



MAESTRÍA EN CAMBIOS GLOBALES Y RIESGO DE DESASTRES

**SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA Y
BIOINGENIERÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE ÁREAS
DEGRADADAS POR EROSIÓN EN EL MUNICIPIO DE SAN
VICENTE FERRER, ANTIOQUIA**

ADRIÁN GONZÁLEZ PATIÑO



**Universidad[®]
Católica
de Manizales**

VIGILADA Mineducación

*Obra de Iglesia
de la Congregación*



*Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen*

**SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA Y BIOINGENIERÍA PARA
LA RECUPERACIÓN DE ÁREAS DEGRADADAS POR EROSIÓN EN EL
MUNICIPIO DE SAN VICENTE FERRER, ANTIOQUIA**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magister en
Cambios Globales y Riesgo de Desastres

Modalidad de grado: Proyecto de autoría del estudiantes o grupo de estudiantes
que se articula con una línea de investigación

Nombre del asesor: Angela María Jiménez¹

Autor: Adrián González Patiño²

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN CAMBIOS GLOBALES Y RIESGO DE DESASTRES
MANIZALES, CALDAS

2024

¹<https://orcid.org/0000-0002-7559-6318>

²<https://orcid.org/0009-0000-9979-3183>

Tabla de Contenido

Resumen	7
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Localización y Generalidades	12
2.1. Playas de Guacirú.....	14
2.2. Cárcava El Carmelo.....	15
2.3. Obra de Paso en Piedra Gorda.....	17
3. Objetivos	18
3.1. Objetivo General.....	18
3.2. Objetivos Específicos.....	18
4. Antecedentes	19
4.1. Referentes en la implementación de soluciones basadas en la naturaleza.....	19
4.2. Obras de bioingeniería construidas en ambientes similares	25
4.3. Estudios de amenaza y riesgo en el municipio de San Vicente Ferrer.....	28
5. Marco Teórico.....	33
5.1. Conceptos generales sobre geomorfología y erosión	33
5.2. Conceptos generales sobre soluciones basadas en la naturaleza y bioingeniería	34
5.3. Conceptos sobre gestión del riesgo del desastres y principios establecidos en la Ley 1523 de 2012	39
5.4. Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030	43
Metas Globales	43
Principios Rectores del Marco de Sendai.....	44

Prioridades de acción	45
6. Metodología.....	46
6.1. Diseño Metodológico	47
7. Caracterización de sitios afectados por erosión y propuesta de obras de intervención para la recuperación	49
7.1. Playas de Guacirú.....	49
Características geomorfológicas y geológicas.....	49
Caracterización del proceso erosivo.....	51
Propuesta de intervención	53
7.2. Cárcava El Carmelo.....	55
Características geomorfológicas y geológicas.....	55
Caracterización del proceso erosivo.....	59
Propuesta de obra de intervención.....	63
7.3. Obra de Paso en Piedra Gorda.....	70
Características geomorfológicas y geológicas.....	70
Caracterización del proceso erosivo.....	74
Propuesta de obra de intervención.....	76
8. Discusión y análisis de la implementación de obras de Bioingeniería – Transferencia de conocimiento.....	79
9. Conclusiones	82
10. Recomendaciones	86
11. Referencias bibliográficas	88

Listado de Figuras

Figura 1. Mapa de localización del municipio de San Vicente Ferrer.	12
Figura 2. Localización de los puntos propuestos para intervención.	14
Figura 3. Socavación de la quebrada Guacirú en la vía veredal.	15
Figura 4. Vista general de la cárcava El Carmelo.	16
Figura 5. Cárcava en obra de paso de fuente hídrica Vereda Piedra Gorda.	17
Figura 6. Mapa de amenaza por movimiento en masa del municipio de San Vicente Ferrer, según CORNARE, 2012.	30
Figura 7. Mapa de Amenaza por Movimiento en Masa en Suelo Rural, PBOT San Vicente 2017.	31
Figura 8. Mapa de amenaza por movimiento en masa en suelo rural propuesto en la revisión y actualización del PBTO 2022.	32
Figura 9. Esquema de muro entramado o Krainer en ambas orillas de un río.	39
Figura 10. Esquema metodológico de investigación.....	48
Figura 11. Mapa de geomorfología regional de Playas de Guacirú.	49
Figura 12. Geomorfología de la zona de estudio Playas Guacirú.....	50
Figura 13. Depósitos aluviales de arena asociados a la quebrada Guacirú.	51
Figura 14. Proceso de socavación de la quebrada Guacirú.....	52
Figura 15. Intervención con gavión en piedra en la quebrada Guacirú.....	54
Figura 16. Esquema de entramado de troncos con vegetación o muro Krainer.	55
Figura 17. Mapa de geomorfología regional de la Cárcava El Carmelo.	56
Figura 18. Saprolito arenoso del Batolito Antioqueño en la base de la Cárcava El Carmelo...	57
Figura 19. Mapa de hipsometría del área de afectación en la Cárcava El Carmelo.	58

Figura 20. Mapa de pendientes del área de afectación en la Cárcava El Carmelo.	59
Figura 21. Factores detonantes del carcavamiento en El Carmelo.	60
Figura 22. Escarpes verticales de la cárcava El Carmelo.....	61
Figura 23. Diseño de trinchos vivos escalonados para control de erosión en cárcava El Carmelo.	65
Figura 24. Esquema de trincho en vertedero (Rivera 2002) y foto de referencia (Rivera et al, 2015.).....	66
Figura 25. Esquema de biofiltro y fotos de referencia	67
Figura 26. Mapa de curvatura del área de afectación en la Cárcava El Carmelo.	68
Figura 27. Mapa de aspecto en el área de afectación de la Cárcava EL Carmelo.	69
Figura 28. Mapa de geomorfología regional del punto de estudio en Piedra Gorda.	71
Figura 29. Depósitos de vertiente en el área del proceso erosivo de Piedra Gorda.	72
Figura 30. Características del drenaje y del valle en Piedra Gorda.	73
Figura 31. Depósitos aluviales en las márgenes y fondo de la quebrada en Piedra Gorda.	73
Figura 32. Carcavamiento en la vereda Piedra Gorda.....	74
Figura 33. Descarga agua lluvia y escorrentía de la vía al proceso erosivo.	75
Figura 34. Imágenes comparativas de la cárcava en 2021 y 2024.....	75
Figura 35. Propuesta esquemática de intervención en Piedra Gorda.	77
Figura 36. Esquema de trincho en vertedero (Rivera 2002) y foto de referencia (Rivera et al, 2015.).....	77
Figura 37. Diseño de trinchos vivos escalonados para control de erosión en Piedra Gorda. ..	78
Figura 38. Taller de transferencia de conocimiento con CMGRD de San Vicente Ferrer.....	80
Figura 39. Taller de transferencia de conocimiento con la comunidad de El Carmelo.	81

Resumen

Las soluciones basadas en la Naturaleza (NbS) son medidas consistentes en la restauración, protección o gestión estratégica de los ecosistemas naturales para la reducción del riesgo de desastres y para la adaptación y mitigación al cambio climático. De igual forma, la bioingeniería comprende el uso de la vegetación para la estabilización de taludes y el control de la erosión, empleando las raíces y el follaje de las plantas como los elementos estructurales mecánicos. Además, la guadua por sus propiedades como reguladora de agua y su resistencia mecánica para la elaboración de biofiltros para el control del agua de escorrentía e infiltración que actúa como detonante de los procesos de remoción en masa y de erosión concentrada.

San Vicente Ferrer se ubica en el departamento de Antioquia donde la Cordillera Central exhibe un relieve de superficies de erosión separadas por escarpes regionales y cañones, siendo predominante los procesos de erosión como mecanismos de evolución del paisaje que afectan la población en zonas rurales, donde las soluciones basadas en la naturaleza y bioingeniería son una opción adecuada para recuperar de la estabilidad del terreno y el ecosistema, las cuales han sido ampliamente probadas en Colombia y otros entornos tropicales con condiciones similares.

Teniendo esto en consideración, se propone la intervención para tres zonas puntales con problemas de erosión concentrada en zona rural del Municipio de San Vicente Ferrer considerando obras de bioingeniería como muros krainer, biofiltros, trinchos de contención y trinchos de vertedero para la recuperación del terreno y mejorar los medios de vida de las comunidades afectadas.

Palabras claves: Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), Bioingeniería, Trincho, Biofiltro, Erosión, Control de erosión, Recuperación del terreno.

Abstract

Nature based solution (NbS) consist of restoration, protection and strategic management of natural ecosystems for the disasters risk reduction and climate change adaptation and mitigation. As well, bioengineering includes the use of vegetation for soil stabilization and erosion control, using the roots and foliage of plants as mechanical structural elements. In addition, it uses the guadua for its resistance as water regulators for the construction of biofilters to control the runoff water and subsuperficial water who act as detonator of the mass removal processes and concentrated erosion.

San Vicente Ferrer is in the Antioquia department where the Central Mountain Range exhibits a relief of erosion surfaces separated by regional escarps and canyons, with erosion processes being predominant as mechanisms of landscape evolution that affect the population in rural areas, where nature-based solutions (NbS) and bioengineering are a suitable option to recover the soil stability and the ecosystem, which have been widely tested in Colombia and other tropical environments with similar conditions.

Taking this into consideration, the intervention is proposed for three key areas with concentrated erosion problems in the rural area of the Municipality of San Vicente Ferrer, considering bioengineering works such as Krainer wall, biofilters and trincho-type bioengineering structures seeking to restore these degraded areas and improve the livelihoods of the affected communities.

Keywords: Nature based Solution (NbS), Bioengineering, Trincho, Biofilters, Erosion, Erosion control, Soil restauration.

1. Introducción

La vegetación ha sido utilizada desde siempre en la protección contra la erosión y más recientemente como una medida para adaptar los entornos urbanos y mitigar los efectos asociados al cambio climático y el riesgo de desastres mediante las soluciones basadas en la Naturaleza (NbS), medidas consistentes en la restauración, protección o gestión estratégica de los ecosistemas naturales y sus servicios para proporcionar bienestar humano, biodiversidad y mitigación del cambio climático. De igual forma, la bioingeniería comprende el uso de la vegetación para la estabilización de taludes y el control de la erosión, empleando las raíces y el follaje de las plantas como los elementos estructurales mecánicos para la protección del talud (Suarez, 2001). Surge entonces la pregunta: ¿qué tan efectiva es la recuperación de áreas degradadas por erosión y movimiento en masa a partir de la implementación de soluciones basadas en la naturaleza y obras de bioingeniería?

En este trabajo se hace una revisión, análisis e interpretación de información referente a Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) y técnicas de bioingeniería implementadas para la reducción del riesgo de desastres (RRD) mostrando algunos ejemplos en Colombia y otras partes del mundo, argumentando además su pertinencia y eficiencia no solo en la reducción del riesgo sino también en la adaptación al cambio climático y la restauración de ecosistemas que a su vez contribuye a mejorar los medios de vida de las comunidades donde se implementan. Asimismo se analizan tres procesos erosivos de distintas magnitudes que afectan vías veredales y la población rural del municipio de San Vicente Ferrer, en el departamento de Antioquia, donde las características del territorio, así como la naturaleza de los procesos erosivos analizados permiten proponer diseños puntuales para su intervención y la recuperación de suelo a partir de la elaboración de obras de bioingeniería como muros entramados o Krainer,

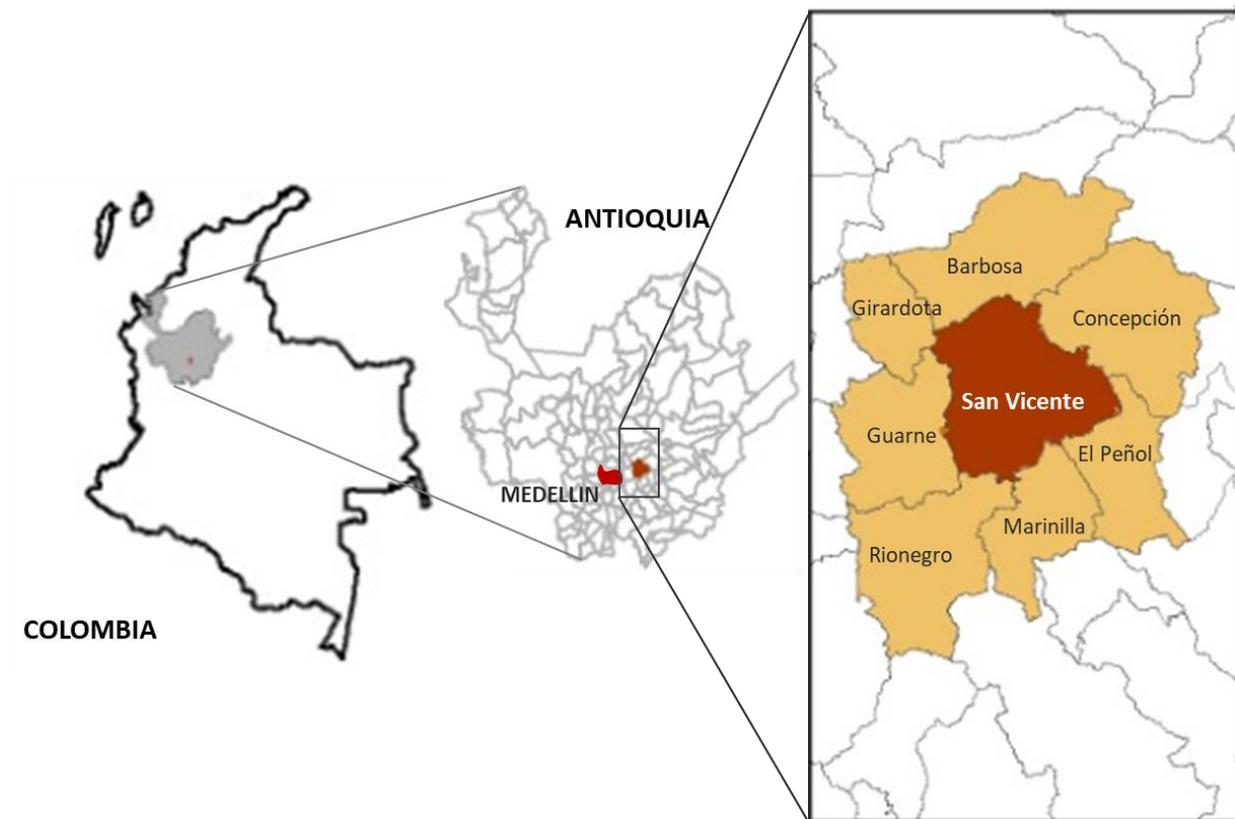
biofiltros, trinchos de contención y trinchos de vertedero, para los cuales se presentan las metodologías del sistema constructivo a partir de la caracterización geológica y geomorfológica de las áreas degradadas y la identificación de causas de los procesos erosivos.

Como complemento se realizaron dos talleres de transferencia de conocimiento con la administración municipal y las comunidades afectadas explicando el paso a paso de la construcción de las obras diseñadas para su posterior implementación en el terreno por parte de la administración municipal y las Juntas de Acción Comunal del Municipio de San Vicente Ferrer.

2. Localización y Generalidades

San Vicente Ferrer es un municipio del occidente colombiano, localizado en el oriente del departamento de Antioquia, sobre el altiplano de Rionegro principalmente. Limita al norte con los municipios de Girardota, Barbosa y Concepción; al sur con los municipios de Rionegro y Marinilla; al oriente con Concepción y El Peñol; y al occidente con Guarne y Girardota (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localización del municipio de San Vicente Ferrer.



Nota: Elaboración propia a partir de Cartografía PBOT (2017).

