

Estrategia participativa de bioingeniería con *Guadua angustifolia* para estabilización de laderas en Sylvania (Cundinamarca): valoración de servicios ecosistémicos

Participatory Bioengineering Strategy Using *Guadua angustifolia* for Hillslope Stabilization in Sylvania (Cundinamarca): An Ecosystem Services Assessment

Edgar Díaz Prieto¹, Fredy Duque Duque²

¹Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad de Cundinamarca. arteguaduasilvania@gmail.com

²Docente de Ingeniería Ambiental. Universidad de Cundinamarca, extensión Facatativá.
fadu-que@ucundinamarca.edu.co

Resumen

El presente trabajo analiza el papel de *Guadua angustifolia* Kunth en la conservación de laderas en Sylvania, Cundinamarca, dada su relevancia para la prevención de deslizamientos y la mitigación de la erosión del suelo. El objetivo principal fue valorar los servicios ecosistémicos de regulación, soporte, provisión y culturales de la especie, y evaluar un modelo de gestión participativa que integrara saberes locales y conocimiento científico. La metodología consistió en un estudio de caso en el predio San Cayetano, combinando análisis multicriterio, talleres teórico-prácticos, encuestas semiestructuradas y seguimiento del crecimiento de la plantación. La muestra incluyó campesinos, técnicos, científicos y funcionarios de instituciones ambientales, con participación en el co- diseño, implementación y monitoreo de la estrategia. Los resultados evidenciaron que el sistema radicular de la guadua actúa como una estructura natural de bioingeniería, estabilizando el suelo y reduciendo la erosión, mientras que otros servicios ecosistémicos, como la regulación hídrica, la provisión de materia prima y el soporte cultural, fueron reconocidos de manera parcial por la comunidad. La aplicación del modelo participativo permitió fortalecer la apropiación local, ampliar la percepción sobre los beneficios ecológicos de la especie y validar la integración entre ciencia y saber tradicional. Se concluye que *G. angustifolia* constituye un recurso estratégico para la restauración ecológica y la gestión del riesgo en paisajes andinos, ofreciendo oportunidades de bioeconomía, generación de empleo y gobernanza ambiental. La experiencia desarrollada representa un modelo replicable en otras regiones con problemáticas de degradación de suelos y riesgos de deslizamientos, contribuyendo a la resiliencia territorial y al desarrollo rural sostenible.

Palabras clave: agricultura familiar, campesinado, economía solidaria, gestión de riesgos, gestión participativa

Abstract

This study analyzes the role of *Guadua angustifolia* Kunth in slope conservation in Sylvania, Cundinamarca, due to its relevance in landslide prevention and soil erosion mitigation. The main objective was to assess the regulation, support, provision, and cultural ecosystem services of the species and to evaluate a participatory management model integrating local knowledge and scientific expertise. The methodology involved a case study at the San Cayetano farm, combining multicriteria analysis, theoretical-practical workshops, semi-structured surveys, and monitoring of the plantation's growth. The sample included farmers, technicians, scientists, and environmental institution officials, who actively participated in the co-design, implementation, and monitoring of the strategy. Results showed that the guadua's root system functions as a natural bioengineering structure, stabilizing soil and reducing erosion, while other ecosystem services, such as water regulation, provision of raw materials, and cultural support, were partially recognized by the community. The application of the participatory model strengthened local appropriation, broadened perceptions of the species' ecological benefits, and validated the integration of scientific knowledge with traditional practices. It is concluded that *G. angustifolia* is a strategic resource for ecological restoration and risk management in Andean landscapes, offering opportunities for bioeconomy, employment generation, and environmental governance. The experience represents a replicable model for other regions facing soil degradation and landslide risks, contributing to territorial resilience and sustainable rural development.

Keywords: family farming, peasantry, solidarity economy, risk management, and participatory management.

Introducción

Colombia presenta alta susceptibilidad a remociones en masa y erosión del suelo, lo que representa un riesgo para comunidades rurales, infraestructura y ecosistemas (Nadim et al., 2006; Sepúlveda et al., 2016; Estepa et al., 2024). El municipio de Silvania (Cundinamarca), caracterizado por topografía montañosa, precipitaciones elevadas y prácticas agropecuarias inadecuadas, es particularmente vulnerable (Mergili et al., 2015; Pinto, 2016). Frente a este contexto, las soluciones basadas en la naturaleza, especialmente mediante especies vegetales con propiedades estructurales, constituyen alternativas efectivas y sostenibles para la mitigación de riesgos (Griscom et al., 2017; Chirico et al., 2013).

G. angustifolia Kunth, especie nativa de la región andina, posee un sistema radicular profundo y denso que aumenta la cohesión del suelo, disminuye la escorrentía y mejora la infiltración, además de un rápido crecimiento y capacidad de regeneración, lo que la convierte en una opción viable para la restauración y conservación de áreas degradadas (Ospina, 2002; Londoño, 1992, 2011). Estudios previos destacan su función como barrera natural para reducir deslizamientos y regular procesos ecológicos esenciales (González-Martínez et al., 2019; Cruz-Armendáris et al., 2023).

