación orienta su propuesta a complementar dicho estudio desde una perspectiva de la hidrología forestal, ciencia que estudia en diferentes escalas la relación entre ecosistemas forestales y los procesos hidrológicos, así como las características del agua en cuanto a su cantidad y calidad (Sun et al, 2016), abarcando además el enfoque de cuencas hidrográficas.

Este estudio de caso realizado dentro de la subcuenca del arroyo Pirapyta (afluente del embalse de Itaipu) pretende estimar los efectos de la cobertura forestal en el control la erosión hídrica, para lo cual fue medida la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial, en diferentes escenarios de cobertura forestal y caracterizados dentro de la franja de protección del embalse (cobertura forestal natural, cobertura forestal implantada y sin cobertura forestal), utilizando una metodología de medición directa en terreno de la erosión superficial hídrica, mediante la instalación de clavos de erosión en parcelas. Posteriormente, los datos obtenidos de la medición fueron sometidos a análisis estadísticos ANOVA para determinar diferencias significativas entre tratamientos.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la subcuenca del arroyo Pirapyta, afluente del embalse de Itaipú (río Paraná) en el departamento de Alto Paraná, extremo este de la región Oriental del Paraguay. Las coordenadas geográficas del punto central del área de estudio son las siguientes: 25°17'04.6"S 54°36'43.9"W. En la figura 1 se observa un mapa del área de estudio, con la delimitación de la subcuenca del arroyo Pirapyta, para lo cual fue realizada una codificación mediante el sistema de codificación Otto Pfasstetter (Pfasstetter 1989; ANA, 2014), para definir el área geográfica de la subcuenca.

Dentro del área de estudio se estima una altitud entre los 250 y 450 m.s.n.m. La precipitación media anual de la región es de 1.800 – 2.000 mm, siendo la temperatura media anual de 21°C (Grassi, 2020). Los suelos presentes son los Oxisoles (López-Gosrostiaga et al, 1998).

Corresponde a la ecorregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA). Las principales actividades productivas son la agricultura y ganadería. Los usos/cobertura de suelo comprenden bosques naturales, bosques secundarios, bosques degradados, bosques de ribera, zonas bajas inundables, plantaciones forestales, zonas de conservación y usos agropecuarios. El área de influencia de Itaipu fue declarada Reserva de la Biósfera por la UNESCO en el año 2017.

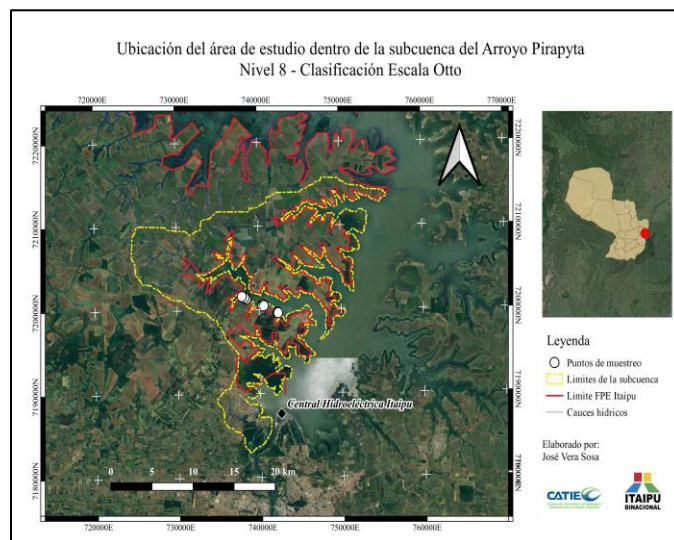


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Fuente: Elaboración propia

2.2. Precipitación

Los datos de la precipitación diaria del área de estudio, durante el periodo de la investigación (abril a noviembre del año 2023), fueron solicitados al Departamento de Embalse y Áreas protegidas de la EIB, la cual cuenta con sus propias estaciones meteorológicas distribuidas dentro del área de embalse.

2.3. Tratamientos

Dentro del área geográfica, que abarca la subcuenca del Arroyo Pirapyta, y dentro de los límites de la PE, se realizó un muestreo por conveniencia; fue seleccionado un sector de la PE en donde se encontraron los 3 estados de cobertura forestal (tratamientos) principales ubicados en forma aledaña para evitar la variabilidad por efecto de la distancia. Como tratamientos fueron establecidos los siguientes:

- T0 – Cobertura forestal natural: comprende un área de aproximadamente 78 ha., presenta una cobertura forestal exuberante, con gran cantidad de especies arbóreas, representando un bosque nativo característico del BAAPA de la zona, con poca a casi nula intervención antrópica, y dentro del cual actualmente no se realizan intervenciones.
- T1 – Cobertura forestal implantada: comprende un área en proceso de restauración forestal y establecida durante el año 2016, con una superficie de aproximadamente 18 ha., y en donde la cobertura forestal implantada fue establecida en el año 2017, realizándose actualmente intervenciones consistentes en control de malezas, control de hormigas y mantenimiento de caminos y cortafuegos.
- T2 - Cobertura forestal degradada: abarca un área de aproximadamente 4 ha., sin presencia de árboles, cubierto casi totalmente por gramínea exótica, producto de explotación ganadera intensiva, en los años previos a la designación del área como Franja de Protección del Embalse (T₂). En el cuadro 1 se detalla la descripción de cada tratamiento, pudiéndose además observar, en anexo 7, sus respectivas imágenes de referencia.

Cuadro 1. Definición de tratamientos del estudio

N° de tratamiento (T)	Situaciones de cobertura forestal	Indicadores
T₀ (testigo)	Cobertura forestal natural	Se observa un bosque natural sin o con muy leve perturbación antrópica. La cobertura de copa es alta. Abundancia de especies arbóreas, con presencia en varios estratos. Suelo cubierto por herbáceas y materia orgánica.
T₁	Cobertura forestal implantada	Se observa una cobertura forestal implantada. La cobertura de copa es media a alta. Algunas especies arbóreas, con presencia en estratos inferiores a medios. Suelo cubierto principalmente por herbáceas y gramíneas, observándose además suelo desnudo y escasa presencia de materia orgánica.
T₂	Cobertura forestal degradada	Se observa sitio cubierto casi en su totalidad por gramíneas exóticas, y poca o nula cobertura forestal; solo permanecen en pie algunos individuos arbóreos implantados. No se observa cobertura de suelo por materia orgánica.

Fuente: Elaboración propia

2.4. Cuantificación de erosión

Con el fin de cuantificar la erosión superficial hídrica, se utilizó el método de clavos o varillas de erosión agrupados en parcelas, según metodología respaldada por Haig, 1977, Pizzarro et al, 2002 y Vázquez et al, 2011. Dentro de cada tratamiento, fueron establecidas 3 parcelas (repeticiones), para un total de 9 parcelas en todo el estudio (ver figura 2). Con el fin de contrarrestar el efecto de variabilidad espacial fueron considerados criterios de pendiente y orientación de terreno, para lo cual se utilizó el software SAGA. Un modelo de orientación de pendiente fue elaborado (orientación de pendiente de 0° - 22,5° N, respecto al norte magnético y rango de inclinación de pendiente del 15 – 20 % (pendiente suave). Los puntos de ubicación de las parcelas fueron distribuidos dentro del área delimitada de manera a abarcar lo más representativamente posible todos los sectores del área dentro de cada tratamiento. Cada punto demarcado constituyó el vértice noroeste de cada parcela (ver cuadro 2).