El municipio presenta una temperatura promedio de 17°C, predomina el rango térmico frío y un régimen bimodal con dos épocas lluviosas durante el año. Cuenta con una extensión de 230,5 km², de los cuales 85,45 ha corresponden a la cabecera municipal. El municipio tiene 39 veredas y un corregimiento con una población total de 20.140 ha, de los cuales 14316 correspondientes al

71% del total ocupan la zona rural, según información de la base de datos del Sisbén IV del municipio a 2023 (Tabla 1). La cabecera municipal se localiza hacia la zona sur-central del municipio, a una altura promedio de 2.201 msnm, dista 46 km de la ciudad de Medellín, capital del departamento de Antioquia y 12 km de la red vial nacional y de comunicación autopista Medellín – Bogotá.

Tabla 1. Información poblacional del municipio de San Vicente Ferrer, Antioquia.

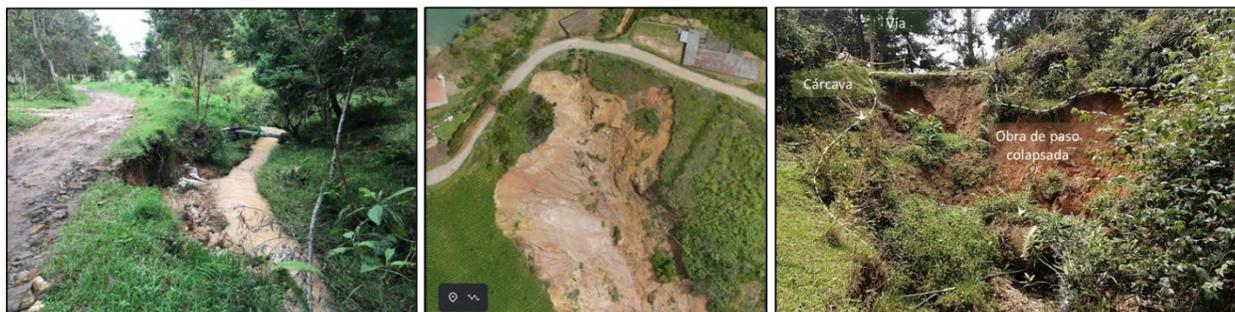
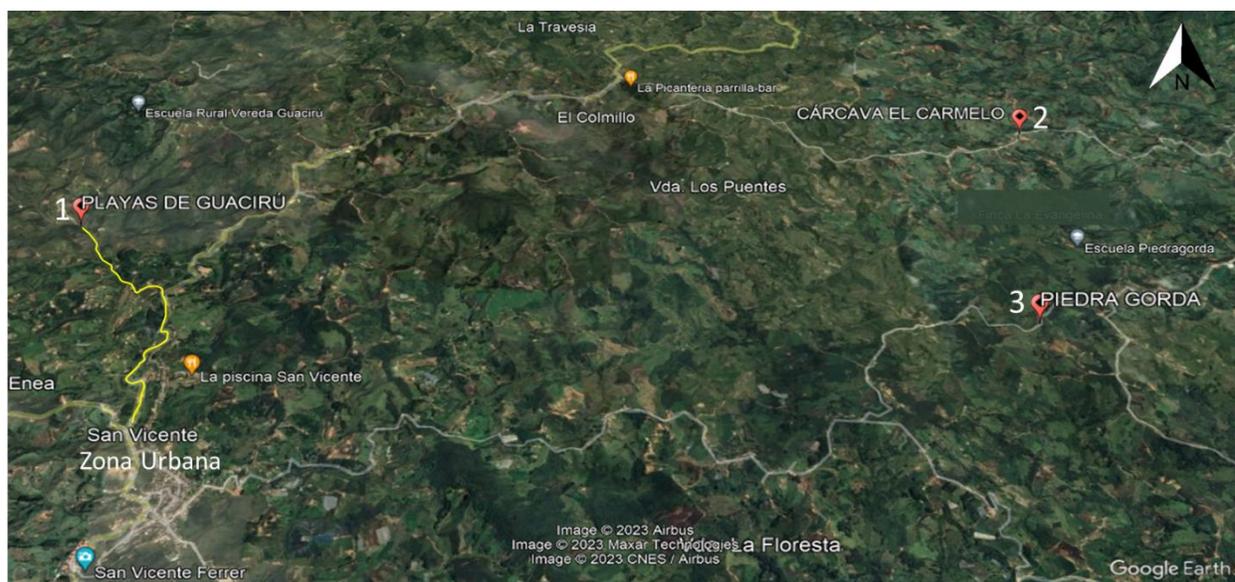
	POBLACION	%	HOMBRES	MUJERES
ZONA URBANA	5824	28,9%	3065	2759
RURAL	14316	71,1%	7989	6327
TOTAL	20140	100,0%	11054	9086

Fuente: Base de datos Sisbén IV del municipio (2023)

En un contexto geomorfológico San Vicente Ferrer se ubica en un punto donde la Cordillera Central exhibe un relieve de superficies de erosión separadas por escarpes regionales y cañones siendo predominante sobre estas unidades geomorfológicas los procesos de erosión que afectan la población en zonas rurales. Muchas de estas zonas erosionadas pueden ser tratadas mediante la implementación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) y técnicas de bioingeniería, las cuales han sido implementadas en regiones tropicales similares y otras partes del mundo, siendo eficientes, económicas y pertinentes para la recuperación de la estabilidad del terreno.

En este trabajo se propone el diseño de obras de bioingeniería y soluciones basadas en la naturaleza para la intervención y recuperación de tres sitios específicos afectados por erosión los cuales se localizan en la zona rural del municipio tal como se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Localización de los puntos propuestos para intervención.



1. PLAYAS DE GUACIRU
1,32 km al norte de la zona urbana

2. CARCAVA EL CARMELO
3,6 km de la vía San Vicente -
Concepción

3. PIEDRA GORDA
8 km Al Oriente en la vía San Vicente – El
Peñol

Nota: Elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth.

2.1. Playas de Guacirú

Este punto se localiza en la vereda Guacirú aproximadamente 1,32 km al norte de la zona urbana del municipio donde se presenta un proceso de socavación de la quebrada Guacirú en un tramo de 80 m afectando la vía veredal que comunica las veredas Guacirú y San Nicolás con la zona urbana (Figura 3). La vereda Guacirú cuenta con una población de 254 habitantes según

información de la base de datos del Sisbén IV del municipio a 2023 y limita con la zona urbana del municipio.

Figura 3. Socavación de la quebrada Guacirú en la vía veredal.



Nota: Foto tomada por el autor en agosto de 2023.

2.2. Cárcava El Carmelo

La Cárcava El Carmelo es un movimiento en masa complejo que involucra erosión concentrada, deslizamientos y flujos de lodos y escombros que afectan un área aproximada de 1 hectárea y se localiza en la vereda del mismo nombre al nororiente de la zona urbana, sobre la vía que conduce al Centro Poblado Corrientes, aproximadamente a 3,6 km de la vía San Vicente – Concepción y 4 km antes de llegar a Corrientes (Figura 2). El problema en este punto es la cercanía del proceso erosivo a la vía veredal que cruza en la parte alta cerca de la corona de la cárcava (Figura 4), en la cual se presentan deslizamientos planares en la corona, por lo que la

evolución remontante del proceso erosivo amenaza con llevarse la vía afectando la población de las veredas El Carmelo y Corrientes, las cuales cuentan con una población de 404 y 648 habitantes respectivamente según información de la base de datos del Sisbén IV del municipio a 2023. Cabe destacar que, en los últimos años, las veredas entre San Vicente y Concepción se han configurado como áreas de vivienda campestre donde gran parte de la población antioqueña tiene fincas de recreo para veranear, por lo que la población afectada puede ser mayor.

Figura 4. Vista general de la cárcava El Carmelo.



Nota: Fotografía aérea tomada con Drone en 2021.

2.3. Obra de Paso en Piedra Gorda

Este punto se localiza al oriente del casco urbano de San Vicente Ferrer aproximadamente a 8 km por la vía que conduce al municipio de El Peñol, en la vereda Piedra Gorda. Aquí se presenta una pérdida parcial de banca por la socavación y asentamiento de la obra de paso de un afluente hídrico que ha evolucionado a un cárcavamiento con aporte del agua de escorrentía de la vía que llega directamente a la corona de la cárcava (Figura 5). La pérdida de banca en la vía afecta las veredas de Piedra Gorda, la Cabaña y El Guamal principalmente, quienes transitan por esta vía para acceder a la cabecera municipal.

Figura 5. Cárcava en obra de paso de fuente hídrica Vereda Piedra Gorda.



Nota: Fotografía tomada por el autor en 2021.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Analizar las distintas soluciones basadas en la naturaleza y las obras de bioingeniería de acuerdo con su origen y aplicación en la reducción del riesgo de desastres mediante revisión bibliográfica para tener como base en la propuesta de obras para la recuperación de tres puntos específicos en el municipio de San Vicente Ferrer, Departamento de Antioquia, Colombia.

3.2. Objetivos Específicos

- Mediante revisión bibliográfica, identificar la efectividad de la implementación de soluciones basadas en la naturaleza y obras de bioingeniería documentadas como casos exitosos en Colombia y otras regiones del mundo.
- Caracterizar tres sitios afectados por erosión concentrada en el Municipio de San Vicente Ferrer donde se pueda realizar la intervención con soluciones basadas en la naturaleza y obras de bioingeniería.
- Proponer obras de bioingeniería para la recuperación de las áreas afectadas por procesos de erosión identificadas en el Municipio de San Vicente Ferrer.
- Realizar procesos de divulgación y transferencia de conocimiento de los métodos de intervención propuestos para el control de la erosión a partir de obras bioingeniería para las cuales se ha documentado su efectividad a la administración municipal de San Vicente Ferrer y a las Juntas de Acción Comunal de los sitios trabajados.

4. Antecedentes

4.1. Referentes en la implementación de soluciones basadas en la naturaleza

Las soluciones basadas en la naturaleza (NbS) hacen referencia a la restauración, protección o gestión de los ecosistemas naturales y sus servicios, proporcionando beneficios para el bienestar humano, la biodiversidad o la mitigación y adaptación al cambio climático y el riesgo de desastres, encontrando dentro de estas comúnmente la restauración de humedales y la reforestación para la reducción de la erosión. La vegetación ha sido utilizada desde siempre en la protección contra la erosión, Evette et al (2009) examinan las diferentes técnicas de bioingeniería utilizadas en la antigüedad en Europa desde 1600 hasta la actualidad para el control de la erosión en ríos y riberas, comparando técnicas y materiales vivos de acuerdo a su fuerza y protección contra la erosión, asimismo, comparan técnicas de bioingeniería viejas y nuevas mostrando su evolución desde un punto de vista técnico y social, muchas de las cuales se emplean hoy en día en países como Francia (Lachat 1994; Adam et al 2008), Italia (Sauli et al 2006) y Europa Central (Przedwojski et al 1995; Schiechtl and Stern 1996; Faber 2004 en Evette et al, 2009). De igual forma estas técnicas se han desarrollado alrededor del mundo como en América (Gray and Sotir 1996; Lewis 2000; Petrone y Preti 2008) y en Asia (Barker et al 2004; Wu y Feng 2006 en Evette et al, 2009), siendo mucho más fácil de implementar hoy en día gracias a la tecnología, por ejemplo, con las excavadoras mecánicas o la hidrosiembra que arroja mezcla de agua, fertilizante y semillas que permite el rápido crecimiento de la vegetación en las laderas. De igual forma la aparición de nuevos materiales como mallas metálicas, geomantos y geotextil muestra el desarrollo de nuevas técnicas. Aunque el uso de vegetación para el control de la erosión de orillas ha mostrado buenos resultados en procesos erosivos pequeños, no puede

resistir en ambientes donde el flujo es constante con transporte alto de sedimentos (Evette et al, 2009).

Christine et al (2018) hace una evaluación de la influencia de los bosques en la reducción del riesgo por amenazas naturales, discutiendo tres componentes del riesgo: la probabilidad de ocurrencia, la propagación y la intensidad, mostrando que existen modelos que permiten evaluar los efectos de los bosques en la amenaza natural, pudiéndose integrar en el análisis cuantitativo de riesgos para los fenómenos de avalanchas de nieve, caída de rocas, deslizamientos superficiales, inundaciones y flujos de escombros. Sin embargo, la poca información de eventos registrados con mediciones de magnitud y frecuencia, generan grandes incertidumbres, no obstante, se han propuesto distintos modelos estadísticos que tienen en cuenta el efecto de los árboles en la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (ej: Bathurst et al., 2010; Cohen et al., 2011; Schwarz et al., 2016; Wilkinson et al., 2002; Wu and Sidle, 1995) algunos consideran parámetros de cohesión adicional (ej: Dietrich and Reiss, 1995; Wu and Sidle, 1995) o el reforzamiento que brindan las raíces (ej: Cohen and Schwarz, 2017). En el caso de las inundaciones la variable vegetación se incluye en los modelos bajo el parámetro de rugosidad para el cálculo de la esorrentía. El efecto de los árboles en la propagación en el caso de los fenómenos de caídas de roca generalmente se explica agregando un parámetro de rugosidad adicional (p. ej: Bartelt et al., 2013) o calculando la energía de disipación en los tallos de los árboles (p. ej: Dorren et al., 2006; Liniger, 1996; Woltjer et al., 2008). En el caso de los flujos de escombros y deslizamientos superficiales, el efecto de barrera de los árboles es considerado indirectamente incrementando los parámetros de rugosidad en el modelo (Poltnig et al., 2016; Schraml et al., 2015). Los resultados de las investigaciones de campo deben combinarse en un marco para el análisis de riesgos que permitan una representación estandarizada del efecto de

los bosques en el análisis de riesgos. La aplicación de modelos empíricos que simulan la ocurrencia y propagación de procesos de amenazas naturales que tienen explícitamente en cuenta la vegetación (p. ej., Dorren, 2015; Dorren y Schwarz, 2016) pueden proporcionar una base importante que permita modelar escenarios con y sin bosques.

Existe consenso en la literatura científica que los ecosistemas de bosque juegan un papel importante en la prevención y reducción del riesgo de amenazas naturales. Los bosques ofrecen sinergias en la reducción de múltiples riesgos y los costos de instalación y mantenimiento son considerablemente bajos en comparación con las medidas estructurales. Sin embargo, aún falta una cuantificación de la reducción del riesgo por la instalación de bosques de protección que realice una comparación objetiva con medidas estructurales (Christine et al, 2018). Existen métodos y modelos que evalúan los efectos de los bosques a escala local o de talud, sin embargo, se requiere ampliar el enfoque para niveles regionales o escala nación.

El progreso a nivel global desde la revolución industrial y el perfeccionamiento en la ingeniería ha permitido el desarrollo de grandes obras de infraestructura, muchas de las cuales usualmente son vistas en zonas de afectación por procesos erosivos severos o movimientos en masa complejos para la mitigación del riesgo, no obstante, las infraestructuras grises generalmente no brindan servicios económicos, ambientales y sociales adicionales, tienden a ser obras mucho más costosas y, por lo general, carecen de la capacidad de autoajustarse a las consecuencias de las condiciones cambiantes a lo largo del tiempo Sebesvari et al (2019). En contraste, las soluciones basadas en ecosistemas son relevantes para varias dimensiones de la reducción del riesgo de desastres (RRD) por ejemplo, pueden ayudar a reducir la vulnerabilidad social debido a su contribución al suministro de alimentos y agua; como una diferencia importante con la infraestructura gris, las soluciones verdes también pueden atenuar el peligro

en sí. Por ejemplo, los humedales restaurados y mantenidos, como llanuras aluviales, marismas, turberas y lagos, ayudan a aumentar la infiltración de lluvia y, por lo tanto, reducen la descarga máxima de los ríos, que se ve reflejada en la disminución de desbordamientos e inundaciones. Keesstra et al (2018) revisa ejemplos clave para comprender el efecto superior de las soluciones basadas en la naturaleza para mejorar la sostenibilidad de los sistemas de captación mediante la promoción de funciones deseables del suelo y el paisaje. El uso de conceptos como conectividad y la teoría del marco de pensamiento sistémico permitió revisar la gestión costera y fluvial como guía para evaluar otras estrategias para lograr la sostenibilidad.