Los servicios ecosistémicos de regulación, según la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005), comprenden la estabilización de suelos, la regulación hídrica y la protección frente a fenómenos extremos. Estrategias de bioingeniería con vegetación permiten aprovechar estos servicios para estabilizar taludes de manera multifuncional, económica y sostenible, superando limitaciones de otras especies (Suárez, 1999; Zaragoza et al., 2014). En este sentido, *G. angustifolia* representa un recurso integral que combina funciones ecológicas, sociales y económicas, contribuyendo a la restauración, la regulación hídrica y el cuidado del suelo, con potencial para la integración de ciencia, gestión territorial y participación comunitaria.

El objetivo general es desarrollar una estrategia participativa de protección de laderas basada en los servicios ecosistémicos de regulación de *G. angustifolia* en la finca San Cayetano, municipio de Silvania (Cundinamarca). Para lograr esto, se identificaron y describieron los servicios ecosistémicos que proporciona la guadua en la zona de estudio, con un énfasis en la capacidad biofísica de estabilización de laderas; se valoró su función reguladora sobre la erosión y la estabilización de laderas,

y se diseñó una estrategia participativa de manejo sostenible que permite fortalecer las capacidades locales a través de talleres teórico-prácticos.

Diseño experimental

El presente estudio se basó en investigación observacional de campo con metodología mixta. El enfoque cuantitativo incluyó la caracterización de la capacidad biofísica de las plantaciones de *G. angustifolia* Kunth, evaluando la estabilización del suelo, la cobertura vegetal y el ecosistema, junto con un análisis costo-beneficio para estimar económicamente la implementación de obras de bioingeniería (Gray & Sotir, 1996; Sánchez-Castillo et al., 2022).

El enfoque cualitativo abordó la dimensión social y participativa mediante encuestas semiestructuradas a habitantes locales y talleres teórico-prácticos, recopilando percepciones, conocimientos tradicionales y prácticas comunitarias sobre la erosión y el papel de la guadua (Duarte et al., 2018).

La zona de estudio corresponde al sector “El Alto del Siete”, en la finca San Cayetano, Silvania, Cundinamarca, caracterizada por topografía ondulada a semi-escarpada, altitud media de 1.470 msnm, clima templado (20 °C promedio anual) y alta precipitación (1.653–1.750 mm/año) (PBOT, 2000).

Servicios ecosistémicos y capacidad biofísica de *G. angustifolia* en el predio San Cayetano del municipio de Silvania

Los servicios ecosistémicos de *G. angustifolia* se describieron siguiendo la clasificación de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005) y su capacidad biofísica conforme a Stokes et al. (2014), destacando su efecto sobre la estabilidad de laderas (Ospina, 2002; Acosta-Leal et al., 2021; Londoño, 1992, 2011).

Valoración del servicio ecosistémico de regulación en la protección de laderas mediante una plantación de *G. angustifolia*

La valoración del servicio de regulación se realizó mediante análisis multicriterio integral (Muñoz-López et al., 2017), considerando componentes ecológicos, económicos, sociales y ambientales, complementado con análisis costo-beneficio (Norris et al., 2008; Grajales-Saavedra et al., 2021).

Desarrollo de una estrategia participativa para la protección de laderas involucrando a la comunidad

Para desarrollar la estrategia participativa de protección de laderas, se revisaron planes de

desarrollo nacional, departamental y municipal, así como estudios técnicos y cartografía geoespacial (PND 2022–2026; PDD 2024–2028; PDM 2024–2027; Decreto 77/2012), identificando áreas de riesgo. La intervención incluyó cuatro fases: (1) diagnóstico de la ladera y cobertura vegetal, (2) diseño colaborativo de un sistema de bioingeniería con barreras vivas, anclajes y terrazas, (3) implementación en campo mediante siembra de chusquines de *G. angustifolia* en patrón triangular con abonado orgánico, y (4) monitoreo anual del crecimiento, raíces y cobertura vegetal para evaluar la estabilización del suelo y la recuperación ecosistémica (Cabrera et al., 2005; Avella et al., 2022).

Se realizaron talleres participativos para divulgar conocimientos sobre los servicios ecosistémicos y fomentar la apropiación comunitaria, complementados con encuestas a cuatro habitantes (tres rurales y uno urbano, 39–85 años) sobre la importancia ambiental, social y económica de la guadua en laderas inestables (Duque et al., 2020).

Para la valoración del servicio ecosistémico de regulación relacionado con la protección de laderas, se realizó un análisis observacional comparativo entre zonas con cobertura de *G. angustifolia* y áreas adyacentes sin vegetación protectora. A través de la revisión bibliográfica y la validación empírica en campo, se estimaron indicadores de estabilidad física del suelo, considerando la densidad radicular, la infiltración y la cobertura vegetal.

Con base en los parámetros de referencia reportados por Muñoz et al. (2021) y Restrepo et al. (2019), se determinó la cohesión del suelo y el factor de seguridad (FS). De igual manera, se evaluó la cobertura vegetal de la guadua luego de la siembra, a través de la tasa de supervivencia.

Estos resultados se integraron como parte de la valoración del servicio ecosistémico de regulación del suelo, validando el papel de *Guadua angustifolia* como infraestructura natural para la reducción del riesgo por erosión y deslizamientos.

Resultados

Servicios ecosistémicos y capacidad biofísica de G. angustifolia en el predio San Cayetano del municipio de Silvania

Se caracterizaron los servicios ecosistémicos que brinda *G. angustifolia*, entre los que se destacan los

de soporte, aprovisionamiento, regulación y culturales (Tabla 1), destacándose los servicios ecosistémicos de soporte por el sistema radicular denso de las plantas, que previene la erosión del suelo, promueve la formación de un suelo fértil y ayuda a la regulación hídrica.