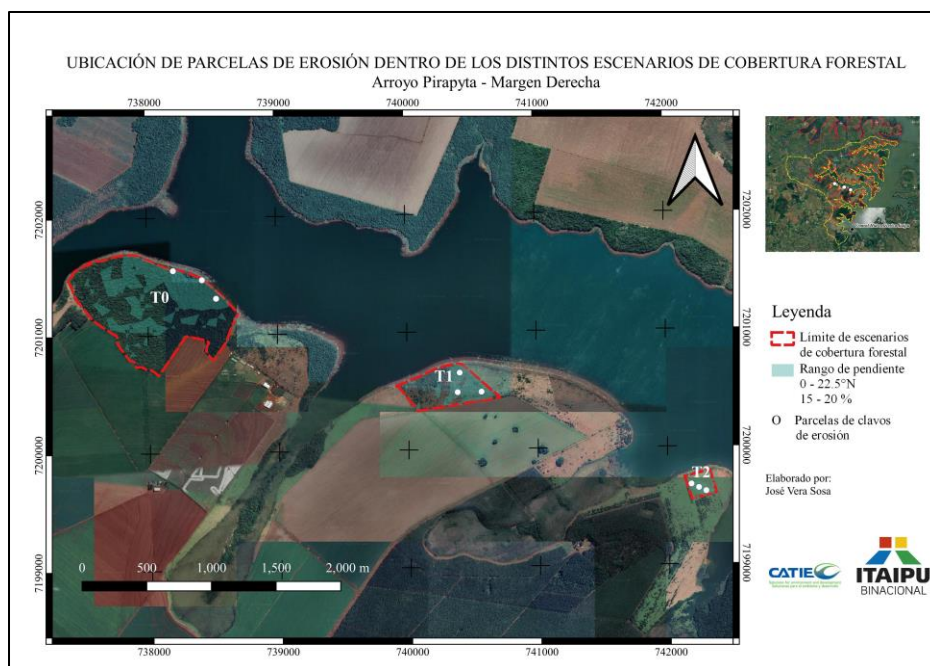


Figura 2. Localización de parcelas de medición de erosión superficial por tratamiento.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 2. Coordenadas UTM de parcelas de medición de erosión

Tratamiento	Coordenadas UTM	
T0R1	N 7201310	E 738531
T0R2	N 7201465	E 738422
T0R3	N 7201577	E 738200
T1R1	N 7200484	E 740384
T1R2	N 7200485	E 740569
T1R3	N 7200649	E 740403
T2R1	N 7199671	E 742183
T2R2	N 7199646	E 742237
T2R3	N 7199617	E 742293

Fuente: Elaboración propia

Las parcelas contaron con 4 filas, conteniendo cada una de ellas 12 varillas, sumando un total de 36 varillas por parcela, estableciéndose una distancia de 1 m entre filas y de 50 cm entre cada varilla dentro de las filas. Fueron utilizadas varillas de hierro de dimensiones de 30 cm de longitud y 6 mm de diámetro. Las mismas fueron marcadas con cintas adhesivas en el punto hasta donde fueron enterradas en el suelo (15 cm), y colocadas en terreno durante el mes de abril.

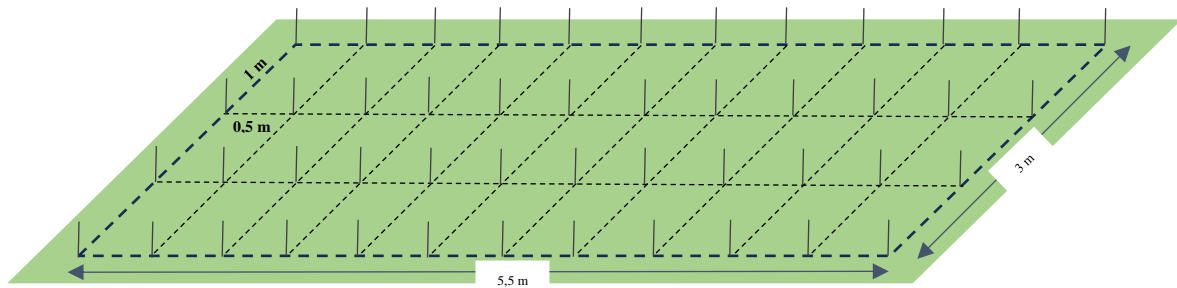


Figura 3. Esquema de parcelas de medición de erosión. Fuente: Elaboración propia

Las mediciones de cada varilla fueron realizadas durante el mes de noviembre del año 2023. Fueron medidas las variaciones del nivel del suelo con respecto al punto marcado en las varillas, mediante el empleo de una regla metálica, al costado de cada varilla (precisión de regla), y los datos obtenidos fueron registrados en planillas de campo. Fueron registradas con signo + en caso de erosión (nivel del suelo por debajo del punto marcado en las varillas) y con signo – en caso de sedimentación (nivel del suelo por encima del punto marcado en las varillas). Además, fueron recolectadas 3 muestras de suelo inalteradas dentro de cada tratamiento, totalizando 9 muestras, para lo cual fueron utilizados cilindros metálicos de 5 cm de diámetro x 10 cm de altura, con el fin de determinar la densidad aparente y la textura del suelo, utilizando el método del tamizado, en laboratorio.

Una vez finalizada la recolección de datos, éstos fueron digitalizados en planillas electrónicas de Excel y fue realizado el cálculo de Erosión Neta, en milímetros, mediante la siguiente fórmula.

$$E_{\text{neta}} = \text{Sedimentación} - \text{Pérdida de suelo}$$

En el laboratorio, fue calculada la densidad aparente del suelo mediante la siguiente fórmula.

$$D_A \text{ (g/cm}^3\text{)} = \text{masa de suelo seca} / \text{volumen del cilindro}$$

De los datos obtenidos de densidad aparente fue calculado el promedio de cada tratamiento.

Posteriormente, se procedió a cuantificar la erosión superficial (ton/ha) mediante la siguiente fórmula:

$$E = D_A * h$$

Donde,

E = Erosión (ton/ha)

D_A = Densidad aparente (g/m^3)

h = Altura de suelo erosionado o sedimentado (mm)

Finalmente, fueron calculados los promedios de erosión superficial (ton/ha) por cada tratamiento.

2.5. Caracterización vegetal

La caracterización de cobertura vegetal dentro de los distintos escenarios se realizó mediante de levantamiento de datos de diversidad vegetal, estructura vertical, cobertura de copa, y cobertura a nivel suelo, en base a la metodología utilizada por Ríos (2006).

Para estimar la diversidad vegetal fue establecida una parcela por tratamiento (50m x 20m). La misma fue dividida en dos mitades mediante el trazado de una línea en la mitad de la parcela y a lo largo de ella. Posteriormente fueron registrados los individuos arbóreos que se encontraran a 0,5 m de la línea central, y con un DAP igual o superior a 5 cm (ver figura 4).

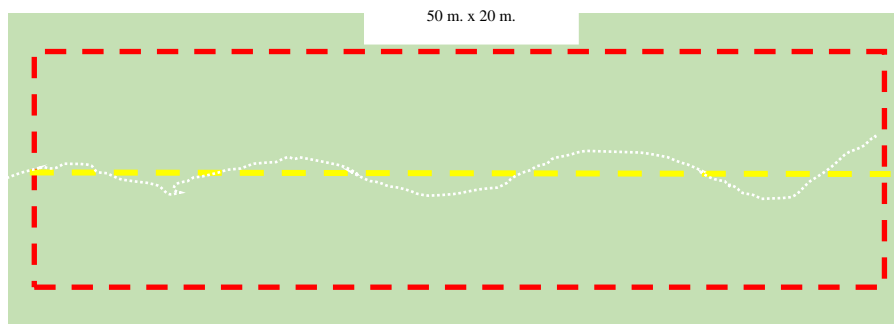


Figura 4. Esquema de parcela de estimación de diversidad vegetal

Para estimar la cobertura a nivel suelo fue realizada, primeramente, una división de la parcela principal en subparcelas (10 m x 10 m). En cada una de las subparcelas, fueron realizadas observaciones en sus vértices y en el centro (5 puntos por cada subparcela, totalizando 50 observaciones), y valiéndose de un marco de tubos de plástico (0,5 x 0,5 m), fue estimado el porcentaje de cobertura de gramíneas, herbáceas, suelo desnudo y materia orgánica. Posteriormente, fue calculado el promedio de porcentajes de cada tipo de cobertura (ver Figura 5).