En la gestión de tierras, las SbN no son una gestión convencional. A través de un conjunto de casos de estudio: la agricultura ecológica en España; reconstrucción en Eslovenia; la restauración de la tierra en Islandia, la captura de sedimentos en Etiopía y la construcción de humedales en Suecia, Keesstra et al (2018) muestran el potencial de las soluciones basadas en la naturaleza (NBS) como una solución rentable a largo plazo para los riesgos hidrológicos y la degradación de la tierra.

Sebesvari et al (2019) explora las formas en que los ecosistemas y la infraestructura verde son críticas en el contexto de la reducción del riesgo de desastres para informar las pérdidas respectivas en el Monitoreo del Marco de Sendai (SFM, por sus siglas en inglés), Argumentando que informar sobre infraestructura verde bajo los indicadores D-4: *Número de dependencias e instalaciones de infraestructuras vitales de otro tipo destruidas o dañadas atribuido a los desastres* y C-5: *Pérdidas económicas directas derivadas de los daños o la destrucción de infraestructuras vitales atribuidas a los desastres*, en el SFM representa una oportunidad para rastrear pérdidas, pero no proporciona información directa sobre el progreso realizado en la reducción del riesgo, pues no informa directamente sobre las soluciones implementadas. Los objetivos e indicadores

personalizados de acuerdo con las necesidades de los países dentro del SFM podrían ser una oportunidad más práctica para informar tanto sobre las pérdidas como sobre el progreso en la reducción del riesgo. Por su parte, Marchal et al (2019) investigan sobre el rol que tienen las industrias de seguro y reaseguradoras en la ayuda al manejo del riesgo de desastres mejorando la reducción del riesgo de desastres y la prevención de pérdidas, incluyendo las soluciones basadas en la naturaleza en línea con el Marco de Sendai. Muestra cómo esta industria está teniendo un mejor entendimiento de la amenaza y la mitigación, abriendo la discusión sobre nuevos temas como planes o esquemas de aseguramiento natural y la evaluación de costos de pérdidas evitados gracias a las medidas de protección ecológicas. Tradicionalmente esta industria depende del conocimiento de los modelos de pérdida en desastres, por lo que su rol ha sido crucial en el momento de ocurrencia de los desastres, en la recuperación posterior al desastre y a través de las indemnizaciones. Sin embargo, la industria de las aseguradoras se está moviendo hacia las fases anteriores de la gestión de riesgo por ejemplo en los análisis de riesgo, la preparación temprana y especialmente hacia la evaluación del potencial de prevención para la reducción de los costos de pérdidas en caso de un evento de desastre, Por lo que es vital que la industria cuente con datos claros que respalden que las soluciones basadas en la naturaleza están en una buena combinación: económicamente viables, financieramente atractivas para la inversión y con medidas de los efectos positivos en la reducción de los riesgos de desastres.

Si bien las soluciones basadas en la naturaleza y la restauración de ecosistemas para la reducción del riesgo de desastres son ampliamente conocidas y aplicadas, aún se evidencia en las publicaciones científicas una fuerte influencia de los países desarrollados, Sudmeier-Rieux y otros (2021) hacen una revisión de 529 artículos en inglés sobre reducción de riesgos de desastres basada en ecosistemas (Eco-DRR) publicados entre el 2000 y 2019, evidenciándose una

distribución geográfica y alcance limitado, concentrándose la mayoría de publicaciones en zonas urbanas del hemisferio norte, con insuficiente investigación relevante en áreas de costa, tierras secas y cuencas hidrográficas del hemisferio sur. En la revisión bibliográfica los artículos se clasifican en 9 temáticas, 7 corresponden a diferentes tipos de ecosistemas y las otras dos son transversales: economía y múltiples ecosistemas, evalúa el nivel de confianza de la función o los servicios ecosistémicos en la atenuación de las amenazas. Los artículos económicos tienen la confiabilidad más alta, ya que presentan evidencia cuantitativa (monetaria) de las funciones ecosistémicas en la reducción del riesgo de desastres. Aunque la evidencia en los distintos artículos revisados en las 9 categorías es heterogénea, los artículos estaban generalmente de acuerdo en el papel de los ecosistemas en la reducción del riesgo de desastres. La evaluación del tipo de método utilizado en los estudios muestra que el 42% de las investigaciones se basó en métodos cuantitativos, el 27 % en métodos cualitativos y el 17% en métodos mixtos. El 14 % restante fueron conceptuales o descriptivos. Por su parte, Cousins (2021) hace igualmente una consulta sobre la estructura de investigación académica de las soluciones basadas en la naturaleza y propone una reorientación de las mismas para incluir enfoques más incluyentes que utilizan el poder de la naturaleza y las personas para realizar transformaciones sociales, políticas y económicas proponiendo tres clasificaciones: 1) *raza y clase*, 2) *coproducción transformadora* y 3) *articulación de valor*, como punto de partida para académicos, activistas y planificadores sobre cómo participar de manera crítica en las políticas de gobernanza ambiental y toma de decisiones. Nuevamente, el principal problema es que la mayoría de los trabajos publicados en revistas indexadas corresponden a la región norte de América y Europa y omite la publicación de trabajos en libros. Gran parte de los estudios se centran en áreas urbanas, siendo más enfocadas a infraestructura verde y servicios ecosistémicos. La recomendación más mencionada entre los artículos es la necesidad de mejorar los sistemas de gestión de riesgo que

incluyan la gestión de los recursos naturales y un manejo integrado del riesgo. Otras recomendaciones abogan por mejores prácticas, indicadores y estándares de diseño para las Estrategias de Reducción de Riesgo de Desastres Basada en ecosistemas (Eco-DRR) integrando la investigación ecológica a largo plazo y el modelamiento de datos en los servicios ecosistémicos. Este último es principalmente importante para las políticas globales y nacionales, que cada vez más buscan reconocer el papel de los ecosistemas en la reducción del riesgo de desastres, en particular en el monitoreo del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (SFDRR).

4.2. Obras de bioingeniería construidas en ambientes similares

La bioingeniería comprende el uso de la vegetación para la estabilización de taludes y el control de la erosión, empleando las raíces y el follaje de las plantas como elementos estructurales mecánicos para la protección del talud o ladera. Los elementos vivos se colocan en el talud en diversos sistemas de arreglos geométricos de tal forma que ellos actúan como refuerzo, como drenaje o como barrera para los sedimentos, para lo cual debe tenerse en cuenta el comportamiento de los taludes y la mecánica de suelos (Gray y Sotir, 1996 en Suárez, 2001). A continuación, se describen algunos casos de implementación de técnicas de bioingeniería que resultan ser soluciones óptimas en procesos erosivos o de remoción en masa.

Li (2006) realiza un proyecto de estabilización de márgenes para puentes que cruzan arroyos de Texas, en los Estados Unidos, donde los drenajes presentaban desequilibrio dinámico y fallas en las márgenes, la mayoría de los puntos de falla o erosión presentaban tratamientos rígidos como pantallas en concreto, sustituyendo este por soluciones alternativas de bioingeniería para

el tratamiento en el límite de los puentes que permita la absorción de la fuerza de erosión sin afectar la infraestructura. El resultado implementado y el seguimiento del proyecto de estabilización de ribera le permitieron demostrar la aplicabilidad de técnicas de bioingeniería en zonas cálidas. Por su parte, Petrone y Petro (2010) analizan el caso de dos intervenciones en el área de Río Blanco en Nicaragua con fajinas y empalizadas vivas para la estabilización de ribera, evaluando la idoneidad de especies nativas (*Erythrina fusca* (Búcaro), *Gliricidia sepium* (matarratón) y *Tabebuia rosea* (Guayacán rosado)) haciendo una comparación de los costos en Nicaragua vs una instalación similar en Italia, siendo entre 1,5 y 4 veces más económica, concluyendo que es una alternativa social y técnicamente adecuada para la mitigación del riesgo por inundación para esta región tropical. Nicaragua al igual que Colombia es un país en vía de desarrollo, donde se busca que las intervenciones ante situaciones de inestabilidad de taludes o en procesos de protección de orillas mediante soluciones basadas en la naturaleza o técnicas de bioingeniería puedan ser adoptados y replegados fácilmente por las comunidades, en esta medida, la intervención con bioingeniería se ajusta al concepto de desarrollo sostenible, pues facilita el uso de mano de obra local, materiales propios del área de intervención y se basa en conceptos sencillos que pueden ser replegados por las comunidades locales.

García - Vega et al (2014) presenta los criterios para el cálculo de muros entramados o Krainer, propone una metodología basada en la comprobación de tensiones admisibles entre el terreno y los materiales constructivos, comprobando la seguridad frente al deslizamiento, vuelco, resistencia a flexión y comprobación de anclajes y elementos de unión, para asegurar la estabilidad y resistencia de estos muros, puesto que, en general, el fallo asociado a su empleo radica en un diseño sin cálculos, una deficiente ejecución, una ubicación inadecuada o en la falta de arraigo de la vegetación. Mediante la utilización de entramados de madera con vegetación o

muros Krainer se consigue una estabilización de taludes y márgenes más duradera e integrada que con técnicas puramente constructivas, pues toda la estructura queda sustituida por vegetación, siendo el sistema radical de las plantas el que funciona como elemento estabilizador del terreno a medio y largo plazo.

En Colombia, Rivera (1998, 2002) a través del Centro Nacional de Investigaciones del Café CENICAFÉ ha dado a conocer las técnicas de bioingeniería para el control de erosión en zonas de ladera al tiempo que Suárez (1998, 2001) lo ha hecho desde la Universidad Industrial de Santander UIS, posteriormente Rivera y Sinisterra (2006) presentan la bioingeniería como herramienta de uso social para la restauración ecológica y el control de la erosión severa, mostrando ejemplos de implementación en el Valle del Cauca, por su parte CORNARE (2011) presenta un amplio rango de especies para el control de la erosión y expone distintas prácticas para la mitigación temprana del riesgo entre las que considera el uso de vegetación, obras biomecánicas y civiles, por su parte Rivera et al (2015) presenta de forma detallada el paso a paso para la construcción de biofiltros, trinchos en vertedero y escalonados en ladera con esquemas y fotos de obras implementadas en municipios de la jurisdicción de la CAR.

Sánchez (2017) analiza el refuerzo mecánico biológico de los materiales con raíces de saúco y nacederos sembrados como parte de la solución bioingenieril determinando el manejo hidráulico desde el inicio de las obras con biofiltros vivos, trinchos escalonados en vertedero abierto y trinchos vivos en ladera con la captación, transporte y disposición del agua en el tratamiento de dos problemas de erosión y movimientos en masa realizados por la CAR (Cundinamarca) entre los años 2014 y 2015 en los municipios de la Mesa y La Calera, midiendo las propiedades mecánicas de los materiales con y sin raíces hasta 2,5m de profundidad, mediante ensayos de corte directo en campo y laboratorio en el desarrollo parcial (seis meses de su siembra) y total

(dos años de siembra) observando que aumentó la cohesión del material para la validación geotécnica un 30% y 80% respectivamente, estos datos le permiten concluir que el control hidráulico superficial y sub superficial del agua de escorrentía e infiltración más el refuerzo mecánico al material dado por las obras y la siembra, establecen la mayor estabilidad a los dos años de construcción de la solución con bioingeniería, representada por los factores de seguridad para materiales en humedad de campo y el total desarrollo del sistema de raíces en las dos especies analizadas. Morales y Sarmiento (2020) realizan ensayos en laboratorio de compresión y de flexión en guadua la angustifolia para evaluar su resistencia y deformación según cargas preestablecidas, para calcular la carga que puede resistir una guadua de 4m de longitud para ser empleada en un talud escalonado diseñado con 8 guaduas y 3 apoyos verticales teniendo como resultado una resistencia por escalón de 17,31 ton/m² aproximadamente.

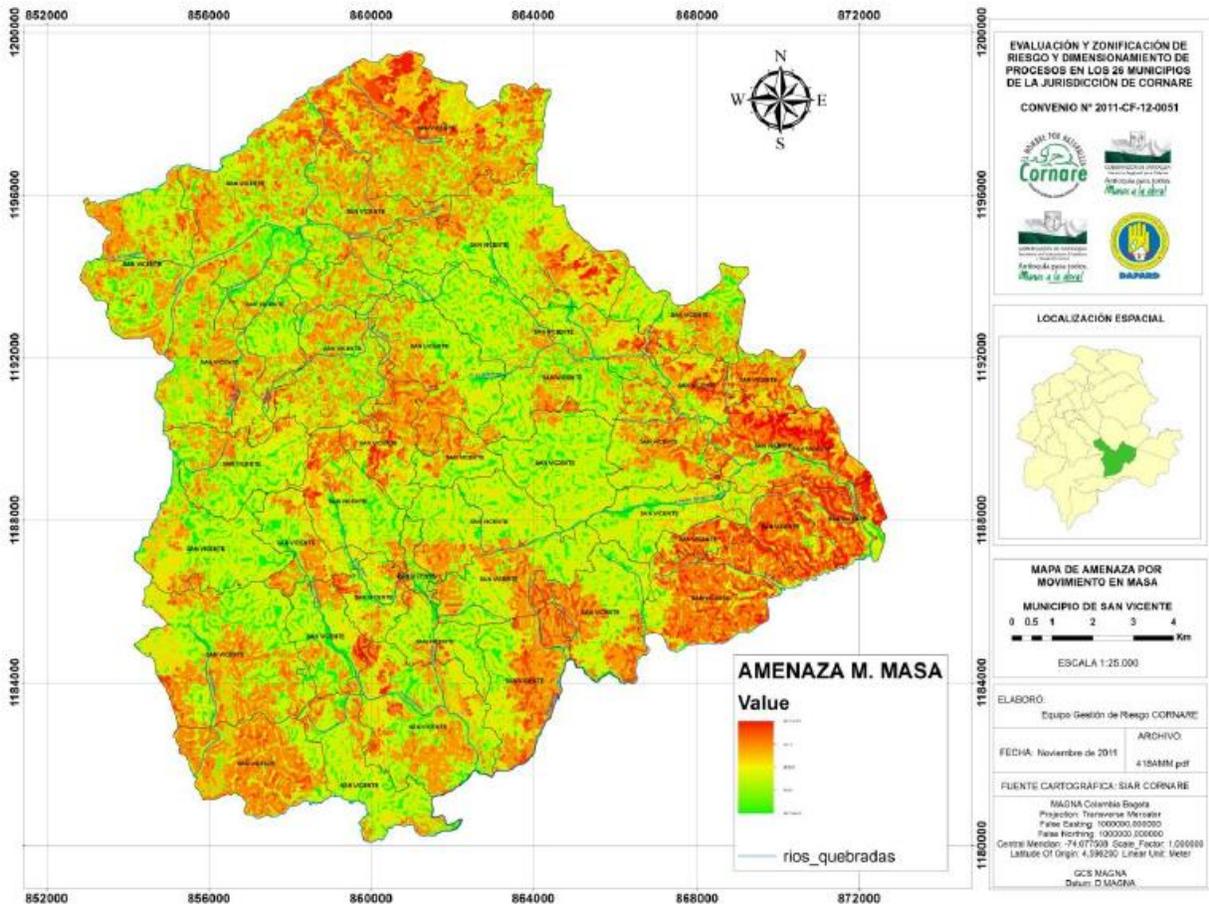
Sarmiento (2021) realiza una modelación numérica en SLIDE mediante el método de Bishop simplificado de taludes reforzados con guadua para un escenario de un talud de 15 m de longitud con diferentes rangos de pendiente a los cuales se aplican trinchos de guadua para analizar la variabilidad en el factor de seguridad (Fs) para suelos arcillosos y suelos granulares. Identificando que cuando se tienen suelos arcillosos de alta pendiente el espaciamiento ideal entre trinchos es de 1,2 m y para suelos granulares 1,5 m con profundidades de 1,9 m.