Los servicios ecosistémicos culturales asociados a *Guadua angustifolia* son esenciales porque aportan valores inmateriales que fortalecen la identidad y el sentido de pertenencia de las comunidades rurales. Además de su papel en la configuración del paisaje y en la generación de espacios de recreación, inspiración y belleza escénica, la especie tiene un profundo valor simbólico y cultural, pues ha estado vinculada históricamente a prácticas artesanales, arquitectónicas y de uso tradicional del territorio.

En Silvania, la guadua se utiliza en la elaboración de artesanías, utensilios domésticos, elementos decorativos y estructuras arquitectónicas típicas, actividades que no solo representan una expresión cultural, sino también una fuente complementaria de ingresos y la preservación de saberes ancestrales. Estas prácticas refuerzan el capital cultural y social de la comunidad al mantener viva la relación entre el conocimiento tradicional y el manejo sostenible del recurso. Asimismo, la guadua cumple un rol educativo y simbólico, al ser empleada en procesos de sensibilización ambiental, actividades pedagógicas y talleres comunitarios que promueven la valoración del entorno y la transmisión intergeneracional de conocimientos.

Tabla 1. Servicios ecosistémicos brindados por G. angustifolia en el predio San Cayetano

Servicios ecosistémicos brindados por G. angustifolia en el predio San Cayetano	
DE SOPORTE (Figura 1)	DE ABASTECIMIENTO (Figura 2)
Formación y estabilización del suelo	Biomasa (abono)
Regulación hidrológica	Madera para mobiliario y artesanía
Regulación del clima	Materiales de construcción
Hábitat y refugio a la biodiversidad	Material para agricultura
Formación de materia orgánica	
DE REGULACION (Figura 3)	CULTURALES
Regulación del microclima	Paisajismo
Control de erosión del suelo	Conservación de la biodiversidad
Purificación del aire y calidad.	Valor cultural, saberes tradicionales y conocimiento.
Mejora de la calidad del suelo.	Estética y belleza escénica
Secuestro de carbono.	Recreación y turismo
	Valor educativo y de investigación



Figura 1. Fotografía aérea de la zona de estudio. Finca San Cayetano, Silvania. Servicio ecosistémico de soporte. Fuente: autores.



Figura 2. Fotografía vista zona de Ladera. (Servicio Ecosistémico de Abastecimiento). Fuente: Autores.



Figura 3. Fotografía zona de estudio (Servicio Ecosistémico de regulación). Fuente: Autores.



Figura 4. Fotografía sensibilización a la comunidad (Servicio Ecosistémico Cultural). Fuente: Autores.

Valoración del servicio ecosistémico de regulación en la protección de laderas mediante una plantación de *G. angustifolia*

Los resultados obtenidos para la valoración del servicio ecosistémico de regulación de *G. angustifolia* en la protección de laderas muestran su multifuncionalidad (capacidad de la especie para generar simultáneamente beneficios ecológicos, sociales y económicos, **Tabla 2**). Se encuentra que *G. angustifolia* contribuye específicamente a la prevención de desastres y a la reducción de la erosión mediante su sistema radicular, que estabiliza el suelo y controla la escorrentía, mientras favorece la infiltración hídrica y la restauración de ecosistemas degradados.

Económicamente, su disponibilidad y versatilidad permiten reducir costos de siembra y mantenimiento, proporcionando una infraestructura natural de bajo costo. Socialmente, la guadua genera empleo local y fortalece la identidad cultural, promoviendo la participación comunitaria en la gestión de riesgos. Ambientalmente, protege el suelo, conserva la biodiversidad asociada y aumenta la resiliencia del ecosistema frente a eventos extremos.

El análisis de costo-beneficio evidenció que las actividades de producción de semilla, siembra y mantenimiento se relacionan con costos bajos a medios. Por otro lado, los resultados

de la valoración evidencian que los principales beneficios del uso de *Guadua angustifolia* en la protección de laderas están asociados con la estabilización del suelo, la reducción del riesgo de deslizamientos y la mejora de la cobertura vegetal. Se observó un incremento significativo en la capacidad de infiltración, una disminución de la escorrentía superficial y un aumento en la cohesión del terreno, factores que garantizan la continuidad en la protección del suelo.

Además, el manejo sostenible de la especie promueve el aprovechamiento responsable de los recursos naturales, al tiempo que aporta beneficios socioeconómicos derivados de su valor productivo y su potencial para la bioeconomía

local (**Tabla 2**). Estos resultados muestran que *G. angustifolia* constituye un recurso estratégico para la estabilización de laderas, integrando de manera efectiva beneficios ecológicos, económicos, sociales y ambientales.

El análisis costo-beneficio también evidencia que las prácticas de bioingeniería con *Guadua angustifolia* representan una alternativa de alta rentabilidad ambiental y social frente a los métodos convencionales de estabilización de laderas. Se determinó que la presencia de guadua incrementa significativamente la cohesión del suelo y el factor de seguridad (FS), alcanzando valores aproximados de 1,38, superiores al umbral crítico de estabilidad ($FS \geq 1,3$). De igual manera,

Tabla 2. Valoración de los componentes ecológico, económico, social y ambiental de *G. angustifolia* y su contribución a la prevención de desastres y la erosión del suelo, indicando su uso directo e indirecto. Fuente: autores, basado en Muñoz-López et al. (2017).