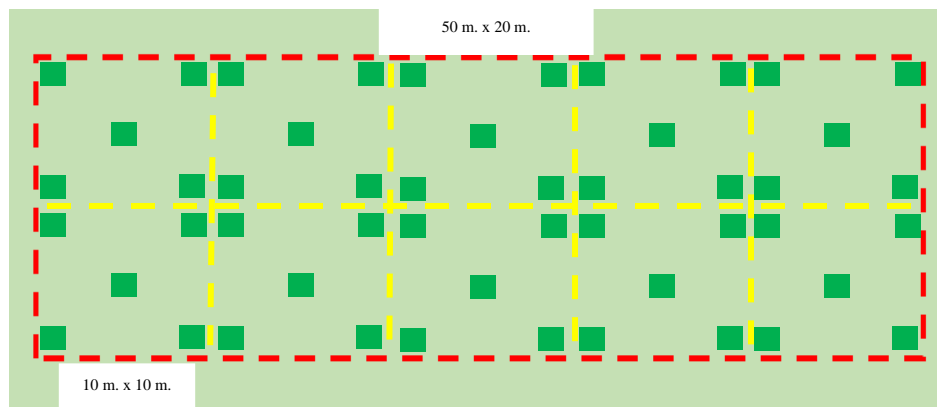


Figura 5. Esquema de parcela para estimación de cobertura de suelo

Para estimar la estructura vertical, dentro de cada subparcela, fueron considerados 4 estratos de altura (0 a 2 m, 2 a 9 m, 9 a 20 m y mayores a 20) estimando el porcentaje de cobertura vegetal en cada uno de los estratos. Posteriormente, fue calculado el promedio por estrato.

Para estimar la cobertura de copa, dentro de cada subparcela, fueron realizadas observaciones en sus 4 vértices, mediante el empleo de un densiómetro. Posteriormente, fue calculado el porcentaje promedio de cobertura de copa dentro de cada subparcela y finalmente, por cada tratamiento.

2. 6. Análisis estadísticos

Los datos obtenidos de la medición de las varillas de erosión (cm) de cada tratamiento fueron comparados estadísticamente utilizando el test de ANOVA bajo el enfoque de modelos lineales mixtos, con el efecto fijo de tratamiento, y con un intervalo de confianza del 10%, para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Posteriormente, se procedió a realizar la prueba DGC para determinar cuál de los tratamientos presenta diferencia con respecto a los demás. Se utilizó el software estadístico Infostat.

3. Resultados y Discusión

3.1. Precipitación

Al analizar la precipitación diaria en mm durante los meses del estudio en 2023, se observan variaciones en la distribución de la lluvia a lo largo del tiempo.

Octubre fue el mes con la mayor cantidad de precipitación acumulada, registrando un total de 328,3 mm. En contraste, mayo experimentó la menor cantidad de precipitación, alcanzando solo 72,8 mm. El total de precipitación durante el periodo del estudio fue de 1.312 mm., siendo el promedio de 164,01 mm.

En la figura 6 se observa el resumen de precipitación total mensual, obtenido de la tabla en Anexo 1, proporcionado por el Departamento de Embalse y Áreas Protegidas de la EBI.



Figura 6. Precipitación total mensual en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por la División de Embalse - Itaipú Binacional (2023)

3.2 Caracterización vegetal de los escenarios de cobertura forestal evaluados

La caracterización de cobertura vegetal dentro de los escenarios estudiados se efectuó a partir del levantamiento de datos de diversidad vegetal, estructura vertical, cobertura de copa y cobertura a nivel suelo.

Los resultados de diversidad vegetal indican que el T0 obtuvo el mayor número de especies registradas, seguido del T1. En cuanto al T2, el mismo no registró especies arbóreas (ver anexo 3).

Los resultados de porcentaje de cobertura por estratos destacan la presencia del T0 en todos los estratos, a diferencia de los otros dos tratamientos, ya que el T1 registró presencia solo en los dos estratos inferiores (0 – 2 m y 2 – 10 m), así como el T2 tan solo registró presencia en el estrato inferior (0 – 2 m). En cuanto a cobertura de copa, El mayor valor obtuvo el T0 (94,39 %), mientras que el T1 obtuvo un porcentaje del 79,8%. El T2 no registra cobertura de copa. En el cuadro 3, así como en las figuras 7 y 8, se puede observar en detalle los resultados obtenidos de porcentaje de cobertura por estratos y cobertura de copa.

Cuadro 3. Porcentaje de cobertura por estratos y cobertura de copa por tratamiento

Tratamiento – Escenario	Cobertura por estratos (%)				Cobertura de copa (%)
	0 - 2 m	2 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m	
T0 - Cobertura forestal natural	83	72	70.5	21	94.39
T1 - Cobertura forestal implantada	79.5	81	0	0	79.32
T2 - Cobertura forestal degradada	100	0	0	0	0.00

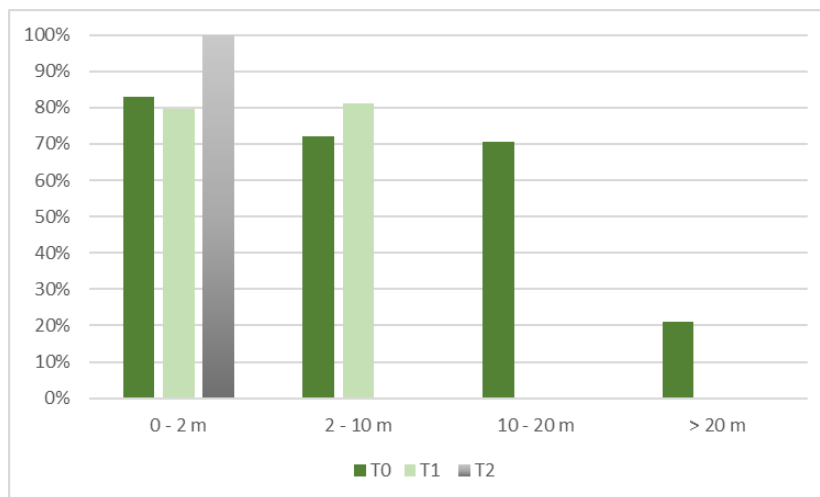


Figura 7. Porcentaje de cobertura por estratos

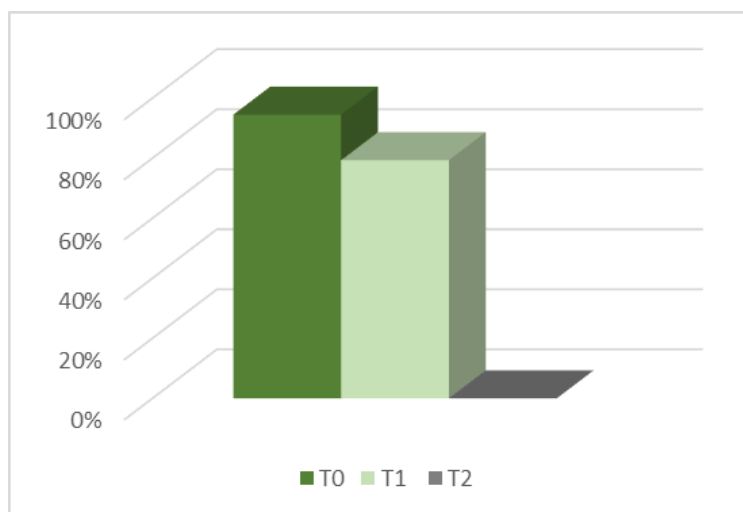


Figura 8. Porcentaje de cobertura de copa por tratamiento

Del mismo modo, fue estimado el porcentaje de cobertura de gramíneas, herbáceas, suelo desnudo y materia orgánica, para posteriormente calcularse el promedio de porcentajes de cada tipo de cobertura. Estos resultados se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Porcentaje de cobertura de suelo por tratamiento