4.3. Estudios de amenaza y riesgo en el municipio de San Vicente Ferrer

Los primeros estudios relacionados con amenaza y riesgo en el municipio de San Vicente Ferrer fueron realizados por FOPREVE (1994) para la zona urbana del municipio donde se identificaron como zonas de amenaza alta por movimiento en masa las casas localizadas en la

parte alta de la salida hacia Concepción, las viviendas ubicadas en la parte posterior del Parque, el Sector del Hospital, deslizamiento en la salida hacia El Botijón, Sector Barrio Nuevo y las laderas que limitan el Cementerio. Posteriormente, CORNARE (2012), realizó la evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimientos en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio a escala 1:25.000 a partir de un análisis de álgebra de mapas considerando como variables de la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa fenómeno la pendiente, el material geológico superficial, la geomorfología, las coberturas de la tierra y la precipitación y por otro lado un factor de recurrencia a partir del inventario de eventos registrado en las bases de datos de DesInventar, información del SIAR de CORNARE, el catálogo de sismos del Servicio Geológico Colombiano y el levantamiento de información directamente en campo a partir de encuestas realizadas en las Juntas de Acción Comunal, dando como resultado el mapa de la Figura 6 donde se representan las áreas expuestas a amenaza por movimiento en masa en un modelo ráster, clasificado a partir de valores que definen niveles de amenaza muy alta, alta, media, baja y muy baja.

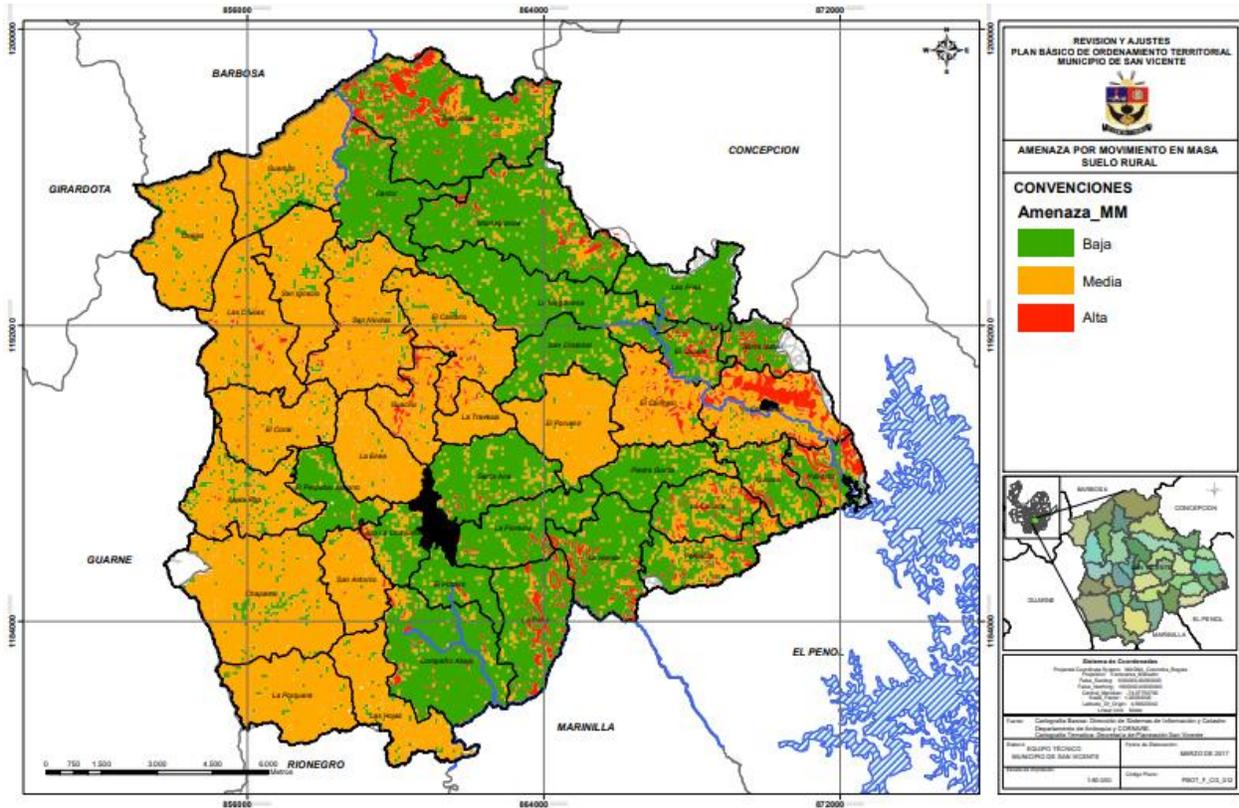
Figura 6. Mapa de amenaza por movimiento en masa del municipio de San Vicente Ferrer, según CORNARE, 2012.



Nota: Tomado de CORNARE (2012).

Mediante el Acuerdo 008 de julio de 2017, el Concejo del Municipio de San Vicente Ferrer adoptó el Plan Básico de Ordenamiento Territorial en el que se incluye el mapa PBOT_F_CG-012_ Amenaza Movimiento en Masa Suelo Rural (Figura 7) el cual fue construido a partir del estudio de CORNARE (2012) zonificando la amenaza a escala 1:25.000 en valores de alta, media y baja siendo particular la zonificación entre amenaza media y baja por el límite entre la división política de las veredas.

Figura 7. Mapa de Amenaza por Movimiento en Masa en Suelo Rural, PBOT San Vicente 2017.

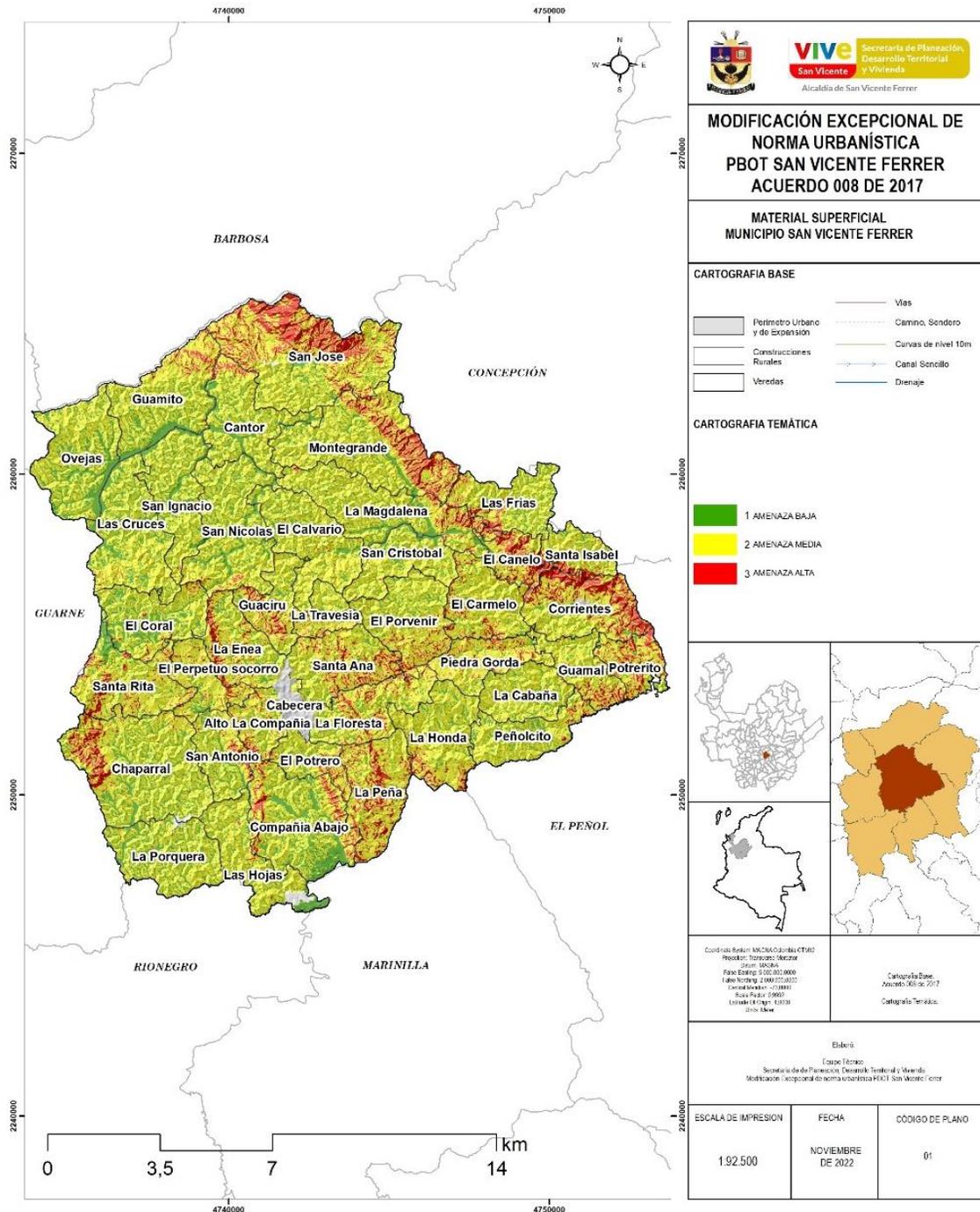


Nota: Tomado de PBOT San Vicente (2017).

En 2022 se realizó una revisión del PBOT, Acuerdo 008 de 2017, para someterlo a modificación excepcional de norma urbanística. En este caso se construyó un nuevo mapa de amenaza por movimiento en masa para el municipio, a partir de información actualizada de material geológico superficial, geomorfología, procesos erosivos y pendientes generadas en ArcGIS a partir de la cartografía del IGAC 1:10.000 para todo el municipio (Figura 8), al igual que el anterior mapa zonifica la amenaza en alta, media y baja, como lo establece el decreto único regulatorio 1077 de 2015 del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, pero en el resultado se aprecia una zonificación más a las condiciones geomorfológicas y de pendiente de la zona, asociando la amenaza alta a las áreas de fuerte pendiente de los escarpes regionales y las áreas de amenaza baja a las zonas más planas asociadas principalmente a los valles aluviales y

terrazas. En ésta última zonificación se muestra la amenaza media más característica para la mayor parte del municipio en su área rural.

Figura 8. Mapa de amenaza por movimiento en masa en suelo rural propuesto en la revisión y actualización del PBTO 2022.



Nota: Tomado de Modificación Excepcional de Norma Urbanística (2022).

5. Marco Teórico

5.1. Conceptos generales sobre geomorfología y erosión

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas del relieve, su origen, descripción y naturaleza, así como la evolución del paisaje y su relación con los procesos internos y externos de la tierra que modelan el paisaje y registran los cambios geológicos a través del tiempo, en los que se incluyen los procesos denudativos que están relacionados con la pérdida o degradación del terreno, tanto por acción netamente del agua, que origina arrastre de partículas (erosión), como por la acción de la fuerza de la gravedad, en conjunto con el agua (remoción en masa) (Rivera et al, 2015). La erosión comprende el desprendimiento, transporte y depósito de materiales de suelo o roca por la acción de un fluido en movimiento y puede ser generada por el agua (erosión hídrica) como por el viento (erosión eólica). En el caso de la erosión producida por el agua, el proceso puede ser analizado iniciando por el desprendimiento de las partículas de suelo, debido al impacto de las gotas de lluvia y al mismo tiempo ocurre el proceso de flujo superficial o escorrentía, la cual hace que las partículas removidas sean incorporadas a la corriente y transportadas ladera abajo (Suarez, 2001). Entre los tipos de erosión hídrica se tiene laminar cuando las corrientes superficiales de agua pueden desprender las partículas superficiales de suelo en un sistema de erosión por capas que se profundizan, en surcos cuando la concentración del flujo genera pequeños canales o rugosidades que se profundizan de forma semiparalela. Una vez los surcos se profundizan por el socavamiento repetitivo que ocasiona el flujo incontrolado del agua que escurre ladera abajo (agua de escorrentía) nos encontramos en presencia de una cárcava, rasgos típicos de erosión concentrada, cuyas dimensiones pueden ser del orden de decenas a centenares de metros de longitud y del orden de decímetros a decenas de metros de sección transversal (Suarez, 2001). Cuando las cárcavas evolucionan con crecimiento hacia arriba

y hacia los lados de la ladera, toman el nombre de cárcavas remontantes (Rivera, 1998), las cuales son frecuentes en zonas con pendiente superior al 50% de inclinación y suelos muy meteorizados. Una vez iniciado este proceso erosivo es muy difícil suspender, por lo que el control de cárcavas se torna complejo, ya que intervienen aguas superficiales y subsuperficiales, que ocasionan saturación del suelo, profundización del cauce principal de la cárcava, destrucción de sus taludes, movimientos en masa, agrietamientos, represamiento de aguas de escorrentía y flujos de lodos y escombros (Rivera, 1998).

Otro proceso erosivo importante para considerar es la socavación, proceso de erosión por remoción de materiales blandos en la base de la orilla de un cuerpo de agua, o de un escarpe o acantilado produciendo inestabilidad en la orilla y posterior volcamiento. Los mecanismos de erosión pueden estar ligados a la acción propia de la corriente o a una pérdida de cohesión en el material de la orilla debido a su contenido de humedad (González y García, 2001) causada por el aumento del nivel de agua en las avenidas, modificaciones en la morfología del cauce o por la construcción de estructuras en el cauce como puentes, espigones, etc. La socavación está controlada por las características hidráulicas del cauce, las propiedades de los sedimentos del fondo y la forma y localización de los elementos que la inducen (Suárez, 2001).

5.2. Conceptos generales sobre soluciones basadas en la naturaleza y bioingeniería

Las soluciones basadas en la naturaleza (NbS) hacen referencia a la restauración, protección o gestión de los ecosistemas naturales y sus servicios, proporcionando beneficios para el bienestar humano, la biodiversidad o la mitigación y adaptación al cambio climático y el riesgo de desastres. Éstas se pueden dividir en dos grupos principales de estrategias: soluciones para el

suelo y soluciones para el paisaje. Las primeras, apuntan a mejorar la salud del suelo y las funciones del suelo a través de las cuales se mantendrán o restaurarán los servicios ecosistémicos locales. Las soluciones de paisaje se centran en el concepto de conectividad, haciendo que el paisaje esté más o menos conectado, facilitando que menos lluvia se transforme en escorrentía y, por lo tanto, reduciendo el riesgo de inundaciones, aumentando la humedad del suelo y reduciendo las sequías y la erosión del suelo, buscando lograr la sostenibilidad entre el desarrollo y el ecosistema.

La bioingeniería por su parte comprende el uso de la vegetación para la estabilización de taludes y el control de la erosión, empleando las raíces y el follaje de las plantas como elementos estructurales mecánicos para la protección del talud o ladera. Los elementos vivos se colocan en el talud en diversos sistemas de arreglos geométricos de tal forma que ellos actúan como refuerzo, como drenaje o como barrera para los sedimentos, para lo cual debe tenerse en cuenta el comportamiento de los taludes y la mecánica de suelos (Gray y Sotir, 1996 en Suárez, 2001), también resulta útil conocer algunos indicadores visuales de naturaleza geológica, pedológica, geomorfológica, hidrológica, botánica y antrópica que pueden evidenciar la inestabilidad de un terreno (Rivera y Sinisterra, 2006) y que nos ayude a determinar la mejor solución de bioingeniería y el diseño de vegetación a implementar.

La vegetación cumple dos funciones principales, en primer lugar, tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y, además, da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces. Como controlador de infiltraciones tiene un efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo, al tomar el agua que requiere para vivir (Suarez, 1998), ofrece al suelo una protección física frente al impacto de la lluvia y la escorrentía y reduce la velocidad del agua al aumentar la resistencia hidráulica del terreno; por

tanto, disminuye la capacidad erosiva del agua (Rivera, 1998). Las raíces en el suelo producen una matriz reforzada, en la que el esfuerzo se transfiere a las raíces durante la carga del suelo, de forma similar a las estructuras de concreto reforzadas con acero y fibra de vidrio (Pollen, 2007; Thorne, 1990 en Sánchez, 2017). Las características de las raíces dependen de la especie vegetal, la edad, las propiedades del perfil de suelo y el medio ambiente. La profundidad de las raíces generalmente, no supera los cinco metros en árboles grandes, dos metros en los arbustos y 30 centímetros en los pastos, sin embargo, Algunas plantas poseen un sistema de raíz “extensivo”, en el cual las raíces alcanzan profundidades o extensiones grandes, mientras otras forman un sistema “intensivo” con raíces más cortas y finas (Suárez, 1998).