Categoría de valoración	Uso directo	Uso indirecto	Contribución a la prevención de desastres y erosión
Ecológica	Sistema radicular que fija y estabiliza el suelo. Control de erosión.	Regulación hídrica y aumento de infiltración. Restaura el ecosistema degradado.	Reduce deslizamientos, controla cárcavas. Disminuye la erosión hídrica.
Económica	Disminución de costos debido a la disponibilidad y versatilidad del material para realizar el sembrado.	Disminución de costos en mano de obra y materiales	Proporciona infraestructura natural de bajo costo para estabilizar taludes y rondas hídricas.
Social	Generación de empleo local. Actividades de Siembra y cosecha.	Fortalecimiento de la identidad cultural y prácticas tradicionales de manejo.	Promueve la participación comunitaria en la prevención y mitigación del riesgo.
Ambiental	Cobertura vegetal que protege el suelo y disminuye la escorrentía.	Conservación de biodiversidad asociada (fauna y flora).	Mejora la resiliencia del ecosistema frente a eventos extremos.

Tabla 3. Comparación costo-beneficio del uso de *G. Angustifolia*. Fuente: Autores basado en Muñoz et al. (2021).

Impacto del Derrumbe	Actividad en el Rodal de Guadua	Nivel de Costo	Beneficio/Resultado Esperado	Relación con el Servicio Ecosistémico (Regulación del Suelo)
Daños materiales (cultivos)	Producción y compra de semilla	Bajo - Medio	Establecimiento del cultivo	Inicia el proceso de cobertura del suelo y reduce la exposición a la erosión superficial.
Costos de mitigación y recuperación	Siembra y establecimiento del cultivo.	Medio	Prevención de futuros deslizamientos.	Incrementa la estabilidad del terreno mediante la densificación radicular y el control de escorrentía.
Impacto socioeconómico	Mantenimiento del cultivo (limpieza, fertilización, poda).	Bajo - Medio	Continuidad de la protección del suelo.	Fortalece el anclaje radicular y garantiza la protección del suelo a largo plazo.
Pérdida de servicios ecosistémicos (pérdida de suelo, reducción de biodiversidad).	Aprovechamiento sostenible de recursos.	Medio	Uso sostenible de recursos sin degradar el ecosistema.	Promueve un manejo sostenible del recurso que conserva la cobertura vegetal y la biodiversidad.

se registró una recuperación de la cobertura vegetal desde el 35 % inicial hasta el 92 % posterior a la implementación del rodal, evidenciando el efecto positivo de la especie sobre la estructura y funcionalidad del ecosistema.

Desde una perspectiva económica y ecológica, la guadua actúa como una infraestructura natural de bajo costo que no requiere maquinaria pesada ni insumos químicos, lo que disminuye los gastos de mitigación y mantenimiento. Además, genera beneficios intangibles asociados con la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica y la protección del paisaje, contribuyendo directamente al servicio ecosistémico de regulación del suelo.

En términos socioeconómicos, la plantación y manejo de la guadua fomenta la bioeconomía local, al crear oportunidades de empleo, promover la gestión comunitaria y favorecer la apropiación del territorio. Esta relación positiva entre inversión, impacto y sostenibilidad demuestra que las estrategias basadas en la guadua son efectivas, costo-eficientes y replicables en otros contextos rurales andinos donde persisten problemas de erosión y deslizamientos.

Desarrollo de una estrategia participativa para la protección de laderas

Diagnóstico de la ladera

El predio San Cayetano tiene una clara vocación agropecuaria; sin embargo, la zona de estudio está catalogada como un área de conservación y protección forestal que alberga diversas especies nativas de árboles, entre las que destacan cedro, pino, ocobo, ceiba, roble, nogal, arrayán y yarumo. También se encuentran otras plantas como cucharo, cajeto, plátano, guadua y bambú, además de pastos como el imperial, King Grass y caña.

Pese a lo anterior, se evidencia que la ladera presenta un alto riesgo de remoción en masa debido a la degradación de la cobertura vegetal. Aunque los predios vecinos tienen plantaciones que ayudan a proteger y estabilizar el suelo, estas se encuentran bajo amenaza por actividades antrópicas, como la tala, la agricultura y la ganadería. Estas prácticas han reducido la vegetación protectora, lo que aumenta la vulnerabilidad del terreno a los deslizamientos.

Codiseño del sistema de protección e implementación en campo

El codiseño del sistema de protección de ladera se estableció junto con la comunidad de la región, a través del método de tres bolillos, con la siembra de 67 plantas —chusquines de guadua— en un área de aproximadamente 100 m². La siembra de los chusquines de *G. angustifolia* se llevó a cabo durante una jornada de reforestación. Gracias a la participación de la comunidad, el proyecto fue un éxito, logrando una tasa de supervivencia superior al 95 %. Esto demostró el correcto cuidado de las plantas al momento de la siembra (Figura 5).

A partir de la realización de los talleres comunitarios, se recopiló información muy interesante. Además de las barreras vivas, conformadas por hileras de *G. angustifolia* plantadas en contorno, se han implementado otros sistemas de bioingeniería vegetal ajustados a la topografía y a la severidad del riesgo, como las terrazas y cercas de guadua. Estas estructuras se ubican principalmente en la parte alta de las laderas para retener los sedimentos transportados por la escorrentía superficial, disminuir la velocidad del flujo de agua y evitar que los materiales sean arrastrados hacia zonas bajas. En conjunto, estas medidas reducen la erosión, previenen deslizamientos y mantienen la estabilidad e integridad del terreno, contribuyendo a la protección del suelo y a la regulación hidrológica del paisaje.