Tratamiento – Escenario	Cobertura de suelo (%)			
	Gramínea	Herbácea	Suelo desnudo	Mat. org.
T0 - Cobertura forestal natural	0	54.3	3.1	94.5
T1 - Cobertura forestal implantada	32.8	22.6	10.9	66.1
T2 - Cobertura forestal degradada	100	0	0	0

3.2.1. Escenario cobertura forestal natural (T₀)

Presenta abundancia de árboles por ha. Las especies identificadas fueron *Citrus aurantium*, *Cordia trichotoma*, *Bauhinia forficata*, *Sorocea bomplandii*, *Plinia rivularis*, *Cabralea canjerana*, *Crysophyllum marginatum*, *Nectandra angustifolia* (2) y una especie no identificada perteneciente a la familia Myrtaceae. Presenta cobertura en todos los estratos. Fue estimada una cobertura de copa del 94%.

3.2.2. Escenario con cobertura forestal implantada (T₁)

Las especies identificadas dentro de la parcela fueron *Croton urucurana*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Handroanthus albus*, *Solanum granulo-leprosum* y *Peltophorum dubium*. Presenta cobertura solo en los dos estratos inferiores (0 – 2 y 2 -10 m). Fue estimada una cobertura de copa del 79%.

3.2.3. Escenario cobertura forestal degradada (T₂)

La única especie vegetal identificada fue la gramínea *Brachiaria brizanta*, de aproximadamente 1 m. de altura, No se observa ningún otro tipo de cobertura forestal y solo presenta individuos en el estrato inferior (0 – 2 m).

3.3. Caracterización del suelo

Con el fin de caracterizar el suelo, se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para clasificar las muestras de suelo proporcionadas, empleando una evaluación visual en el campo y enviándolas al laboratorio de suelos de la empresa GEOSTAN S.R.L., para la determinación de propiedades granulométricas y plásticas. Estos ensayos se realizaron de acuerdo con las Reglas y Normas del

ASTM Comité D-18, que utiliza el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Para la caracterización de la granulometría por vía seca mediante tamizado, se aplicó la normativa ASTM D421.

Así también, se llevaron a cabo nueve ensayos de densidad aparente siguiendo las indicaciones de las normativas ASTM D2937-71. Estos ensayos proporcionaron información en relación con la compactación y estructura del suelo. Por último, se aplicó la clasificación USDA (Soil Survey Manual, 2017), que se basa en el tamaño de las partículas del suelo, dividiéndolas en tres grupos: arenas, limos y arcillas. La textura del suelo se define según las proporciones de estos componentes, permitiendo una clasificación precisa de las muestras de suelo estudiadas. El resumen de los resultados se presenta en el Cuadro 5, así como en el anexo 8.

Cuadro 5. Resultado de análisis laboratorial de suelo

Tratamiento	Repetición	Densidad aparente (kg/cm³)	Clasificación granulométrica
T0	1	0,975	Franco limoso
	2	1.041	Franco limoso
	3	0.847	Franco limoso
T1	1	1.056	Franco limoso
	2	1.041	Franco Limoso
	3	1.034	Franco limoso
T2	1	1.035	Limo
	2	0.996	Franco limoso
	3	1.055	Franco limoso

Fuente: Elaboración propia, en base a resultados de análisis laboratorial de muestras de suelo

En términos de densidad aparente, se observa variabilidad en los valores registrados, siendo T0 el tratamiento con la densidad aparente más baja (0.847 kg/cm³) en la repetición 3 del mismo y el T1 con la más alta (1.056 kg/cm³) en la repetición 1. Estos resultados indican diferencias en la compactación y estructura de suelos entre los tratamientos.

En cuanto a la clasificación granulométrica, se identifican predominantemente suelos de textura franco-limosa en las repeticiones de T0 y T1, con algunos valores cercanos a la categoría de limo. En el caso de T2, la textura del suelo varía entre limo y franco limoso. Esta clasificación es coherente con la presencia relativa de partículas de arena, limo y arcilla en cada tratamiento, reflejando la diversidad en la composición granulométrica de los suelos bajo estudio.

A partir de estos datos se calculó el promedio para cada tratamiento, cuyos resultados se exponen en el cuadro 6.

Cuadro 6. Densidad Aparente promedio

Tratamiento	Densidad aparente promedio (kg/cm ³)
T0	0.954
T1	1.044
T2	1.029

La densidad aparente promedio es de 0.954 kg/cm³ para el T0, 1.044 kg/cm³ para el T1 y 1.029 kg/cm³ para el T2 (ver figura 9). En el caso del T0 la densidad aparente es baja y en el T1 y T2 es moderada (Pritchett, 1990).

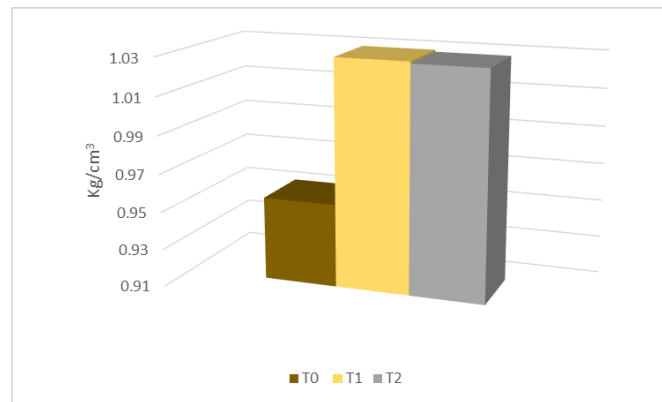


Figura 9. Densidad aparente del suelo (kg/cm³)

3.4. Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica

A partir de los datos la erosión superficial, se estimó la erosión promedio, cuyos resultados se presentan en el cuadro 7 y figura 10.

Cuadro 7. Pérdida promedio de suelo por erosión hídrica

Tratamiento	Erosión promedio (Ton/ha)
T0	10.56
T1	35.53
T2	46.88

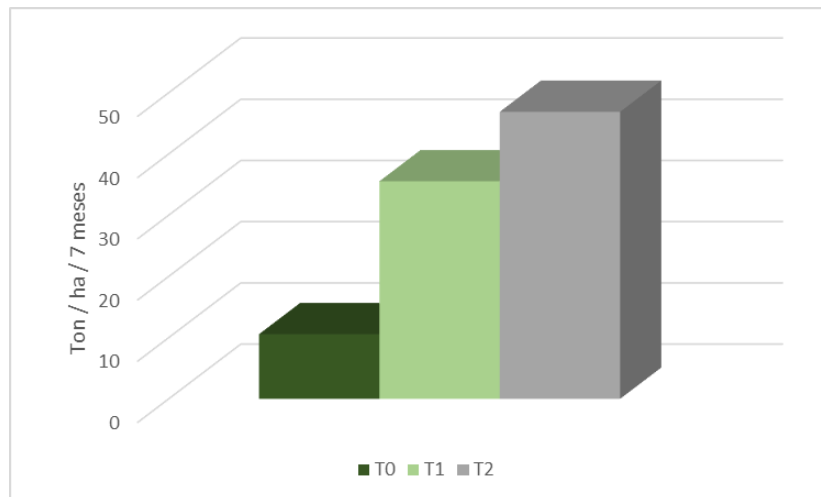


Figura 10. Pérdida de suelo promedio

3.5. Comparación entre tratamientos

Se realizaron comparaciones estadísticas de las mediciones de las varillas de erosión entre los tratamientos mediante el análisis de varianza, bajo el enfoque de modelos lineales mixtos. Este análisis incluyó un efecto fijo para el tratamiento, con un intervalo de confianza del 10%, para identificar posibles diferencias significativas entre los tratamientos. Mediante el Análisis de Varianza (ANOVA) se determinó que existen diferencias significativas entre los tratamientos, teniendo en cuenta el p-valor de 0.089, para un nivel de significancia de 0.1 (Ver figura 11).