La biotecnología por sus características ambientales es muy atractiva para la estabilización de taludes y el control de terrenos saturados y con procesos de erosión concentrada. La utilización de trinchos utilizando estacas vegetales y de muros criba con maderas y ramas de maleza representan soluciones muy interesantes para el manejo de taludes, pero también se utilizan entre otros, filtros vivos, trinchos en vertedero y trinchos de ladera o en terrazas.

Los filtros vivos son zanjas interconectadas en el sentido de la pendiente, que se rellenan con camas superpuestas de material vegetal (guadua o especies leñosas), con capacidad de rebrote. Los filtros vivos permiten la evacuación rápida de las aguas internas que saturan el terreno, conduciéndolas a lugares seguros como drenajes naturales y cunetas (Rivera, 1998), (Rivera & Sinisterra, 2006), (Rivera, 2013). Adicionalmente, como complemento biológico a la construcción de los biofiltros, se usan especies vegetales, tales como Guadua – *Guadua angustifolia*, Nacedero – *Trichanthera gigantea*, Matarratón – *Gliricidia sepium*, Acacia Forrajera – *Leucaena leucocephala*, Sauco – *Sambucus nigra*, Sauce – *Salix humboldtiana*, entre otras especies, que son sembradas por cada metro de filtro, con el fin de que este material vivo rebrote y aumente el amarre, anclaje y

cohesión del terreno, garantizando la permanencia a futuro de los drenajes construidos (Rivera, 2013).

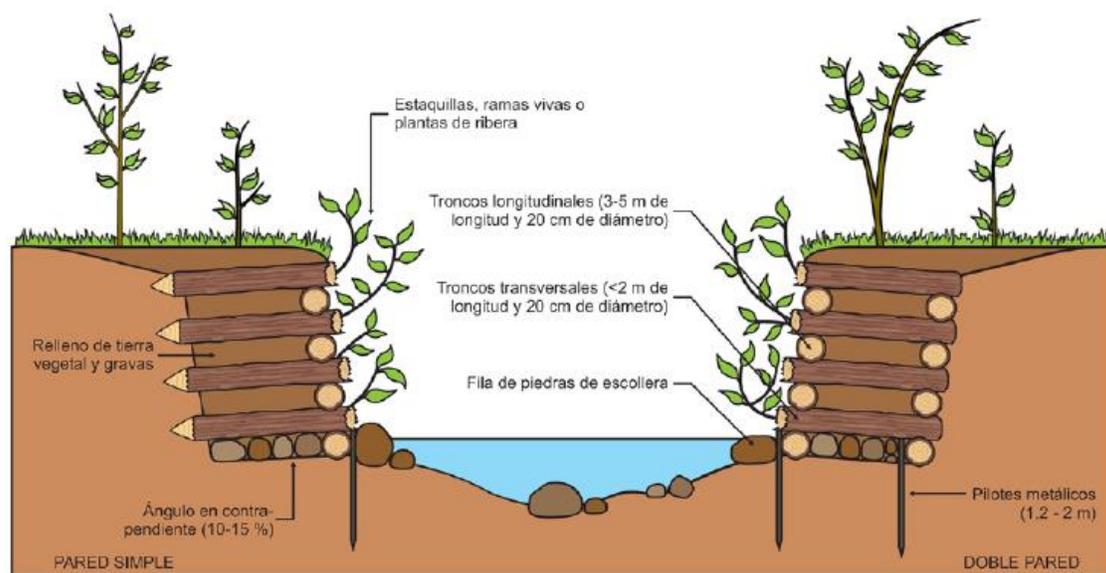
Un trincho se define como un muro pequeño transversal que se construye en una quebrada o arroyo para provocar sedimentación aguas arriba y en otros casos cortar la pendiente del terreno. También, como estructuras construidas para disminuir la velocidad del agua de escorrentía y de esta forma, favorecer el depósito de sedimentos aguas arriba de la obra, o como presas de control de sedimentos (Rivera, 2002). Los trinchos elaborados en madera son menos costosos que aquellos construidos en concreto y piedra, pero igual que los anteriores, presentan una vida útil corta debido a la descomposición rápida de los materiales. Por tanto, éstos deben complementarse con coberturas vegetales y estacas vivas para alargar su vida útil (Rivera, 2002). Los trinchos en vertedero son estructuras en guadua que se construyen perpendicularmente y en forma escalonada a lo largo del eje longitudinal de las cárcavas y surcos permitiendo la evacuación rápida de las aguas de escorrentía y a su vez, evitando que se erosionen los materiales gruesos y/o franco arenosos; conduciéndolas hasta lugares seguros, como drenajes naturales y cunetas (Rivera, 1998), (Rivera, 2002), (Rivera & Sinisterra, 2006). Los trinchos en ladera configuran terrazas de pendiente escalonada y pantallas (base del escarpe) y se construyen para reconfigurar la ladera en pendiente continua (trinchos en ladera) y en escalones (terrazas). Estos trinchos en ladera, para la configuración en pendiente continúa, tienen por objeto, reconfigurar las laderas afectadas por procesos erosivos y por movimientos en masa. Nunca los trinchos en ladera pretenden servir como estructuras de contención (Rivera, 2013).

Las medidas correctivas de los movimientos en masa y los procesos de erosión se enmarcan en ambientes dinámicos, donde los suelos y las coberturas vegetales evolucionan a partir de las exigencias impuestas por los tratamientos realizados. La siembra de especies pioneras como un

complemento biológico en las obras de bioingeniería, tiene varios beneficios además del control de la erosión y la estabilidad mecánica e hidráulica de las laderas; la restauración de la cobertura vegetal y sus funciones permite recuperar servicios ecosistémicos que se pierden después de la ocurrencia de un deslizamiento. La introducción de la vegetación pionera que inicia la sucesión, ayuda a acelerar el proceso de restauración ecológica, debido a que es importante mientras comienza la estabilización y acumulación de material orgánico (Rey, Ballais, Marre & Roviera, 2004 en Rivera et al, 2013).

Otras obras de bioingeniería que no son tan comunes en Colombia incluyen la construcción de muros de madera entramada o Krainer y los muros de escollera, los cuales son frecuentes en Europa para la estabilización de taludes o para la protección de las márgenes de río contra la socavación de las fuentes hídricas. Éstos combinan elementos constructivos inertes con elementos vegetales vivos, consiguiendo la protección y estabilización de taludes a corto, medio y largo plazo. El muro Krainer es construido a base de troncos de madera ensamblados alternativamente entre sí, que se levanta paralelo al talud y se rellena con tierra vegetal y gravas. En los huecos entre los troncos se introducen estacas, ramas vivas o plantas adaptadas a las condiciones locales (García - Vega et al, 2014) (Figura 9). Los muros de escollera están constituidos por bloques de rocas sin pulir con formas más o menos prismáticas y superficies rugosas. Estos muros pueden tener distintas formas y aplicación según sea requerido usualmente en pedraplenes, presas y obras marítimas en general, encauzamientos de fuentes y restauraciones fluviales (Ministerio de Fomento, 2006).

Figura 9. Esquema de muro entramado o Krainer en ambas orillas de un río.



Nota: Tomado de García - Vega et al (2014).

5.3. Conceptos sobre gestión del riesgo del desastres y principios establecidos en la Ley 1523 de 2012

La ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la política nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia, decreta en el artículo 1 que: “la gestión del riesgo de desastres es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible”. Consecuentes con esta definición, las soluciones basadas en la naturaleza como medidas para mitigación y la reducción del riesgo a través de la restauración de los ecosistemas naturales proporcionan beneficio para el bienestar humano y el desarrollo

sostenible. Ahora bien, en el artículo 2 de esta ley se establece que: “La gestión del riesgo es responsabilidad de todas las autoridades y de los habitantes del territorio colombiano” y por eso es necesario transferir el conocimiento de la gestión del riesgo y de las estrategias de reducción del riesgo por medio de bioingeniería y soluciones basadas en la naturaleza a las organizaciones comunales para que ellas de primera mano identifiquen sus riesgos y aprendan a gestionarlos y reducirlos con base en los ecosistemas propios del territorio que habitan, por lo que es importante tener presente los siguientes principios que se establecen en la Ley 1523 para el trabajo aquí desarrollado:

- **Principio de protección:** Los residentes en Colombia deben ser protegidos por las autoridades en su vida e integridad física y mental, en sus bienes y en sus derechos colectivos a la seguridad, la tranquilidad y la salubridad públicas y a gozar de un ambiente sano, frente a posibles desastres o fenómenos peligrosos que amenacen o infieran daño a los valores enunciados.
- **Principio de autoconservación:** Toda persona natural o jurídica, bien sea de derecho público o privado, tiene el deber de adoptar las medidas necesarias para una adecuada gestión del riesgo en su ámbito personal y funcional, con miras a salvaguardarse, que es condición necesaria para el ejercicio de la solidaridad social.
- **Principio participativo:** Es deber de las autoridades y entidades del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, reconocer, facilitar y promover la organización y participación de comunidades étnicas, asociaciones cívicas, comunitarias, vecinales, benéficas, de voluntariado y de utilidad común. Es deber de todas las personas hacer parte del proceso de gestión del riesgo en su comunidad.

- **Principio de interés público o social:** En toda situación de riesgo o de desastre, el interés público o social prevalecerá sobre el interés particular. Los intereses locales, regionales, sectoriales y colectivos cederán frente al interés nacional, sin detrimento de los derechos fundamentales del individuo y, sin demérito, de la autonomía de las entidades territoriales.
- **Principio de precaución:** Cuando exista la posibilidad de daños graves o irreversibles a las vidas, a los bienes y derechos de las personas, a las instituciones y a los ecosistemas como resultado de la materialización del riesgo en desastre, las autoridades y los particulares aplicarán el principio de precaución en virtud del cual la falta de certeza científica absoluta no será óbice para adoptar medidas encaminadas a prevenir, mitigar la situación de riesgo.
- **Principio de sostenibilidad ambiental:** El desarrollo es sostenible cuando satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de los sistemas ambientales de satisfacer las necesidades futuras e implica tener en cuenta la dimensión económica, social y ambiental del desarrollo. El riesgo de desastre se deriva de procesos de uso y ocupación insostenible del territorio, por tanto, la explotación racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente constituyen características irreductibles de sostenibilidad ambiental y contribuyen a la gestión del riesgo de desastres.

También es importante abordar algunas definiciones que trae la ley y que nos sirven como referente:

Adaptación: Son los cambios que hacemos en los sistemas naturales o humanos para ajustarnos al entorno, con el fin de evitar daños y/o aprovechar nuevas oportunidades.

Amenaza: peligro latente por un evento generado por la naturaleza o por el ser humano de manera accidental, con la severidad suficiente que puede causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Análisis de riesgo: Es el estudio de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir, la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades.

Conocimiento del riesgo: Es el proceso de identificación de las amenazas, la vulnerabilidad de los elementos expuestos y los escenarios de riesgo, el análisis y el monitoreo del riesgo y sus componentes.

Elementos expuestos: Hace referencia a las personas, viviendas, cultivos, medios de subsistencia y bienes ambientales, sociales, económicos y culturales e infraestructura en general que por su localización pueden verse afectados por la manifestación de una amenaza.

Emergencia: Es la alteración o interrupción de las condiciones normales de nuestras actividades diarias a causa de una situación que pueda generar una afectación y que requiere de una reacción inmediata.

Gestión del riesgo de desastres: Son todas las acciones que realizamos encaminadas a conocer el riesgo, reducirlo y prepararnos para saber qué hacer en caso de que ocurra una emergencia.

Intervención: Tratamiento del riesgo mediante el cual se modifican las condiciones que propician la amenaza con el fin de reducir su impacto, así como las modificaciones en las características de los elementos expuestos para reducir su vulnerabilidad.

Intervención correctiva: Proceso para reducir el riesgo existente mediante acciones de mitigación.

Mitigación: Son las acciones que podemos hacer en el entorno para disminuir los daños generados por las amenazas que afectan nuestra manera de vivir.

Recuperación: Son las acciones para el restablecimiento de las condiciones normales de vida mediante la rehabilitación, reparación o construcción del área afectada, los bienes y servicios interrumpidos o deteriorados.

Vulnerabilidad: Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad frente a una amenaza a la que está expuesta.

5.4. Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030

El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 es un acuerdo internacional adoptado el 18 de marzo de 2015 durante la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción del Riesgo de Desastres celebrada en Sendai, Japón, siendo el instrumento sucesor del Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015 con el fin de fomentar la resiliencia y el fortalecimiento de países ante desastres.

El objetivo del Marco de Sendai es la reducción sustancial del riesgo de desastres y de las pérdidas ocasionadas por los desastres, tanto en vidas, medios de subsistencia y salud como en bienes económicos, físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países.

Metas Globales

Con el fin de evaluar los avances mundiales en el logro de este objetivo se plantea siete metas globales:

- a) Reducir considerablemente la mortalidad mundial causada por desastres.
- b) Reducir considerablemente el número de personas afectadas a nivel mundial.
- c) Reducir las pérdidas económicas causadas directamente por los desastres en relación con el producto interno bruto (PIB) mundial.
- d) Reducir considerablemente los daños causados por los desastres en las infraestructuras vitales y la interrupción de los servicios básicos.
- e) Incrementar considerablemente el número de países que cuentan con estrategias de reducción del riesgo de desastres a nivel nacional y local para 2020.
- f) Mejorar considerablemente la cooperación internacional para los países en desarrollo mediante un apoyo adecuado y sostenible que complemente las medidas adoptadas a nivel nacional.
- g) Incrementar considerablemente la disponibilidad de los sistemas de alerta temprana sobre amenazas múltiples y de la información y las evaluaciones sobre el riesgo de desastres.

Principios Rectores del Marco de Sendai

El Marco de Sendai está guiado por los siguientes principios, teniendo en cuenta las circunstancias nacionales y de conformidad con la legislación nacional, así como las obligaciones y compromisos internacionales:

- a) Cada Estado tiene la responsabilidad primordial de prevenir y reducir el riesgo de desastres, incluso mediante la cooperación internacional, regional, subregional, transfronteriza y bilateral.

- b) Para la reducción del riesgo de desastres es necesario que las responsabilidades sean compartidas por los gobiernos centrales y las autoridades, los sectores y los actores nacionales pertinentes.
- c) La gestión del riesgo de desastres está orientada a la protección de las personas y sus bienes, salud, medios de vida y bienes de producción, así como los activos culturales y ambientales.
- d) La reducción del riesgo de desastres requiere la implicación y colaboración de toda la sociedad.
- e) La reducción y la gestión del riesgo de desastres dependen de los mecanismos de coordinación en todos los sectores y con los actores pertinentes a todos los niveles.
- f) Empoderar a las autoridades y las comunidades locales para reducir el riesgo de desastres.
- g) La reducción del riesgo de desastres requiere un enfoque basado en múltiples amenazas.
- h) La reducción del riesgo de desastres es esencial para lograr el desarrollo sostenible.
- i) Los riesgos de desastres tienen características locales y específicas que deben comprenderse para determinar las medidas de reducción del riesgo de desastres.

Prioridades de acción

En aras del resultado esperado y del objetivo del Marco de Sendai, los Estados deben adoptar medidas específicas en todos los sectores, en los planos local, nacional, regional y mundial, con respecto a las siguientes cuatro esferas prioritarias:

1. Comprender el riesgo de desastres
2. Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo
3. Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia

4. Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción.

6. Metodología

La metodología empleada en la presente investigación es mixta, la cual suele emplearse cuando el fenómeno o problema de análisis es complejo y requiere un enfoque holístico con una visión más comprensiva y un mayor entendimiento del fenómeno.