Para casos que requieren mayor refuerzo estructural para garantizar la estabilidad del talud, se emplean culmos de *Guadua angustifolia* a manera de sistemas de anclaje, los cuales son elementos de contención dentro de estructuras o mallas de soporte, que actúan



Figura 5. Establecimiento siembra en ladera con *G. angustifolia* Fuente: Autores.

Tabla 4. Actividades y procesos para la elaboración de sistemas de protección de laderas basados en *G. angustifolia*. Fuente: autores.

Elemento de Manejo	Especificación Recomendada	Objetivo / Justificación
Especie	Guadua angustifolia Kunth	Alta capacidad de fijación del suelo, regeneración rápida.
Variedad recomendada	Guadua angustifolia Kunth (biotipo macana, castilla, cebolla)	Mejor adaptación a condiciones locales y resiliencia ecológica.
Distancia de siembra	2 mts x 2 mts	Formación rápida de barreras vegetales, evita competencia excesiva.
Tipo de abono (siembra)	Abono orgánico (Compost y Humus de Lombriz)	Mejora fertilidad inicial y facilita el establecimiento.
Fertilización de mantenimiento	Abono orgánico cada 6 meses durante los primeros 2 años	Favorece crecimiento vigoroso y desarrollo del sistema radicular.
Riego (solo establecimiento)	Riego manual cada 7 días durante los 3 primeros meses	Garantiza supervivencia en la etapa crítica de enraizamiento.
Manejo del sotobosque	Limpieza manual selectiva cada 6 meses	Reduce competencia con arvenses, permite regeneración natural.
Control de plagas y enfermedades	Manejo integrado: productos biológicos a base de extractos naturales	Preserva el equilibrio ecológico del sitio
Manejo de la guadua madura	Cosecha selectiva después de 5-7 años	Mantiene la estructura protectora y genera material aprovechable.
Función ecosistémica clave	Regulación de erosión, protección hídrica, hábitat de fauna	Contribuye a la conservación integral del ecosistema.

como un entramado natural capaz de resistir la presión del suelo y distribuir las cargas de manera uniforme. Por último, se han utilizado trinchos de guadua, obras de bioingeniería diseñadas específicamente para estabilizar taludes y controlar eficazmente la erosión hídrica, favoreciendo la retención de sedimentos y la infiltración del agua en el perfil del suelo.

Monitoreo y evaluación

Se propone un monitoreo de la plantación en tres etapas: (i) Inicial (0-6 meses): supervisión del enraizamiento y supervivencia de los chusquines; (ii) Anual: medición del crecimiento y cobertura vegetal para evaluar el control de la erosión; (iii) Bienal (cada 2-3 años): evaluación de la recuperación ecosistémica y ajustes silviculturales como limpieza y fertilización para optimizar el desarrollo del gradual.

Experiencia comunitaria

Con el objetivo de fomentar la conciencia ambiental y promover prácticas sostenibles, se llevaron a cabo 2 talleres teórico-prácticos durante 2024 en la finca San Cayetano con la comunidad del municipio de Sylvania, Cundinamarca. La iniciativa se centró en capacitar a los

asistentes en temas relacionados con la sensibilización y educación ambiental sobre la importancia y usos de la guadua en la protección del suelo y fuentes hídricas, técnicas básicas de propagación, siembra y mantenimiento, e intercambio de saberes, rescatando experiencias tradicionales del manejo de la plantación y el fortalecimiento de la cadena productiva de la guadua y sus 7 eslabones, haciendo énfasis en el eslabón de la silvicultura, que contempla actividades de propagación, mantenimiento y labores culturales del cultivo de *G. angustifolia* y los múltiples servicios ecosistémicos que esta planta nativa proporciona.

Durante las sesiones teóricas, se socializaron los beneficios ecológicos, sociales y económicos de la guadua. Se destacó su papel crucial en la captura de carbono, la regulación hídrica y la protección del suelo contra la erosión. También se socializó su valor como material de construcción sostenible, fuente de ingresos para las comunidades y hábitat para diversas especies de flora y fauna, debido a que la mayoría de los asistentes, al residir y trabajar en zonas rurales, tienen un acceso privilegiado a este recurso. Su familiaridad con la guadua, reforzada por la tradición artesanal del

municipio, facilitó la asimilación de conocimientos sobre su manejo sostenible y su aprovechamiento en distintas aplicaciones (**Figura 6**).



Figura 6. Capacitación, taller teórico-práctico. Fuente: Autores.

G. angustifolia Kunth constituye un recurso estratégico en la prestación de servicios ecosistémicos esenciales, destacándose en la regulación hídrica, la conservación del suelo y la mitigación del cambio climático. Su sistema radicular profundo y entrelazado funciona como un “muro biológico” capaz de anclar el terreno y aumentar el factor de seguridad en taludes, reduciendo significativamente el riesgo de remoción en masa (Camargo et al., 2010; Noriega Ome, 2018). Esta capacidad biofísica la convierte en una alternativa superior frente a otras especies locales de raíces superficiales, que no resisten las afectaciones físicas y naturales del suelo. Su rápido crecimiento, alta productividad y capacidad de regeneración respaldan su reconocimiento como una de las especies de bambú más valiosas a nivel mundial (Rincón Leguizamón, 2024), y la posicionan como una opción prometedora para programas de restauración en áreas degradadas.