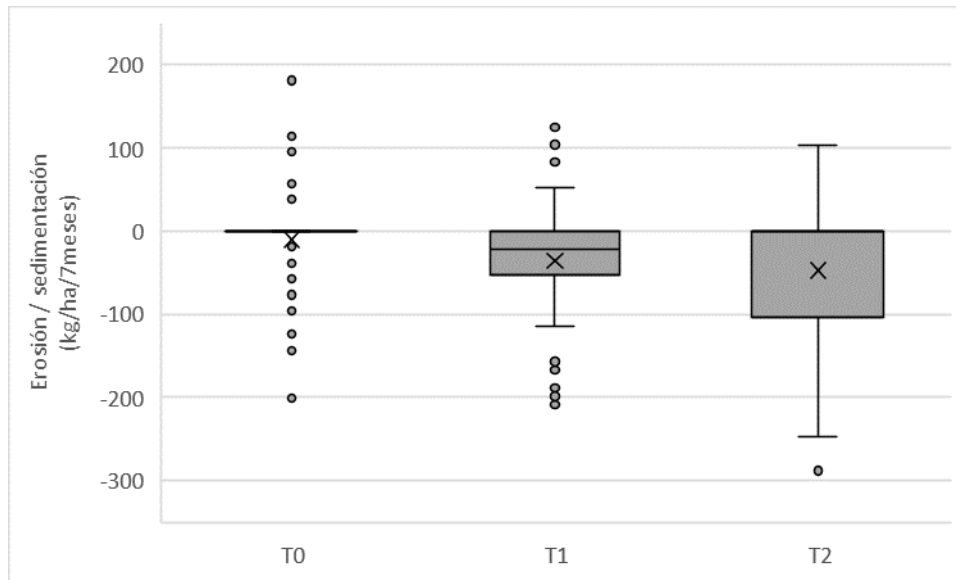


Figura 11. Varianza entre tratamientos

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis Ad Hoc para determinar cuáles de los tratamientos exhiben diferencias significativas entre sí. La prueba de medias que se utilizó es la DGC y se puede observar que la erosión del tratamiento T0 es diferente significativamente de los tratamientos T1 y T2 (ver Cuadro 8.)

Cuadro 8. Prueba DGC

Trat	Medias	E.E.	
T0	-10.56	9.63	A
T1	-35.53	9.63	B
T2	-46.88	9.63	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

El T2 - Cobertura forestal degradada, presenta el mayor valor de erosión promedio entre los tres tratamientos (46.88 Ton/ha). Esto podría explicarse por el hecho de que este tratamiento solo presenta cobertura en el estrato inferior (0-2 m) con nula cobertura de copa y contenido de materia orgánica en el suelo. Los datos de densidad aparente del suelo además indican que podría tratarse de un suelo altamente compactado, lo cual favorecería a la erosión del mismo.

El T1 – Cobertura forestal implantada, presenta un valor de erosión promedio menor que el T2 (35,53 Ton/ha), sin embargo, entre ambos tratamientos no se observan diferencias estadísticamente significativas. Este resultado podría explicarse por el hecho de que efectivamente,

este tratamiento presenta una mejor protección del suelo ante procesos erosivos que el T2 (presencia de cobertura forestal en los estratos 0 – 2 y 2 -10 m. y cobertura de copa del 79%) aunque en contrapartida se observa un mayor porcentaje de suelo desnudo (10.9 % para T1 vs. 0% para T2). Además, se destaca que el suelo del T1, es el que presenta una mayor densidad aparente promedio entre todos los tratamientos (1.044). Este último resultado, el cual se explicaría por el hecho de una intervención intensa en el terreno por el establecimiento de la plantación y demás intervenciones silviculturales de mantenimiento, sería otro factor que contribuiría a un menor control de erosión del suelo.

El T0 – Cobertura forestal natural presenta el menor valor de erosión promedio (10,56 Ton/ha), y según resultados de análisis estadísticos, es el tratamiento que presenta diferencias significativas respecto a los demás tratamientos, lo cual sugiere que la cobertura forestal natural en este escenario, con presencia en todos los estratos y cobertura de copa del 94%, además del alto contenido de materia orgánica en el suelo (94%), así como menor densidad aparente del suelo (0.954 kg/cm³), contribuyen efectivamente al control de la erosión hídrica superficial del suelo.

La diferencia significativa entre T0 y T1 indica que la cobertura forestal implantada aun dista significativamente de controlar la erosión con la misma efectividad que en un escenario de cobertura forestal natural. Esto podría explicarse por el hecho de que, si bien el T1 presenta una cobertura de copa del 79%, existe una gran diferencia en cobertura de copa por estratos entre ambos tratamientos (T0 presenta cobertura en todos los estratos, mientras que T1 presenta cobertura tan solo en los estratos inferiores), además de la cobertura de suelo (T0 presenta un suelo mejor cubierto que T1), así como los valores de densidad aparente, el cual podría deberse precisamente a las características de cobertura vegetal. Estos resultados están en concordancia con lo expuesto por Labriere et al, (2015), quienes, en su resumen de recopilación de estudios de medición de erosión hídrica en los trópicos húmedos, concluyen que varias capas de cobertura forestal, incluyendo la cobertura a nivel suelo, son necesarias para un control efectivo de erosión, ya que estas capas ayudan a frenar la energía cinética de las gotas de lluvia que llegan al suelo.

Se infiere, además, que el suelo en T1 aun no presenta las características de un suelo observable en un escenario de bosque natural, menos compactado, con mayor porosidad, con mayor presencia de materia orgánica, lo cual hace que el suelo presente también una mayor capacidad de absorción del agua de escorrentía.

Sin embargo, como se observan en los resultados, que el T1 presenta valores promedios de erosión menores a T2 (aunque sin diferencias significativas), se espera que con el transcurrir del tiempo, este escenario evolucionaría, presentando características de cobertura vegetal y suelo similares a las de un bosque natural. Cabe resaltar, no obstante, que los valores promedios de densidad aparente del suelo entre T1 y T2 arrojaron resultados similares, lo cual reforzaría la idea de que el T1 aun muestra altos signos de compactación, ya que, previo a la implantación de árboles, se trataba de un terreno degradado, similares a las características de cobertura vegetal que presenta actualmente el T2.