Los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recolectada y lograr un mayor entendimiento del fenómeno de estudio (Hernández et al., 2014). Una enorme ventaja de este modelo es que se recolectan simultáneamente datos cuantitativos y cualitativos (en una fase) y el investigador posee una visión más completa y holística del problema de estudio, es decir, obtiene las fortalezas del análisis cuantitativo y cualitativo. El primero se representa mediante números, variables numéricas constantes, gráficas, funciones, fórmulas y modelos analíticos; mientras que el segundo es a través de textos, narrativas, símbolos y elementos visuales. Así, los métodos mixtos caracterizan a los objetos de estudio mediante números y lenguaje e intentan recabar un rango amplio de evidencia para robustecer y expandir nuestro entendimiento de ellos (Hernández et al., 2014).

Las etapas en las que suelen integrarse los enfoques cuantitativo y cualitativo son fundamentalmente: el planteamiento del problema, el diseño de investigación, el muestreo, la recolección de los datos, los procedimientos de análisis y/o interpretación de los datos

(resultados). En la mayoría de los estudios mixtos se realiza una revisión exhaustiva y completa de la literatura pertinente para el planteamiento del problema, el consecuente desarrollo de un marco teórico y la “teorización”, es decir, si el estudio se guía o no por una perspectiva teórica con mayor alcance (Creswell, 2013a en Hernández et al., 2014).

La presente metodología cuenta con un diseño anidado o incrustado concurrente de modelo dominante (DIAC) que colecta simultáneamente datos cuantitativos y cualitativos, los cuales son comparados o mezclados en la fase de análisis, lo que proporciona una visión más amplia del fenómeno estudiado. El mayor reto del diseño es que los datos cuantitativos y cualitativos requieren ser transformados de manera que puedan integrarse para su análisis conjunto. Asimismo, es necesario un conocimiento profundo del fenómeno y una rigurosa revisión de la literatura para resolver discrepancias que pudieran presentarse entre los datos (Hernández et al., 2014).

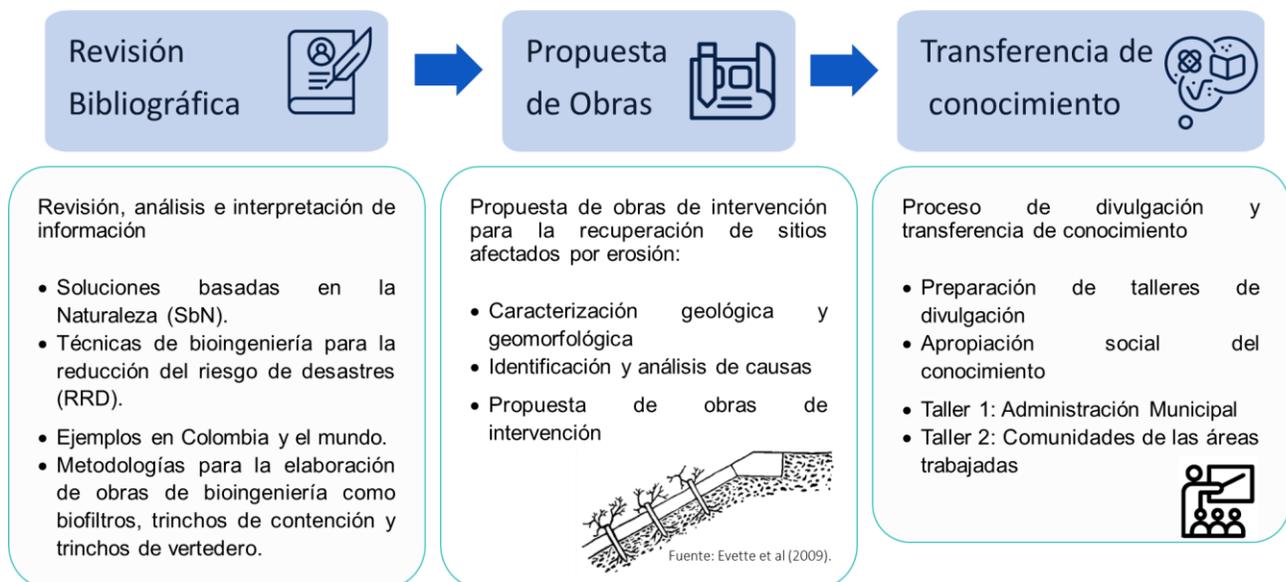
6.1. Diseño Metodológico

Para alcanzar el cumplimiento de los objetivos planteados se tienen tres momentos en el proceso investigativo como se presenta a continuación (Figura 10):

- **Revisión bibliográfica.** Consiste en la revisión, análisis e interpretación de la información necesaria para llevar a cabo la investigación y está enfocada en los temas específicos de soluciones basadas en la naturaleza y técnicas de bioingeniería para la reducción del riesgo, registrando las investigaciones donde se prueba la efectividad de las obras de bioingeniería y las soluciones basadas en la naturaleza que sirvan para la posterior propuesta de intervención. El mecanismo de captura de información es un archivo en Excel.

- **Propuesta de obras de intervención.** A partir del conocimiento adquirido se realiza la caracterización geológica y geomorfológica de los sitios seleccionados para identificar las causas que generan la afectación y posteriormente la propuesta de obras de bioingeniería para intervención con base en las metodologías consultadas.
- **Transferencia de conocimiento.** Es el proceso de apropiación social del conocimiento, donde se transmite el conocimiento generado durante la investigación a la comunidad para toma de decisiones. El mecanismo en esta fase es la preparación y ejecución de talleres de divulgación y capacitación con la administración municipal y con las comunidades afectadas.

Figura 10. Esquema metodológico de investigación.



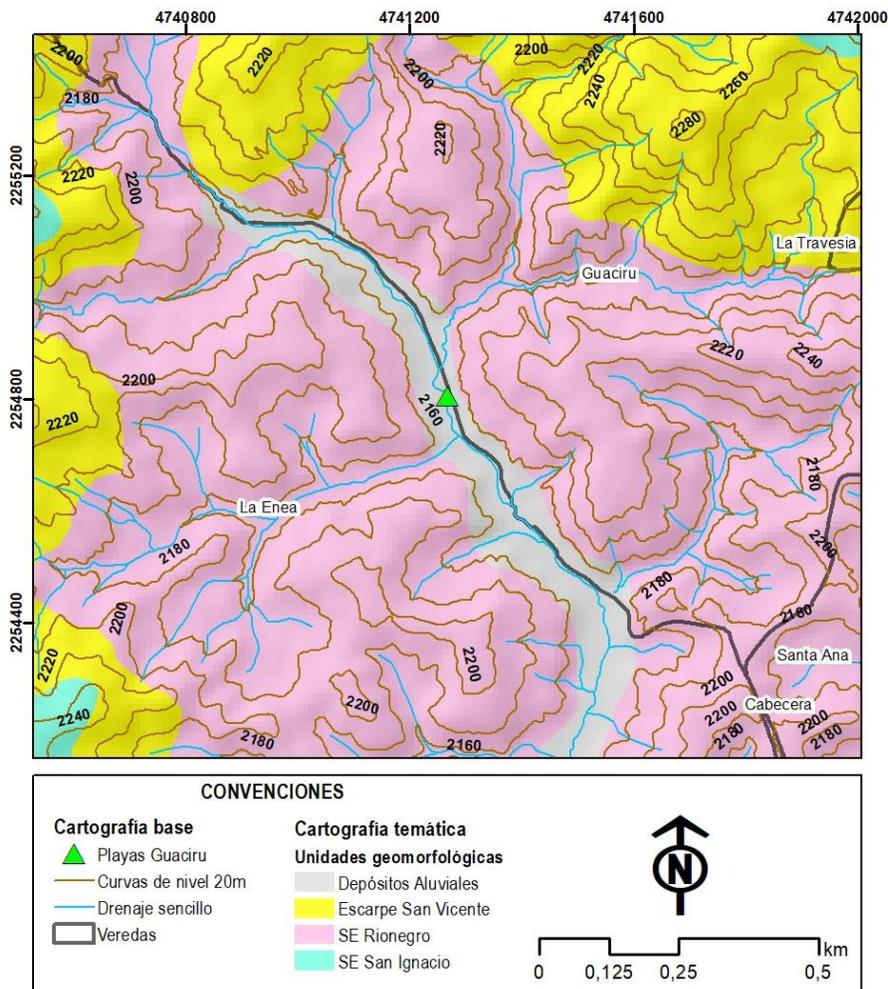
7. Caracterización de sitios afectados por erosión y propuesta de obras de intervención para la recuperación

7.1. Playas de Guacirú

Características geomorfológicas y geológicas

Este punto de estudio se ubica sobre el valle aluvial de la quebrada Guacirú, un valle intercolinar angosto modelado en la superficie de erosión de Rionegro y cubierto por depósitos aluviales recientes (Figura 11).

Figura 11. Mapa de geomorfología regional de Playas de Guacirú.



Nota: Elaboración propia a partir de Gallego (2013).

Una superficie de erosión se entiende como una porción del terreno que se forma a nivel del mar en ambientes tropicales de clima variado y que por procesos tectónicos, erosivos e isostáticos se localiza en su posición actual (Gallego, 2013). La superficie de erosión de Rionegro se localiza entre 2000 y 2200 msnm y se presenta moderadamente preservada donde predomina un relieve de colinas subredondeadas a alargadas modeladas en saprolito ígneo del Batolito Antioqueño, con valles intercolinarios con amplitud variable que evidencian los relieves de segundo orden que componen el paisaje actual, como el valle de la quebrada Guacirú y sus afluentes (Figura 12) donde se presenta acumulación de depósitos aluviales de diferente espesor compuestos principalmente por arenas finas a medias y pequeños lentes de gravas (Figura 13).

Figura 12. Geomorfología de la zona de estudio Playas Guacirú.



Los depósitos aluviales de la quebrada Guacirú, son depósitos de barras que se localizan en ambas márgenes de la quebrada, principalmente de arenas limosas a medias con algún contenido de grava, son cuarzosas con alto contenido de micas y óxidos que dan una tonalidad rojiza, con alto contenido de humedad y un nivel de plasticidad muy bajo, poco consolidadas y

fácilmente disgregable con las manos; con presencia hacia la superficie del terreno de raicillas, materia orgánica y bioturbación (Figura 13).

Figura 13. Depósitos aluviales de arena asociados a la quebrada Guacirú.



Caracterización del proceso erosivo

Las corrientes de agua poseen un comportamiento complejo y sobre todo dinámico, la cuenca, la geología, el clima, la vegetación y los factores antrópicos influyen en forma determinante en su comportamiento (Suarez, 2001) por eso es importante identificarlos y estudiarlos para poder evaluar su comportamiento erosivo.

En este caso de estudio, la quebrada Guacirú se encuentra en su etapa morfológica de juventud, en la parte media de la montaña, con un valle angosto encajado entre las colinas de la superficie de erosión de Rionegro, donde predominan los procesos de profundización de fondo o incisión y la inestabilidad lateral. En este punto se presenta un proceso de socavación de la quebrada Guacirú en un tramo de 80 m afectando la vía veredal que comunica las veredas Guacirú y San Nicolás con la zona urbana, ocasionando la pérdida de la banca de la vía que se localiza en la llanura aluvial sobre la margen izquierda de la quebrada en un tramo de 30 m de

longitud, por la erosión de la pared del canal a causa de la migración lateral del drenaje, el cual tiene una altura de 2,30 m. El suelo que compone el material superficial en esta margen es arenoso limoso, producto de los sedimentos activos de la quebrada, se presenta suelto, húmedo y con muy baja compactación, alta erodabilidad y baja cohesión facilitando los procesos de erosión en la parte inferior de la banca que a su vez genera grietas distensivas en el suelo y el colapso o volcamiento de la margen (Figura 14). Los mecanismos de erosión en las orillas pueden estar ligados a la acción de la propia corriente, asociados a la incisión del cauce o a una pérdida de cohesión de las orillas debida a su contenido de humedad (González y García, 2001 p 68).

Figura 14. *Proceso de socavación de la quebrada Guacirú.*



Los procesos de erosión en cauce, profundización o agradación y erosión de orillas, son procesos que obedecen a los fenómenos geomorfológicos, los cuales pueden ser acelerados por la intervención antrópica de la cuenca y el drenaje, por lo que la evaluación de la erosión a largo plazo requiere del análisis de los cambios tanto naturales como inducidos por el hombre. La socavación está controlada por las características hidráulicas del cauce, las propiedades de los sedimentos del fondo y la forma y localización de los elementos que la inducen. Analizando estos factores se puede realizar una evaluación cualitativa de su efecto sobre el fondo del cauce, para lo cual existen programas de computador para analizar la socavación y la sedimentación,

tales como BRI-STAR de la FHWA (Molinas, 1993), HEC-6 del U.S. Army Corps of Engineers (1991), y CAESAR (Palmer y otros, 1999) en Suárez, 2001).

Propuesta de intervención

La restauración de ríos y riberas tiene como objetivo devolver el cauce a su estado original y garantizar su estabilidad, para lo que es necesario conocer sus características iniciales antes de las intervenciones antrópicas, para ello se debe prestar atención a la granulometría de los sedimentos y textura del lecho, la morfología del cauce, sección transversal y sinuosidad. La combinación de una o más técnicas permite obtener resultados que combinan aspectos técnicos de control de la erosión con los ecológicos y paisajísticos.

Existen numerosas técnicas de bioingeniería con aplicación en el ámbito fluvial entre las que se incluyen técnicas vivas de recubrimiento como hidrosiembra, trasplantes de césped, geomembranas, entre otras; técnicas vivas de estabilización como fajinas, empalizadas, biorrollos y técnicas mixtas como los muros de escollera vegetada, los entramados o muros Krainer, los gaviones vegetados y las geomallas sintéticas.

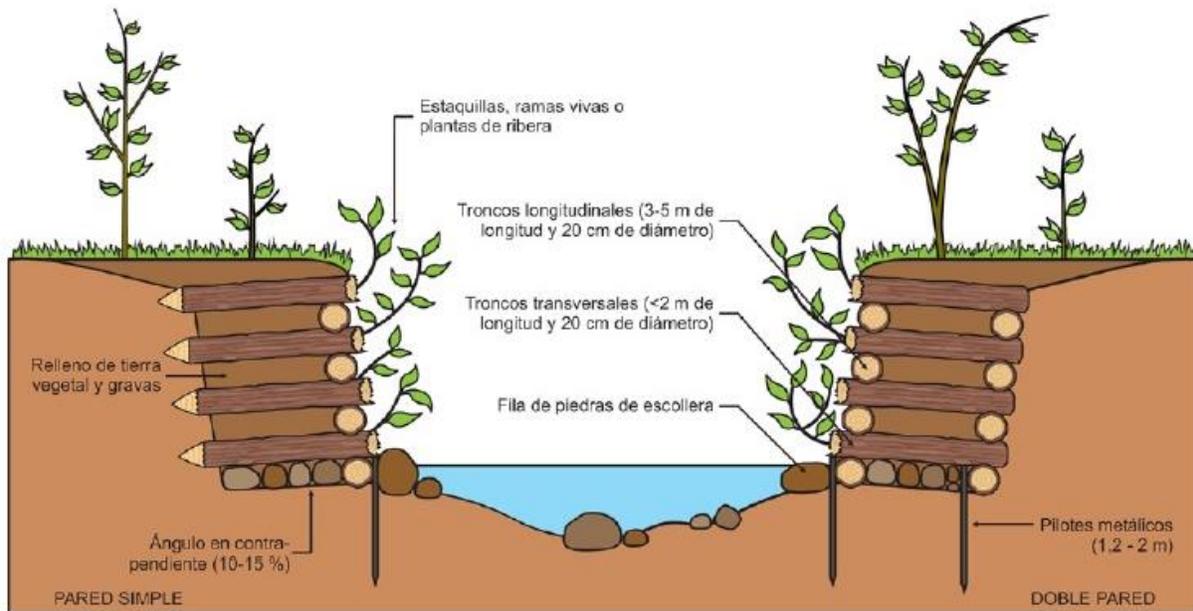
Para la propuesta de intervención se debe tener en cuenta que, al momento de este trabajo, se encuentra un gavión de 2,10 m de altura en un tramo de 30 m (Figura 15) donde anteriormente se presentó la pérdida de la banca, sin embargo, hay que dar claridad en que esta obra por sí sola no soluciona los problemas erosivos en la zona de estudio, por lo que se presenta se a continuación una propuesta de intervención complementaria.