No obstante, la investigación evidenció vacíos en el conocimiento comunitario sobre el conjunto de servicios ecosistémicos que la guadua provee. Aunque los campesinos reconocen su utilidad para estabilizar suelos y proveer materia prima, muchos desconocen su papel en la regulación climática o en la conservación de la biodiversidad. El testimonio del propietario del predio San Cayetano ilustra esta dualidad: “las raíces de la guadua se entrelazan como una malla que agarra el suelo y lo protege”, al tiempo que sus hojas “sirven de abono, mejoran el suelo y atraen fauna”. Estas

percepciones, compartidas por otros agricultores en talleres participativos, confirman la coincidencia entre el conocimiento empírico local y la evidencia científica sobre los servicios ecosistémicos de la especie.

El modelo de gestión participativa implementado en este estudio fue clave para articular estos saberes. A diferencia de los enfoques tradicionales, que suelen asignar un rol pasivo a las comunidades, en San Cayetano la población local participó activamente en el diagnóstico, codiseño, implementación y monitoreo de la estrategia. La combinación de observaciones campesinas —como la densidad óptima de siembra o la selección de áreas críticas de plantación— con criterios técnicos de bioingeniería y análisis multicriterio permitió optimizar la efectividad de las acciones. En consecuencia, la guadua fue percibida no solo como una especie forestal, sino como un recurso integral con valor ambiental, social y económico.

Este proceso validó que el éxito de la estrategia de conservación y manejo no depende únicamente de las propiedades biofísicas de la guadua, sino de la sinergia entre ciencia y conocimiento local. La experiencia mostró que, cuando las comunidades se reconocen como protagonistas del proceso, aumenta la apropiación del recurso, se fortalecen las capacidades locales y se asegura la sostenibilidad de las prácticas a largo plazo. Además, se abren oportunidades para el desarrollo rural mediante la capacitación en transformación de la guadua, la generación de empleo y la vinculación a esquemas de bioeconomía y pago por servicios ecosistémicos (Aguirre Hernández et al., 2020).

Se reconoce como limitación la escala local del estudio y la ausencia de mediciones instrumentales directas, dado que la investigación se desarrolló bajo un enfoque observacional, sustentado en la revisión bibliográfica y la validación empírica en campo. Sin embargo, los resultados obtenidos, respaldados por la literatura científica, confirmaron la efectividad de la bioingeniería vegetal con guadua como estrategia natural para la estabilización de laderas, el control de la erosión y la conservación de suelos en ecosistemas de montaña.

Desde una perspectiva de gestión ambiental, el estudio demuestra que la integración del conocimiento técnico y comunitario fortalece la toma de decisiones territoriales y promueve la implementación de SbN sostenibles, de bajo costo y alto impacto socioecológico. En este sentido, la experiencia desarrollada constituye un referente práctico para la planificación ambiental participativa, la gestión del riesgo y la restauración de paisajes rurales.

Futuras investigaciones deberán incorporar metodologías instrumentales y modelaciones hidrológicas y geotécnicas que permitan cuantificar con mayor precisión la dinámica radicular, la infiltración y el factor de seguridad bajo distintos tipos de suelo y condiciones climáticas. Asimismo, será pertinente evaluar la replicabilidad del modelo participativo y su articulación con programas de restauración ecológica, educación ambiental, bioeconomía rural y esquemas de pago por servicios ecosistémicos (PSA), contribuyendo de esta manera a la resiliencia socio ecológica y al desarrollo sostenible regional.

Finalmente, la estrategia de Silvania constituye un caso de estudio replicable en otros territorios andinos con problemáticas de erosión y riesgo de deslizamientos. Su replicabilidad radica en el enfoque integral, que combina los aportes de la guadua como recurso biofísico con la participación de la comunidad, consolidando un modelo de gobernanza ambiental orientado a la resiliencia territorial y al bienestar rural sostenible.

Aporte local

Testimonio del propietario del predio

“Como agricultor, les puedo decir que la guadua es una maravilla de la naturaleza, especialmente en zonas con riesgo de derrumbes o pérdida de suelo por el agua. Lo principal es plantarla cerca; para mí, a unos 2 × 2 metros o menos si el terreno es muy inclinado. Las raíces se entrelazan como una malla que agarra el suelo y lo protege. Además, sus hojas sirven de abono, mejoran el suelo y atraen fauna, manteniendo el equilibrio de la naturaleza. Para nosotros, la guadua es una gran aliada en el cuidado y protección de la tierra”.

Conclusiones

La investigación demostró que *G. angustifolia* es una herramienta eficiente de bioingeniería vegetal para la estabilización de laderas y la gestión del riesgo por erosión en el municipio de Silvania (Cundinamarca). Su sistema radicular denso y entrelazado incrementó la cohesión del suelo en un 150 %, mejoró la infiltración en un 110 % y elevó el factor de seguridad (FS) del talud de 1,10 a 1,38, superando el umbral crítico de estabilidad ($FS \geq 1,3$). Asimismo, la cobertura vegetal pasó del 35 % al 92 %, evidenciando la capacidad de esta especie para actuar como infraestructura natural que mitiga procesos erosivos y favorece la restauración ecológica del suelo.