Estos resultados concuerdan con Quispe (2018), cuyo objetivo fue evaluar la influencia de la cobertura forestal en la erosión hídrica del suelo, en una ladera de la comunidad de San Mateo, Lima (Perú), el cual, si bien fue realizado en condiciones medioambientales que difieren bastante a las del presente estudio (distintas características edafológicas, topográficas y climáticas), concluye que la cobertura vegetal protege eficientemente el suelo de la erosión hídrica, ya que todos los tratamientos que presentaban algún tipo de cobertura vegetal arrojaron resultados menores de pérdida de suelo (10,9 Ton/ha/año para suelo con cobertura forestal, 17,1 Ton/ha/año para suelo con cobertura mulch y 28,65 Ton/ha/año para suelo natural) respecto al tratamiento testigo, consistente en suelo desnudo (44,85 Ton/ha/año).

Karas et al (2015), en un estudio realizado en la región del Mediterráneo, establece un valor máximo de tolerancia de 11,2 Ton/ha/año de pérdida de suelo; si bien este es un parámetro sitio-específico y además depende del tipo de cultivo o plantación que se realiza en el suelo, el valor indicado por los autores está muy por debajo de los tratamientos T1 y T2, siendo el T0 el único tratamiento que se encuentra dentro del rango máximo de tolerancia de pérdida de suelo. Cabe señalar que los autores definen a la tolerancia de pérdida de suelo como “el nivel máximo aceptable de pérdida de suelo dentro de un área, el cual permitiría un alto nivel de productividad”.

Si bien existen varios estudios en los cuales se utilizó la misma metodología, los mismos fueron realizados en condiciones y con objetivos muy diferentes a lo del presente estudio (medición de erosión en laderas, comparación de la erosión dentro de diferentes cultivos agrícolas entre otros), por lo cual no son contrastados con esta investigación.

4. Conclusiones

La complejidad estructural de una cobertura forestal influye en el control de la erosión hídrica superficial. Los sitios con una composición estructural más compleja, como los bosques nativos con numerosas especies y una cobertura de copa en todos los estratos, poseen suelos porosos con alta capacidad de infiltración de agua de escorrentía. Estas características permiten una mayor retención de las gotas de lluvia y reducen el desprendimiento de partículas de suelo, lo que resulta en un mejor control de la erosión.

La cobertura forestal implantada (vía procesos de restauración), aunque aún en desarrollo, muestra indicios de ser más efectiva en el control de la erosión en comparación con la cobertura forestal degradada. Aunque su composición estructural es más simple que la de un bosque natural, se observan beneficios en términos de reducción de la erosión. Se espera que, con el tiempo y el proceso de restauración forestal, la cobertura implantada adquiera características de diversidad y complejidad similares a las de un bosque natural, lo que contribuirá aún más al control de la erosión.

La restauración forestal es fundamental para controlar la erosión hídrica superficial y mitigar sus impactos. La gestión adecuada de la cobertura arbórea desempeña un papel esencial en la protección contra la erosión y la sedimentación en la zona de estudio. Los sitios con cobertura forestal degradada son vulnerables a procesos erosivos, lo que destaca la importancia de implementar estrategias de restauración en áreas similares.

La preservación de la calidad del agua y la prolongación de la vida útil del embalse de Itaipú dependen en gran medida de la presencia y gestión adecuada de la cobertura arbórea. Al reducir los niveles de sedimentación, la cobertura forestal contribuye a mantener la calidad del agua en el embalse y a garantizar la eficiencia del emprendimiento hidroeléctrico.

5. Recomendaciones

Se recomienda replicar la metodología utilizada en este estudio en otras áreas, tanto dentro de la franja de protección del embalse, como en otros sitios dentro de la cuenca del embalse de Itaipu. Para obtener resultados más precisos, se sugiere aumentar el número de repeticiones por tratamiento y prolongar la duración del estudio; e incluso combinar con nuevas metodologías. Esto permitirá obtener información más robusta sobre el control de la erosión y sus efectos en diferentes escenarios.

Es importante establecer programas de monitoreo a largo plazo para evaluar la evolución de la cobertura forestal, especialmente en el caso de la cobertura forestal implantada. Esto ayudará a verificar la efectividad de la restauración forestal en el control de la erosión hídrica en diferentes etapas de consolidación. Además, el monitoreo a largo plazo será útil para tomar decisiones y aplicar medidas correctivas según sea necesario.

Se sugiere realizar análisis climáticos más detallados para comprender cómo los patrones de lluvia afectan la erosión hídrica. La variabilidad en la precipitación mensual fue evidente en el estudio, y se considera que explorar las relaciones entre eventos climáticos extremos y la pérdida de suelo mejorará la capacidad predictiva y adaptativa de las medidas de manejo. Esto permitirá ajustar las estrategias de conservación y mitigación de la erosión en función de los patrones climáticos observados.

6. Bibliografía

- ANA (Agencia Nacional de Agua, Brasil). 2014. Codificação de bacias hidrográficas pelo método Otto Pfafstetter (en línea). Consultado 12 ene. 2023 Disponible en <https://capacitacao2.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/104/1/apostila.pdf>
- Boix-Fayos, C.; Martínez Mena, M.; Arnau Rosalén, E.; Calvo Cases, A.; Castillo, V.; Albaladejo, J. 2006. Measuring soil erosion by field plots: understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews*, 267-285.
- Brea, J.D.; Balocchi, F. 2010. Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas. UNESCO-ISI-AZALAC-Universidad de Talca-INA-EIAS, 1-138.
- Chavez, H. 2021. Perspectiva del estado de los sedimentos en Brasil. En P. García-Chevesich, R. Pizarro, C. Lehmann, & G. Martínez, Estado actual de la gestión de sedimentos en nueve países de las Américas (págs. 33-46). Montevideo: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- Cisneros, J.; Cholaky, C.; Cantero, A.; González, J.; Reynero, M.; Diez, A.; Bergesio, L. 2012. Erosión hídrica: Principios y técnicas de manejo. Río Cuarto: Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Craswell, E.T.; Sajjapongse, A.; Howlett, D.J.B.; Dowling, A.J. 1998. Agroforestry in the management of sloping lands in Asia and the Pacific. *Tropical Agroforestry Research Springer*, 121-137.
- Davie, T. 2002. *Fundamentals of Hidrology*. Segunda Edición. Routledge Fundamentals of Physical Geography. Taylor & Francis Group. Nueva York. 221 p
- Durán-Zuazo, V.H.; Rodríguez-Pleguezuelo, C.R. (2008). Soil-erosion y runoff prevention by plant covers. *Agronomy for Sustainable Development*, 65-86.
- Encyclopedia Britannica. 2023. Water Cycle (en línea). Consultado 17 ene. 2023. Disponible en <https://www.britannica.com/science/water-cycle>.

- García-Chevesich, P. 2010. Factores que afectan la erosión y la sedimentación. In Brea, J; Balocchi, F (eds.). Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas: Volumen 1. N.º 22. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). p. 9-21.
- Gavito-Pardo, M.E.; Astier-Calderón, M.; Ayala-Barajas, R.; Ramírez-García, E.; Martínez-Cruz, J. 2012. Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: validación de indicadores ambientales en los principales tipos de producción. México DF: UNAM.
- Grassi, B. 2020. Estado del clima Paraguay 2019: Cambio climático, evidencias científicas e impacto (en línea). Asunción, Paraguay, Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. 94 p. Consultado 26 nov. 2020. Disponible en <http://dncc.mades.gov.py/wp-content/uploads/2020/10/Estudio-del-Clima-Paraguay-2019-1.pdf>
- Haig, M. 1977. The use of erosion pins in the study of slope evolution. Boletín Técnico 18: 31 - 49.
- Hamilton, L. 2009. Los bosques y el agua: Estudio temático elaborado en el ámbito de la evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. Roma, Italia, FAO. 86 p. n.º 155. Estudio: FAO Montes.
- Itaipu en números. s.f. (en línea). Consultado el 14 feb 2024. Disponible en www.itaipu.gov.py/es/sala-de-prensa/itaipu-en-numeros
- Karas, E.; Oguz, I. 2015. A new approach to determine land use planning and soil conservation measures based on soil erosion classification. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. 10 (2):145-158
- Labriere, N.; Locatelli, B.; Laumonier, Y.; Freycon, V.; Bernoux, M. 2015. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. Agriculture, Ecosystem and Environment 203:127-139
- Lal, R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. Critical reviews in Plant Sciences.