Figura 15. *Intervención con gavión en piedra en la quebrada Guacirú.*



1. Construcción de un muro entramado o Krainer a lo largo del proceso de socavación en el área complementaria al gavión existente. El muro es construido a base de postes de madera ensamblados alternativamente entre sí paralelo al talud o margen del cauce y el trasdós se rellena con tierra vegetal y gravas. En los huecos entre los troncos se introducen estacas o ramas vivas para el rebrote de plantas adaptadas a las condiciones locales (Figura 16). Los troncos paralelos al talud tendrán entre 3 y 5 m de longitud y los troncos perpendiculares no tiene más de 2 m y el diámetro debe ser entre 10 y 30 cm para evitar el lavado del material de lleno, el plano de colocación irá en contrapendiente de 10 a 15% de inclinación para mejorar la función de soporte y en la base del muro debe colocarse una hilera de rocas en forma de escollera para evitar la erosión del fondo (García-Vega et al., 2014).
2. Reconformación del lleno de la vía con limo que mejore condiciones de cohesión del suelo entre el entramado y estacas de rebrote en el talud que mira hacia la quebrada con matarratón y sauce.
3. Construcción de cunetas en concreto en ambas márgenes de la vía con descarga controlada mediante dissipador de energía en la quebrada.

Figura 16. Esquema de entramado de troncos con vegetación o muro Krainer.



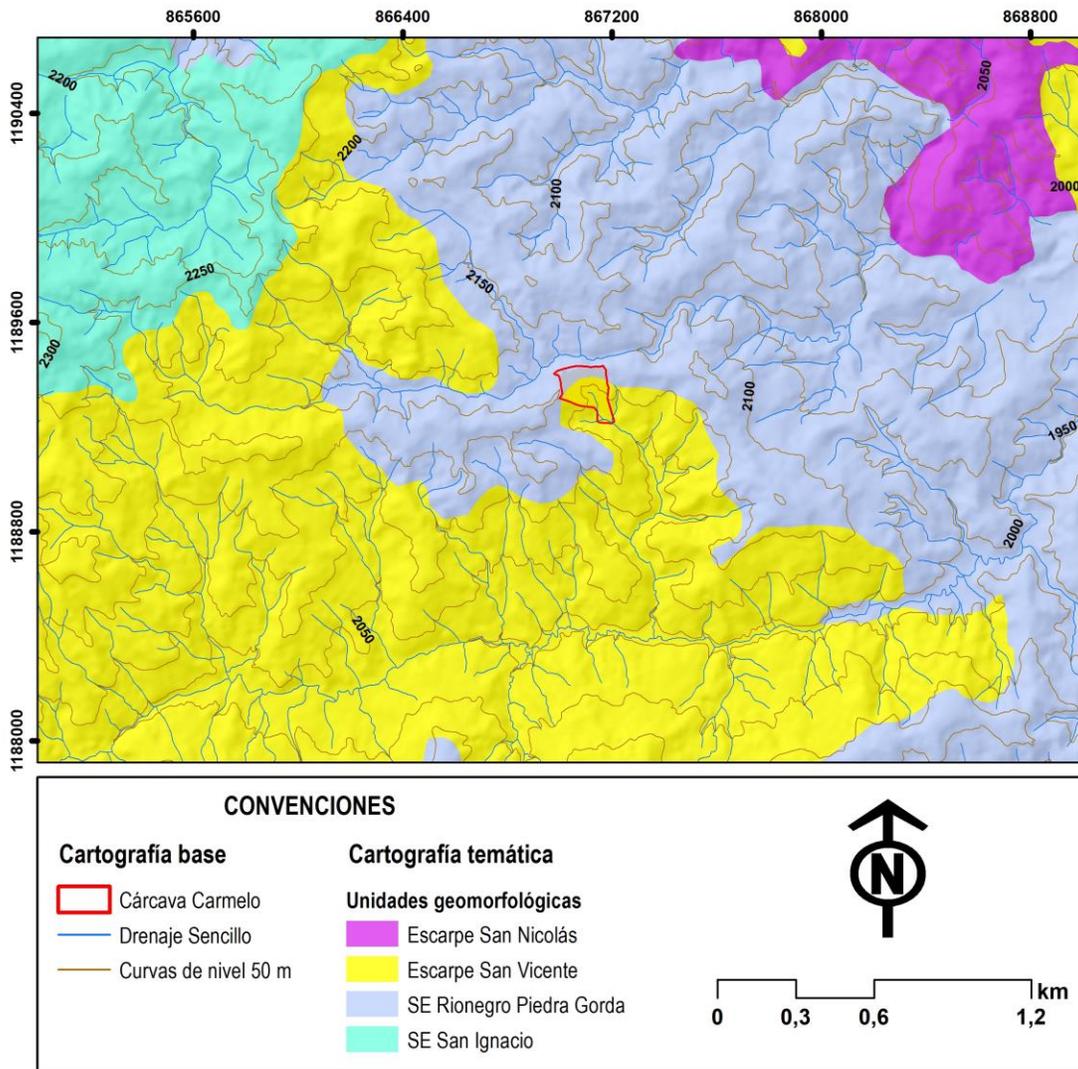
Nota: Tomado de García-Vega et al. (2014).

7.2. Cárcava El Carmelo

Características geomorfológicas y geológicas

Regionalmente la zona de estudio se ubica sobre el escarpe de San Vicente, una superficie inclinada y poco preservada que separa las superficies de erosión de San Ignacio y Rionegro; tiene aproximadamente 150 m de alto y se presenta segmentado conservando franjas alargadas y delgadas de hasta 2.5 km con una dirección preferencial N20°W según la cartografía de Gallego (2013) (Figura 17).

Figura 17. Mapa de geomorfología regional de la Cárcava El Carmelo.



Nota: Elaboración propia a partir de Gallego (2013).

Un eskarpe se entiende como una discontinuidad topográfica vertical o subvertical en el terreno, alargada y más o menos continua, que puede ser producida por erosión o fallamiento, sin embargo, Gallego (2013) describe que el Escarpe de San Vicente no es lineal, sino que es un eskarpe segmentado y poco preservado que es afectado por las entrantes erosivas de las quebradas La Compañía, El Molino y Chaparral. En esta unidad en la zona de estudio, predomina un relieve de colinas subredondeadas alargadas modeladas en saprolito ígneo arenoso a limo-arenoso con un color moteado de rojo, violeta y blanco a crema del Batolito

Antioqueño con espesor variable debido a la baja resistencia a la alteración de las rocas, siendo común encontrar bloques esféricos residuales producto de la meteorización esferoidal. En esta zona el suelo presenta baja cohesión y una textura tipo grus arenosa muy vulnerable a la erosión por agua, donde se reconoce la estructura moteada de la roca parental (Figura 18).

Figura 18. *Saprolito arenoso del Batolito Antioqueño en la base de la Cárcava El Carmelo.*



En este ambiente de alta pendiente y suelo arenoso, predomina la incisión de los drenajes que marcan un alto relieve relativo en muy poca distancia, siendo la diferencia entre las cimas de las colinas y los valles entre 40 y 50 m como se aprecia en el mapa hipsométrico de la Figura 19. Estas características topográficas e hipsométricas de la zona, que configuran un cambio de altura considerable en tan corta distancia configuran una geomorfología local de colinas con flancos de paredes inclinadas con pendientes altas a muy altas superior al 55% (Figura 20) con variaciones laterales cóncavas-convexas a lo largo de su longitud, que son altamente susceptibles a los procesos de erosión como surcos y cárcavas que se originan por el socavamiento repetido del terreno que ocasiona el flujo incontrolado del agua que escurre ladera abajo, sobre todo cuando se tiene coberturas como potreros y cultivos limpios como es el

caso de la Cárcava El Carmelo, justo donde el cambio de pendiente marca la transición geomorfológica entre el escarpe San Vicente y la superficie de erosión de Rionegro (Figura 17).

Figura 19. Mapa de hipsometría del área de afectación en la Cárcava El Carmelo.

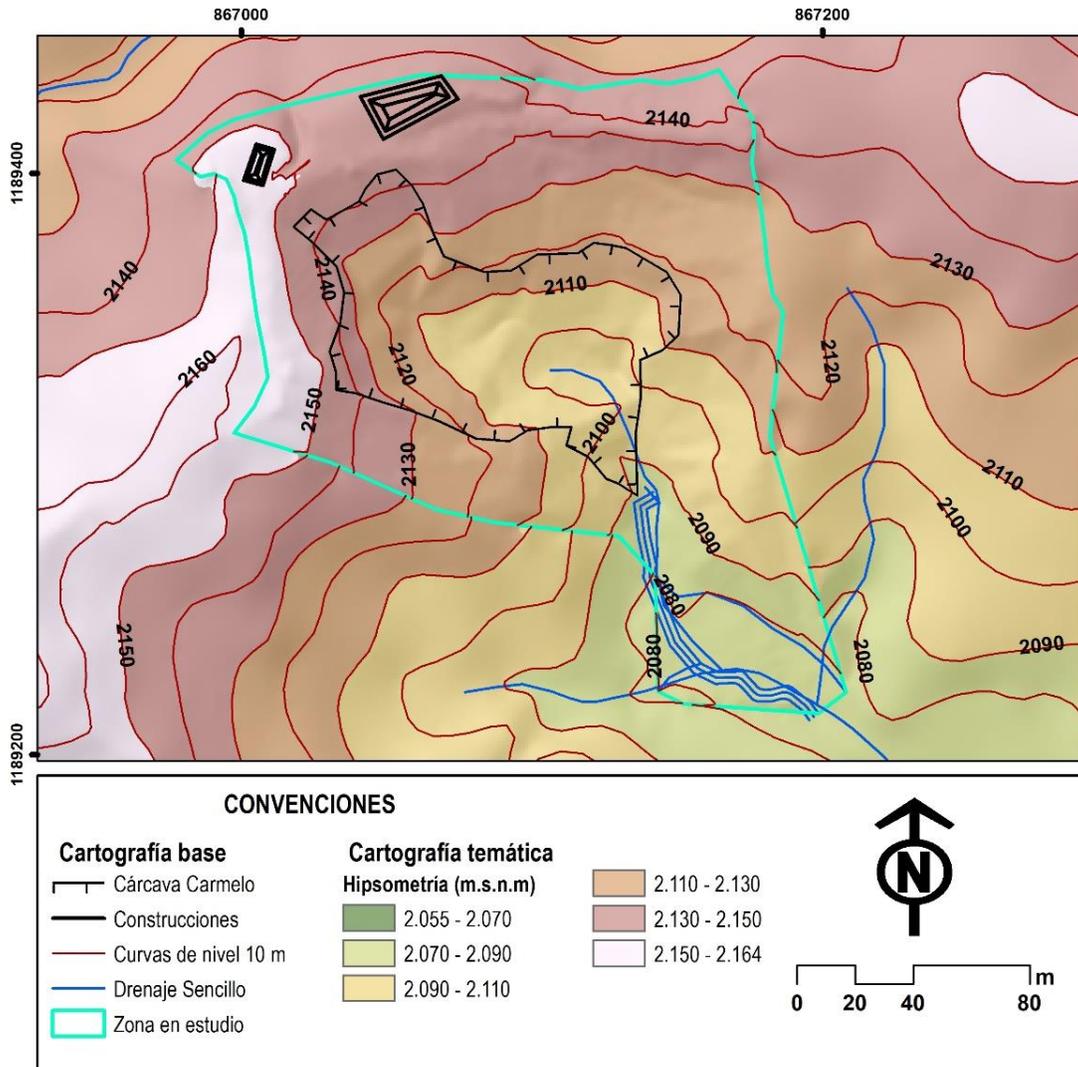
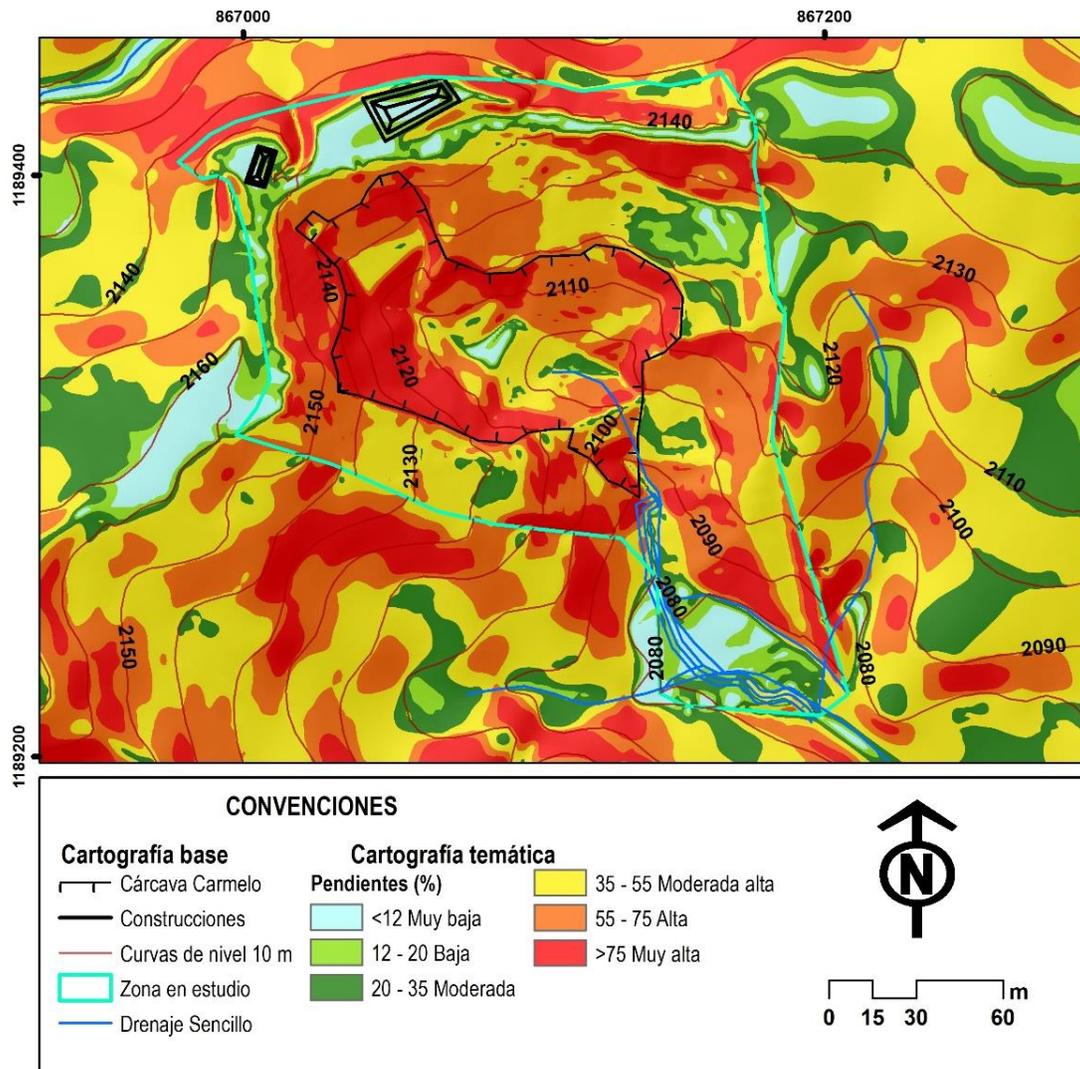


Figura 20. Mapa de pendientes del área de afectación en la Cárcava El Carmelo.