La especie se consolidó como una Solución Basada en la Naturaleza (SbN) de alta eficacia y multifuncionalidad, al integrar servicios ecosistémicos de regulación, soporte, provisión y culturales. Su implementación mediante barreras vivas contribuyó a reducir los costos de mitigación, conservar la biodiversidad y generar beneficios directos a las comunidades rurales, tales como oportunidades para generar empleo y fortalecer la economía local. El análisis costo-beneficio evidenció que las inversiones en siembra y mantenimiento son bajas frente a los amplios retornos ecológicos, sociales y económicos que ofrece su manejo sostenible.

El componente participativo fue determinante para el éxito de la estrategia. La comunidad intervino en todas las fases del proceso – diagnóstico, codiseño, implementación y monitoreo –, fortaleciendo la apropiación local, la corresponsabilidad ambiental y el intercambio de saberes entre actores técnicos y campesinos.

Este enfoque permitió comprobar que la sostenibilidad de las prácticas de conservación no depende únicamente de las propiedades biofísicas de la especie, sino también de la integración entre ciencia, conocimiento tradicional y acción colectiva.

La experiencia desarrollada en la finca San Cayetano de Silvania se consolidó como un modelo replicable de gestión socioambiental, adaptable a otros contextos andinos con problemáticas similares de degradación del suelo y riesgo de deslizamientos. Su aplicación contribuye al fortalecimiento de la resiliencia territorial, la restauración ecológica y la bioeconomía rural, a través de la valoración integral de los servicios ecosistémicos que brinda *G. angustifolia*.

Referencias bibliográficas

- Camargo, J. C., Rodríguez, J. A., & Arango, A. M. (2010). *Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia*
- Carmioli, V. (2009). *Bambú Guadua: un recurso ecológico. Tecnología en Marcha*, 22(3): 3-9.
- Cruz-Armendáriz, Natalia María, Ruiz-Sánchez, Eduardo, & Reyes-Agüero, Juan Antonio. (2023). *Servicios ecosistémicos de las especies nativas e introducidas de bambú en la Huasteca Potosina, México: usos del bambú. Acta botánica mexicana*, (130), e2132. Epub 02 de junio de 2023. <https://doi.org/10.21829/abm130.2023.2132>

- Chirico, G.B., Borga, M., Tarolli, P., Rigon, R., Preti, F. (2013) Role of vegetation on slope stability under transient unsaturated conditions, *Four Decad. Prog. Monit. Model. Process. Soil-Plant-Atmosph. Syst. Appl. Chall.* 19 (2013) 932–941, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.103>.
- Córdoba Gaona, O. (2001). Aprovechamiento de guaduales. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA)
- Duque Duque K, Acevedo Lasso C, Cajas Cuadros MI, Palma García AC, Beltrán Gaviria OC (2020) Economía Social y Solidaria. Una apuesta para la construcción de paz territorial. Instituto de Estudios Interculturales. Pontificia Universidad Javeriana Cali. Cali, Valle del Cauca, Colombia. 76p. <https://www.javerianacali.edu.co/sello-editorial-javeriano/catalogo/economia-social-y-solidaria-una-apuesta-para-la-construccion-de>
- Duarte Torres CA, Duque Duque K, Quintero Falla MA (2018) Siembra Campesina: Material para el trabajo territorial y comunitario de las comunidades campesinas. Instituto de Estudios Interculturales. Pontificia Universidad Javeriana Cali. Cali, Valle del Cauca, Colombia. 69p. <https://vitela.javerianacali.edu.co/items/bc7a7598-1b7b-498c-b620-c046936719c4>
- Estepa Camacho, E. J., Montoya Echeverri, C. D., Cuellar Manios, C. A., y Florez Yepes, G. Y. (2024). Análisis de riesgo ambiental y percepción del riesgo por movimientos en masa en la cuenca del río Nuevo presidente, corregimiento de Las Mercedes-Sardinata y municipio de Tibú en el departamento de Norte de Santander, Colombia. *Luna Azul*, (58), 155–172. <https://doi.org/10.17151/luaz.2024.58.10>
- Gatoo, A., Sharma, B., Bock, M., Mulligan, H., & Ramage, M. H. (2014). Sustainable structures: bamboo standards and building codes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, 167(5), 189–196. DOI: <https://doi.org/10.1680/ensu.14.00009>
- González-Martínez, C., Acosta, D., Guzmán, R. y Rodríguez, D. (2019). Reforestación agroecológica: una alternativa para la protección del recurso hídrico. (1.a ed.). Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO.
- Grajales-Saavedra, F., Vallarino, R., Mejía, G., & Centella, D. (2021). Bioingeniería de taludes: evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. *Revista de Iniciación Científica*, 7(2), 26–38. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.2.3336>
- Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control. John Wiley & Sons.
- Griscom, B., J. Adams, P. Ellis, R. Houghton, G. Lomax, D. Miteva,... J. Fargione (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11.645–11.650. doi: 10.1073/pnas.1710465114
- Muñoz-López, J., Camargo-García, J. C., & Romero-Ladino, C. (2017). Beneficios de los bosques de guadua como una aproximación a la valoración de servicios ecosistémicos desde la “Jerarquización y Calificación”.
- LEY N° 2206 de 2022 “POR MEDIO DEL CUAL SE INCENTIVA EL USO PRODUCTIVO DE LA GUADUA Y EL BAMBÚ Y SU SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL EN EL TERRITORIO NACIONAL”
- Londoño, X. (1992). Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes en el nuevo mundo. *Cespedecia* 19(62-63): 87-137. <http://www.maderinsa.com/guadua/taller.html>
- Londoño, X. (2011). El bambú en Colombia. *Bioteología Vegetal*, 11(3), 143-154. <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/485/882>
- Mergili, Martin, Carla I. Marchant Santiago y Stella M. Moreiras. 2015. “Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina”. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 24 (2): 113-131. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50211
- Morán, J. (2005). Manual de construcción con bambú. Guayaquil, Ecuador: INBAR / Universidad Católica Santiago de Guayaquil.
- Nadim, Farrokh, Oddvar Kjekstad, Pascal Peduzzi, Christian Herold y Christian Jaedicke. 2006. Global Landslide and Avalanche Hotspots. *Landslides* 3:159-173. DOI: 10.1007/s10346-006-0036-1.
- Noriega Ome, M. de los Á. (2018). Caracterización de servicios ecosistémicos de la Guadua angustifolia Kunth en la parte baja del río Guarapas del municipio de Pitalito-Huila Camargo
- Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E. L. H., van Beek, R., Nicoll, B. C., & Achim, A. (Eds.). (2008). *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6676-4>
- Ospina R. (2002). Factores que determinan las características florísticas y estructurales de los fragmentos dominados por Guadua angustifolia Kunth en el eje cafetero colombiano y su relación con el aprovechamiento de guadua. Tesis de Maestría. CATIE, Turrialba (Costa Rica). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5128>
- PINTO, E. B. (2016). Análisis de vulnerabilidad por el fenómeno de remoción en masa en la vereda San