- Leopold, L.B.; Wolman, M.G.; Miller, J.P. 1992. Fluvial processes in geomorphology. New York: Dover Publications Inc.
- Levia, D.F.; Frost, E.E. s.f. A review and evaluation of stemflow literature un the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. Journal of Hydrology, 1-29.
- Ley Que ordena la expropiación de tierras en Paraguay para establecer la franja de protección de Itaipu n.º 752. Art.7. Paraguay. 20 jul. 1979.
- López-Gorostiaga, O.; González-Erico, E.; de Llamas G., P. A.; Molinas M., A.S.; Franco S., E. S.; García S., S. y Ríos A., E. O. 1998. Reconocimiento de suelos y capacidad de uso de la tierra. Región oriental del Paraguay. Paraguay: Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).
- McHugh, M.; Clarke, M.; Duzant, J.; Morgan, R.; Rickson, J. 2005. Soil Erosion and Control Practices. Water Encyclopedia, 565-570.
- Mohammad, A.G.; Mohammad, A.A. (010. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. Catena, 97-103.
- Morgan, R. 2005. Soil erosion and conservation. Tercera Edición. Malden, Massachussets, Estados Unidos. Blackwell Publishing. 316 p.
- Morris, G.; Fan, J. 2010. Reservoir Sedimentations Handbook: Design and Management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Pfafstetter, O. 1989. Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodología de Codificación. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Departamento Nacional de Obras de Saneamiento (DNOCS). 19 p.
- Pimentel, D.; Kounang, N. 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. Ecosystems, 416-426.
- Pizarro, R; Cuitinho, H. 2002. Método de evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos en Chile. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. 13: 165 - 170
- Pritchett, W. 1990. Suelos forestales. México DF: Editorial Limusa.

- Proyecto Itaipu Preserva. s.f. (en línea). Consultado 14 feb. 2024. Disponible en www.itaipu.gov.py/es/medio-ambiente/proyecto-itaipu-preserva
- Pulido-Bosch, A. 2007. Nociones de hidrogeología para ambientólogos. Almería: Universidad de Almería.
- Quiroz-Marín, T.; Hincapié-Gómez, E. 2007. Pérdidas de suelo por erosión en sistemas de producción de café con cultivos intercalados. *Cenicafé*, 486-489.
- Quispe, T. 2018. Influencia de la cobertura vegetal en la erosión hídrica del suelo en la comunidad de San Mateo, Perú. Tesis. M.Sc. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria la Molina. 66 p.
- Renard, K; Foster, G. 1983. Soil conservation: principles of erosion by water. *Dryland agriculture. Agronomy Monograph*. 156-176.
- Ríos, N. 2006. Comportamiento hidrológico de sistemas de producción ganadera convencional y silvopastoril en la zona de recarga hídrica de la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 116 p.
- Ríos, E; Cotler, H; González-Mora, I; Pineda, R. 2013. Cuencas hidrográficas: Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Ciudad de México, Mexico, Secretaria de Medio Ambiente y recursos Naturales (SEMARNAT). 31 p.
- Silva, H. 2017. Evaluación de las parcelas establecidas en el marco del Proyecto Itaipu Preserva: Informe Final. Paraguay. Itaipu Binacional. 82 p.
- Sun, G; Amatya, D; McNulty, S. 2016. Forest hydrology. In Chapter 85: Part 7 Systems Hydrology. *Handbook of Applied Hydrology*. Sing, 85-1: 85-8.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2017. Soil Survey Manual. USDA Handbook Nr. 18 (en línea). Consultado el 14 de enero de 2024. Disponible en <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>
- Tratado Entre la República del Paraguay y la República Federativa del Brasil para el aprovechamiento hidroeléctrico de los recursos hidráulicos del Río Paraná, pertenecientes en

condominio a los dos países, desde e inclusive el Salto del Guairá o Salto Grande de Sete Quedas hasta la boca del Río Yguazú. Brasil. 26 abr. 1973.

Vázquez, A; Tapia, M. 2011. Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana. Revista Ingeniería UC. 18(3): 42 - 50

Vázquez, A; Mejía, A; Faustino, J; Terán, R; Vázquez, I; Díaz, J; Vázquez, C; Castro, A; Tapia, M; Alcántara, J. 2016. Manejo y gestión de cuencas hidrográficas. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 646 p.

Vera, J. 2019. Evaluación de áreas degradadas / sin cobertura forestal dentro de la Franja de Protección del Embalse de la Itaipu – Margen Derecha. Hernandarias, Paraguay. Itaipu Binacional. s. p.

7. Anexos

Anexo 1. Precipitación diaria entre los meses de Abril-Noviembre 2023

	2023							
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
1	0,0	0,0	0	0	0	55,6	0	0,6
2	0,0	23,8	0	0	0	32,6	0	116,0
3	0,0	7,5	0	0	0	0	23,6	5,6
4	0,0	0,0	0	0	0	0	4,4	0,0
5	11,4	0,0	0	0	0	0	0	0,0
6	8,0	0,0	0	0	0	0	11	0,0
7	0,0	0,9	0	0	25,1	58,5	13	0,0
8	0,0	0,0	0	13,6	29,3	9,9	1,7	29,5
9	0,0	0,0	0	18,8	0,4	0	0	10,8
10	0,0	0,0	0	19,8	0	0	0	0,0
11	0,0	0,0	27,8	2,4	18,9	0	0,6	0,0
12	0,0	0,0	0	13	0	0	0	7,2
13	17,8	0,0	11,1	0	0	29	0	24,8
14	0,0	0,0	9,5	0	0	0	0	17,6
15	5,5	0,0	0,8	0	0	0	0	5,0
16	50,5	0,0	1,2	0	0	0	0	0,0
17	4,0	0,0	0	0	0	0	0	0,0
18	0,0	0,0	0	0	24	2,5	0	1,1
19	0,0	0,0	0	0	0	5,8	32	0,0
20	0,0	0,0	0	0	0,3	0	0	0,0
21	0,0	0,0	0,9	0	0	0	0	0,0
22	0,0	0,4	14	0	0	0	0	34,6
23	0,0	0,0	2,2	0	0	0	14,8	7,8
24	35,0	0,0	0	0	0	0	7,7	0,0
25	43,5	0,0	0	0	0	0	0	0,5
26	0,0	2,4	0	2,5	0	5,8	17,9	11,0
27	0,0	37,8	0	6,7	0	0	59,6	16,6
28	0,0	0,0	0	3	0	0	116,8	0,0
29	0,0	0,0	0	0	0	0	6,4	0,0
30	0,0	0,0	0	0	0	0	18,6	0,0
31		0,0	0	0	1,6		0,2	
TOTAL (mm)	175,7	72,8	67,5	79,8	99,6	199,7	328,3	288,7

Fuente: División de Embalse - Itaipú Binacional (2023)