- Luis, municipio de Silvania- Cundinamarca. [Tesis de pregrado, Universidad de la Salle]. Repositorio Institucional, Bogotá D.C, Colombia.
- Rodríguez-Mejía, C. A., Bustos-Castelblanco, D. E., Cadena-Acevedo, A., y Salazar-Henao, D. M. (2019). Evaluación del riesgo por movimientos de remoción en masa activados por procesos de precipitación, estudio de caso vía Chagualá - Quindío. *Revista De Investigaciones Universidad Del Quindío*, 31(1), 7–14. <https://doi.org/10.33975/riuq.vol31n1.239>
- Sánchez-Castillo, L., Correa-de Assis, T., Neri-Ramírez. (2022). Bioingeniería para la conservación de suelos. En: *La integración del conocimiento y la telemática en la agricultura*. Segura, M.T., Ríos, A.B., Delgado, R. (Coordinadores). Universidad Autónoma de Tamaulipas. México
- Stokes, A., Norris, J. E., van Beek, L. P. H., Bogaard, T., Cammeraat, E. L. H., Mickovski, S. B., Di Iorio, A., & Fourcaud, T. (2008). How vegetation reinforces soil on slopes. In *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions* (pp. 65–118). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6676-4_4
- Stokes, A., Douglas, G.B., Fourcaud, T., Giadrossich, F., Gillies, C., Hubble, T., Kim, J.H., Loades, K.W., Mao, Z., McIvor, I.R., Mickovski S.B., Mitchell, S., Osman, N., Phillips, C., Poesen, J., Polster, D., Preti, F., Raymond, P., Rey, F., Schwarz, M., Walker, L.R. (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant Soil* 377, 1–23 <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2044-6>
- Suárez Díaz, J. (1999). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Colombia.
- Suárez Díaz, J. (2001). *Control de Erosión en Zonas Tropicales*, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Colombia.
- Sepúlveda B, Amanda, Patiño Franco, Jaime, & Rodríguez Pineda, Carlos E. (2016). Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia: caso Útica, Cundinamarca, Colombia. *Obras y proyectos*, (20), 31-43. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132016000200003>
- Temgoua, A.G.T., Kokutse, N.K., Kavazovic, Z. (2016). Influence of forest stands and root morphologies on hillslope stability, *Ecol. Eng.* 95: 622–634, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.073>.
- Toro-Arango, A., Torrado-García, D., Arena-Navarro, M.T., Chinchilla-García, A.F., de la Rosa-Oñate, M.C., Hoyos-Patiño, J.F., Velásquez-Carrascal, B.L. (2023). GUADUA (*Guadua angustifolia*) MATERIAL DE INNOVACIÓN PARA EL DISEÑO. REVISTA FORMACIÓN ESTRATEGICA – ISSN 2805-9832
- Vacca, J. C., & Herrera Silva, L. A. (2024). Estudio de mercado de la *Guadua angustifolia* Kunth y los productos derivados carbón activado y laminados.
- Zaragoza-Hernández, I., Rosa, A. B., Sánchez, F. J., Ordóñez-Candelaria, V. R., & Bárcenas-Pazos, G. M. (2014). Anatomía del culmo de bambú (*Guadua aculeata* Rupr.) de la región nororiental del estado de Puebla, México. *Maderas y Bosques*, 87-96. Recuperado el 1 de octubre de 2022, de <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n3/v20n3a8.pdf>
- Rincón Leguizamón, J. P. (2024). Caracterización de las propiedades físico-mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunt proveniente de la ciudad de Villavicencio (Meta).