Anexo 2. Planilla de datos de medición de erosión

Estimación de erosión hídrica en diferentes escenarios de cobertura forestal dentro de la franja de protección del embalse de Itaipu - Arroyo Pirapyta									
N°	T2 - Cobertura forestal degradada			T1 - Cobertura forestal implantada			T0 - Cobertura forestal natural		
	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 1	Rep 2	Rep 3
1	0	0.3	0	0.2	0	0	0.6	0	0
2	-1	-1	0	0.2	-0.3	-0.2	0	-	-
3	0	-1.5	-0.1	0.1	-1	-0.3	0	0	0
4	-1.5	-0.5	0	0.8	-1.1	0	0	-2.1	0
5	-1.5	-0.5	0	0	-0.5	-1	0	0	0
6	1	-0.1	-1	0.1	-0.6	-0.1	0	0	-0.5
7	-1.5	-0.5	-1.4	0.2	-0.4	-0.3	-1	0	0
8	-1.03	-2	-0.5	0	0	-1	-	-0.5	-0.3
9	0	-1.5	-1	0	-0.2	-0.3	-	0	0
10	0	0	-2	0	-1	-0.4	0	-0.7	0
11	-0.5	-1	0	0	-0.2	0	0	0	0
12	0	-0.08	0	-1	-0.9	0	-1.5	0	0
13	0	0	0	0	-1	-0.4	-	0	-0.6
14	-1.5	-2.4	0	-0.5	0	0	0.7	0	-0.3
15	-0.5	-1	-0.5	0	0	-0.2	0	0	-0.8
16	0	-0.8	-1	0	-0.5	-0.1	-0.5	0	0
17	-1	0	-1	0	-0.5	0	0	0	0
18	0	-2.8	0	-0.5	-0.2	0	0	0	0
19	1	-1.5	0	-1	0	-0.4	0	0	-1.2
20	0	-1	-1	0	-1.5	-0.5	0	-0.2	0
21	0.5	0	0	-0.4	-2	0	0	-1	0
22	0	-1	-2	0	0	0	0	0	0
23	0	0	-1	-0.5	-0.6	-0.3	1.9	0	0
24	-1	-0.5	-1	-0.5	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	-1.8	1.2	0	0	0
26	0	0	-1	-0.5	0	0.5	0	1	0
27	0	-1.5	-1.5	0	0	0	1.2	0.4	0.6
28	0	-1	0	-1	-1	0	0	-0.7	0
29	0	-1	0	-0.4	0	-1	0	0	0
30	0	-1	0	-0.5	-0.4	0	-1	0	0
31	0	-1.5	0	0	0	-0.2	0	0	0
32	0	-1	-1.5	0	0	-1.6	0	0	0
33	0	-1	0	0	-0.5	-1.9	0	-0.4	0
34	0	-0.5	-1	0	0	0	0	0	0.6
35	0	0	-0.8	-0.3	-0.8	0	-	0	0
36	-0.5	-0.8	-1	0.5	-0.3	0	-	0	-0.4
37	-1	0.8	0	-0.5	-0.4	-0.3	-	-0.5	-1.4
38	0	-1	-0.5	-0.2	0	-0.1	-	0	-0.9
39	0	0	-1	0	-0.3	-1	-0.5	0	0
40	0	0.1	0	-1	-1	0	0	-0.6	0
41	0.5	0	0	-0.4	-0.5	-1	0	0	0
42	0.5	-1.5	0	-0.4	-1.5	-0.7	-0.7	0	0
43	-0.5	1	-2	-0.7	-0.5	-0.4	0	-1.4	0
44	-1	-2	0	1	-0.5	0	0	0	0
45	0	0	0	0	-1.1	-0.7	-0.4	0	0
46	0	0	0	-1.5	-0.5	0	0	-1.3	0
47	0	0	0	-1	-1	-0.5	-	0	0
48	0	0	0	-1	-0.5	0	-	0	-1

Anexo 3. Tabla de diversidad vegetal

Tratamiento	Especie
T0	<i>Citrus aurantium</i>
T0	<i>Cordia trichotoma</i>
T0	<i>Bauhinia forficata</i>
T0	<i>Sorocea bomplandii</i>
T0	<i>Mirtaceae</i>
T0	<i>Plinia rivularis</i>
T0	<i>Cabralea canjerana</i>
T0	<i>Chrysophyllum marginatum</i>
T0	<i>Chrysophyllum marginatum</i>
T0	<i>Nectandra angustifolia</i>
T0	<i>Nectandra angustifolia</i>
T1	<i>Croton urucurana</i>
T1	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>
T1	<i>Handroanthus albus</i>
T1	<i>Handruanthus heptaphillus</i>
T1	<i>Croton urucurana</i>
T1	<i>Solanum granulo-leprosum</i>
T1	<i>Peltophorum dubium</i>
T2	-

Pruebas de hipótesis tipo III-prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Trat	2	6	3.72	0.0890

Anexo 4. Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)**Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)**

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	31.04	0.0014
Trat	2	3.72	0.0890

Fuente: Elaboración Propia (2023)

Anexo 5. Pruebas de hipótesis secuenciales**Pruebas de hipótesis secuenciales**

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	31.04	0.0014
Trat	2	3.72	0.0890

Fuente: Elaboración Propia (2023)

Anexo 6. Especificaciones del modelo

Especificación del modelo en R
`mlm.modelo.002_Media_REML<-gls (Media~1+Trat, method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data02)`

Resultados para el modelo:

`mlm.modelo.002_Media_REML`

Variable dependiente: Media

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
9	62.10	61.27	-27.05	16.69	0.55	

Fuente: Elaboración Propia (2023)

Anexo 7. Imágenes de referencia por tratamiento

T0 – Cobertura forestal natural



T1 – Cobertura forestal implantada



T2 – Cobertura forestal degradada



Anexo 8. Tabla de resumen de análisis laboratorial de suelo

RESUMEN DE PROPIEDADES DE SUELOS																							
FECHA: 05/12/2023																							
CALICATA	N°	MUESTRA	UBICACION	PROF: (m)		W	LL	LP	P	% PASANTE TAMIZ						DENS. APAREN	DESCRIPCION	CLASIFICACION USDA					
				DESDE	HASTA					%	%	%	%	%	%			%	%	S.U.C. SECA (Kg/cm3)	% Arena	% Arcilla	% Limo
TOR1	1	-	-	-	28,8	53,5	38,5	15,0	100	100	100	94	94	93	92	MH	0,975	Limo de alta plasticidad rojizo	6	20	74	Franco Limoso	
TOR2	2	-	-	-	35,6	58,3	40,3	18,0	100	100	100	92	90	88	85	MH	1,041	Limo de alta plasticidad rojizo	8	20	72	Franco Limoso	
TOR3	3	-	-	-	38,0	53,1	36,6	16,5	100	100	100	88	87	85	80	MH	0,847	Limo de alta plasticidad rojizo	12	14	74	Franco Limoso	
TIR1	4	-	-	-	41,2	59,2	36,3	22,9	100	100	100	91	89	88	85	MH	1,056	Limo de alta plasticidad rojizo	9	16	75	Franco Limoso	
TIR2	5	-	-	-	36,2	88,1	45,2	42,9	100	100	100	92	91	90	89	MH	1,041	Limo de alta plasticidad rojizo	8	14	78	Franco limoso	
TIR3	6	-	-	-	33,3	53,0	35,8	17,2	100	100	100	93	92	90	85	MH	1,034	Limo de alta plasticidad rojizo	7	18	75	Franco Limoso	
TZR1	7	-	-	-	42,4	69,3	45,7	23,6	100	100	100	91	90	88	86	MH	1,035	Limo de alta plasticidad rojizo	9	12	79	Limo	
TZR2	8	-	-	-	46,6	88,9	45,2	43,7	100	100	100	93	92	91	90	MH	0,996	Limo de alta plasticidad rojizo	7	12	81	Franco Limoso	
TZR3	9	-	-	-	46,1	72,3	40,2	32,1	100	100	100	92	91	90	88	MH	1,055	Limo de alta plasticidad rojizo	8	12	80	Franco Limoso	