Caracterización del proceso erosivo

Las cárcavas son procesos de erosión concentrada, que afecta zonas de ladera normalmente con pendientes altas y muy altas (>50% de inclinación) cuyas causas usualmente se asocian a la mala conducción del agua de escorrentía y subsuperficial, así como el uso inadecuado del suelo, o cambios drásticos de cobertura vegetal, tala y quema para posterior establecimiento de cultivos limpios transitorios como frijol y maíz, sobrepastoreo que afecta la vegetación arbórea con sistemas radiculares profundos y la desprotección de los sistemas de drenaje y vaguadas de

escorrentía acelerando la ocurrencia de procesos erosivos que se aceleran rápidamente hasta adquirir grandes proporciones como en el caso de la Cárcava El Carmelo, donde las características geológicas y geomorfológicas descritas así como los factores antrópicos asociados al uso del suelo y el control del agua de escorrentía proveniente de la vía (Figura 21) fueron factores fundamentales que ocasionaron un proceso de erosión concentrada que inicia como surcos que lavan fácilmente el suelo arenoso exponiendo los bloques de roca productos de la meteorización esferoidal favoreciendo procesos de caída de rocas y flujos de lodo y escombros ladera abajo.

Figura 21. Factores detonantes del cárcavamiento en El Carmelo.



En general se puede determinar que el proceso de erosión acelerado que configuró el estado actual de la Cárcava El Carmelo se asocia principalmente al manejo inadecuado del agua de

escorrentía proveniente de la vía veredal, la cual llega directamente a la zona de afectación sin ningún control en la descarga ni obras de dissipación de energía o de protección del suelo que sumado al uso inadecuado del suelo en zona de ladera con fuerte pendiente (Figura 21) iniciaron un proceso de erosión laminar superficial sobre una concavidad de primer orden o vaguada de escorrentía, que posteriormente fue profundizándose en surcos, hasta juntarse con las aguas subsuperficiales del nacimiento del drenaje en la parte baja generándose la ampliación de la concavidad mediante el avance remontante, generando escarpes verticales de más de 20 m de altura (Figura 22) donde se presentan deslizamientos planares afectando un área aproximadamente de 1 ha causando la pérdida de cultivos, degradación del suelo por erosión intensa que a su vez genera colmatación por transporte de sedimentos en la fuente hídrica de la parte baja y riesgo por pérdida de banca debido al avance remontante del proceso erosivo.

Figura 22. Escarpes verticales de la cárcava El Carmelo.



El proceso morfodinámico que afecta la zona de estudio se cataloga como un movimiento en masa complejo que involucra deslizamientos planares en la zona de escarpe, carcavamiento remontante, surcos profundos, al igual que procesos erosivos subsuperficiales y flujos de lodos y escombros. Corresponde a un proceso de gran magnitud difícil de controlar y estabilizar, en el cual se identifica distintos factores que deben empezar a ser controlados para buscar la estabilidad y la recuperación gradual del terreno.

- El uso del suelo en la zona a condicionado en parte la inestabilidad del terreno ya que se ha deforestado gran parte del área introduciendo pastos y cultivos limpios los cuales cambian las condiciones de retención del suelo y la capacidad de infiltración del agua, favoreciendo con ello la ocurrencia de procesos erosivos. Se debe reclasificar el uso del suelo como suelo de protección y buscar la restauración de la vegetación propia de la zona de vida, utilizando como complemento obras de bioingeniería. Esta medida busca controlar la erosión lateral y expansión de la cárcava.
- El detonante principal del proceso de carcavamiento es el inadecuado manejo de las aguas de escorrentía provenientes de la vía veredal, las cuales descargan directamente en la parte alta de la cárcava mediante una obra de paso de la vía sin disipadores que acelera el flujo de agua que se vierte sobre el escarpe de la cárcava a pocos metros del punto de descarga, ésta agua superficial se junta con el agua subsuperficial de la fuente hídrica en la parte inferior causando la sobresaturación del suelo y posteriormente flujos de lodos y escombros sobre la fuente. Se debe controlar el agua de escorrentía de la vía y tratar de descargar hacia la otra vertiente de la divisoria de aguas y construir una cuneta o ronda de coronación para evitar que el agua ingrese en la cárcava. Con estas medidas se controla la erosión en la cabeza y el avance remontante de la cárcava.

- Por último, es necesario controlar la erosión en el fondo de la cárcava, en la parte baja donde se encuentra el drenaje, el cual se presenta colmatado debido a la cantidad de sedimentos procedente de la corona o cabeza de la cárcava y de los deslizamientos planares en los escarpes, para esto es necesario estabilizar el cauce con trinchos en vertedero y hacer el control de agua al interior de la cárcava con biofiltros en forma de espina de pescado.

Propuesta de obra de intervención

La Cárcava El Carmelo presenta un proceso de erosión remontante acelerado y a menos que sea controlado, pone en riesgo la vía veredal que comunica las veredas de El Carmelo y Corrientes con el área urbana del municipio. Las soluciones basadas en la naturaleza son cada vez más reconocidas y adoptadas como parte de las estrategias de reducción del riesgo de desastres, siendo principalmente la vegetación multiestrata propia de cada región la más adecuada para la recuperación de zonas degradadas por erosión avanzada, utilizando como complemento obras de bioingeniería. Los trinchos, bien elaborados, con ayuda de la vegetación multiestrata de la región detienen el deterioro progresivo del proceso de degradación avanzada por el carcavamiento. Los trinchos presentan una vida útil corta debido a la descomposición rápida de los materiales, por lo que deben complementarse con coberturas vegetales y estacas vivas para alargar su vida útil (Rivera, 2002). La vegetación ofrece al suelo una protección física frente al impacto de la lluvia y la escorrentía y reduce la velocidad del agua al aumentar la resistencia hidráulica del terreno; por tanto, disminuye la capacidad erosiva del agua. Si la velocidad se ha reducido lo suficiente, entonces se sedimentan parte de los materiales arrastrados. A partir de este momento, se empieza a regenerar la vegetación natural (Rivera, 1998).

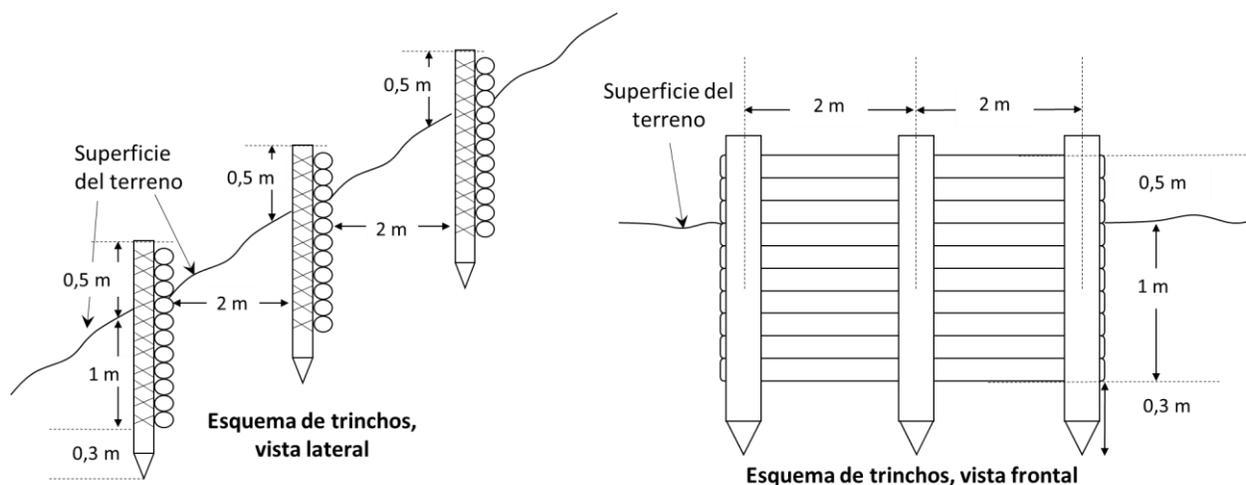
La Guadua al ser un material natural y resistente es la alternativa más utilizada para las obras de bioingeniería alrededor del mundo, siendo la *Angustifolia* la más popular en Colombia. La Guadua es la especie forestal nativa más importante del occidente colombiano por sus propiedades como reguladora de agua y protectora de suelos, además de sus cualidades físico-mecánicas que le hacen apropiada para los múltiples usos en la fabricación de artesanías.

El uso de la Guadua para el control de la erosión de los suelos resulta ser un método eficiente, económico y rápido, presenta propiedades de resistencia muy altas y es amigable con el entorno en el que se trabaja. Otras especies que se emplean como complemento para la restauración de áreas degradadas son quiebrabarrigo o nacedero (*Trichanthera gigantea*), matarratón (*Gliricidia sepium*), Chagualo (*Clusia Multiflora*) y caña brava (*Gynerium sagittatum*) entre otros, cuyas raíces en el suelo, producen una matriz reforzada, en la que el esfuerzo se transfiere a las raíces durante la carga del suelo, de forma similar a las estructuras de concreto reforzadas con acero y fibra de vidrio (Pollen, 2007; Thorne, 1990 en Sánchez (2017). Teniendo esto en consideración, se presenta a continuación una propuesta de intervención para la Cárcava de El Carmelo:

1. Control del agua de escorrentía desde la vía mediante el desvío de la obra transversal hacia la otra vertiente, complementando la descarga con un trincho en vertedero y disipadores de energía en piedra. Además, se requiere la construcción de cuneta o ronda de coronación en la cárcava, recubierta con cespiones de pasto grama (*Paspalum conjugatum*, *Paspalum notatum*), pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) o protegida en su parte superior con una barrera viva de limoncillo (*Cymbopogon citratus*), vetiver (*Vetiveria zizanioides*) o pasto imperial (*Axonopus scoparius*).

2. Perfilar escarpes de la cárcava para reducir la inclinación de la pendiente y restituir cobertura vegetal de los taludes para evitar que se erosionen, lo cual se puede hacer mediante la instalación de cespedones, siembra de maní forrajero (*Arachis pintoi*) o cubriendo los taludes con hidrosiembra o agromanto.
3. Construir trinchos escalonado o de terraza en guadua para proteger el suelo de la erosión en el fondo y las paredes de la cárcava dejando una distancia entre ellos de 2m siguiendo el diseño que se presenta en la Figura 23. Los trinchos deben construirse mediante la excavación de una zanja aproximadamente de 1m de profundidad, donde van a ir las guaduas colocada una sobre otra. Las guaduas tendrán una longitud de cuatro metros y se deben cortar dejando los nudos que funcionan a modo de tapa en los extremos y serán soportadas por largueros verticales al inicio, a la mitad y al final del trincho y pueden ir amarradas con alambre dulce (Figura 23).

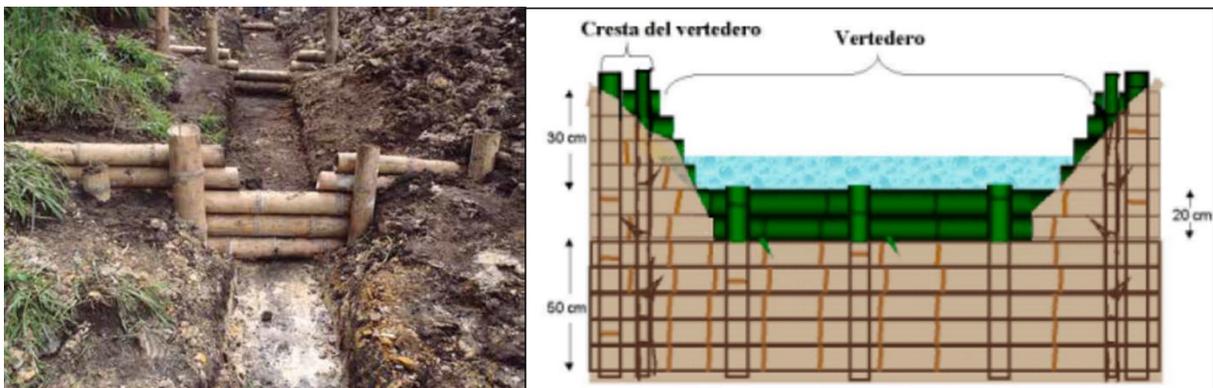
Figura 23. Diseño de trinchos vivos escalonados para control de erosión en cárcava El Carmelo.



4. Control del agua de escorrentía y subsuperficial al interior de la cárcava mediante la construcción de trinchos en vertedero (Figura 24) que lleve el agua de forma controlada hasta la base de la cárcava, donde se encuentra con el drenaje natural. Los componentes

principales de un trincho son el vertedero y las crestas. El vertedero debe tener una altura máxima por encima del cauce de la cárcava de 10 a 20 cm y la anchura de 80 % de la amplitud total del cauce, de tal forma que permita el paso libre del agua (Rivera, 2002). Las crestas al lado y lado del vertedero deben tener altura entre 30 y 50 cm del nivel del suelo y el trincho debe enterrarse entre 30 y 50 cm por debajo del nivel de la cárcava. Toda la estructura debe reforzarse con estacas de rebrote fácil. Adicionalmente es necesario instalar disipador de energía con rocas en la base del vertedero para impedir la socavación por golpeteo y el impacto sobre el lecho de la estructura que conlleve a la socavación y volcamiento con el paso del tiempo (Figura 24).

Figura 24. Esquema de trincho en vertedero (Rivera 2002) y foto de referencia (Rivera et al, 2015.)



Nota: Tomado de Rivera (2002) y Rivera et al (2015).

5. Adicionalmente se deben construir biofiltros (Figura 25) en forma de espina de pescado a lo largo de las concavidades al interior de la cárcava para garantizar la evacuación del agua subsuperficial y evitar saturación en el suelo que detona los movimientos en masa. Para la construcción de los biofiltros se hace una zanja en el terreno aproximadamente de 60 a 80 cm de ancho y 50 a 100 cm de profundidad, dependiendo del nivel freático, donde se dispondrán guaduas jóvenes (menores a 2 años) acostadas en sentido de la pendiente poniéndolas en camas entre 4 y 5 guaduas, posteriormente se cubre con hojas secas y se

pone una segunda capa de guaduas y nuevamente se cubre con hojas secas para finalmente cubririrlas con la misma tierra del sitio (Figura 25).

Figura 25. Esquema de biofiltro y fotos de referencia



Nota: Fotos de referencia tomadas de Rivera et al (2015).

6. Como complemento biológico a la construcción de los trinchos y biofiltros, se usan especies vegetales, tales como Guadua – *Guadua angustifolia*, Nacedero – *Trichanthera gigantea*, Matarratón – *Gliricidia sepium*, Acacia Forrajera – *Leucaena leucocephala*, Sauco – *Sambucus nigra*, Sauce – *Salix humboldtiana*, entre otras especies, que son sembradas por cada metro de filtro, con el fin de que este material vivo rebrote y aumente el amarre, anclaje y cohesión del terreno, garantizando la permanencia a futuro de los drenajes construidos. Lo ideal es que las especies de rebrote se escojan considerando la zona de vida siguiendo el sistema de clasificación de Holdridge (Espinal, 1992), que para la zona de estudio sería Bosque muy Húmedo Montano Bajo (bmh-MB), que normalmente ocurre en una faja altimétrica de 1800 a 2800 msnm, tiene una temperatura media anual que oscila entre los 12 y 18°C y un promedio de lluvia anual entre 2000 y 4000 mm.

7. Por último, para garantizar que la intervención sea efectiva y la vegetación perdure y se pueda recuperar la zona degradada se recomienda hacer un cambio en el uso del suelo, destinándolo a protección y recuperación ambiental en el ordenamiento territorial.

Al momento de realizar la intervención es importante considerar algunos parámetros morfométricos del terreno como son la curvatura (Figura 26) y el aspecto o dirección de la pendiente (Figura 27), pues estos nos permitirán ubicar de forma adecuada las estructuras de bioingeniería a instalar.

Figura 26. Mapa de curvatura del área de afectación en la Cárcava El Carmelo.

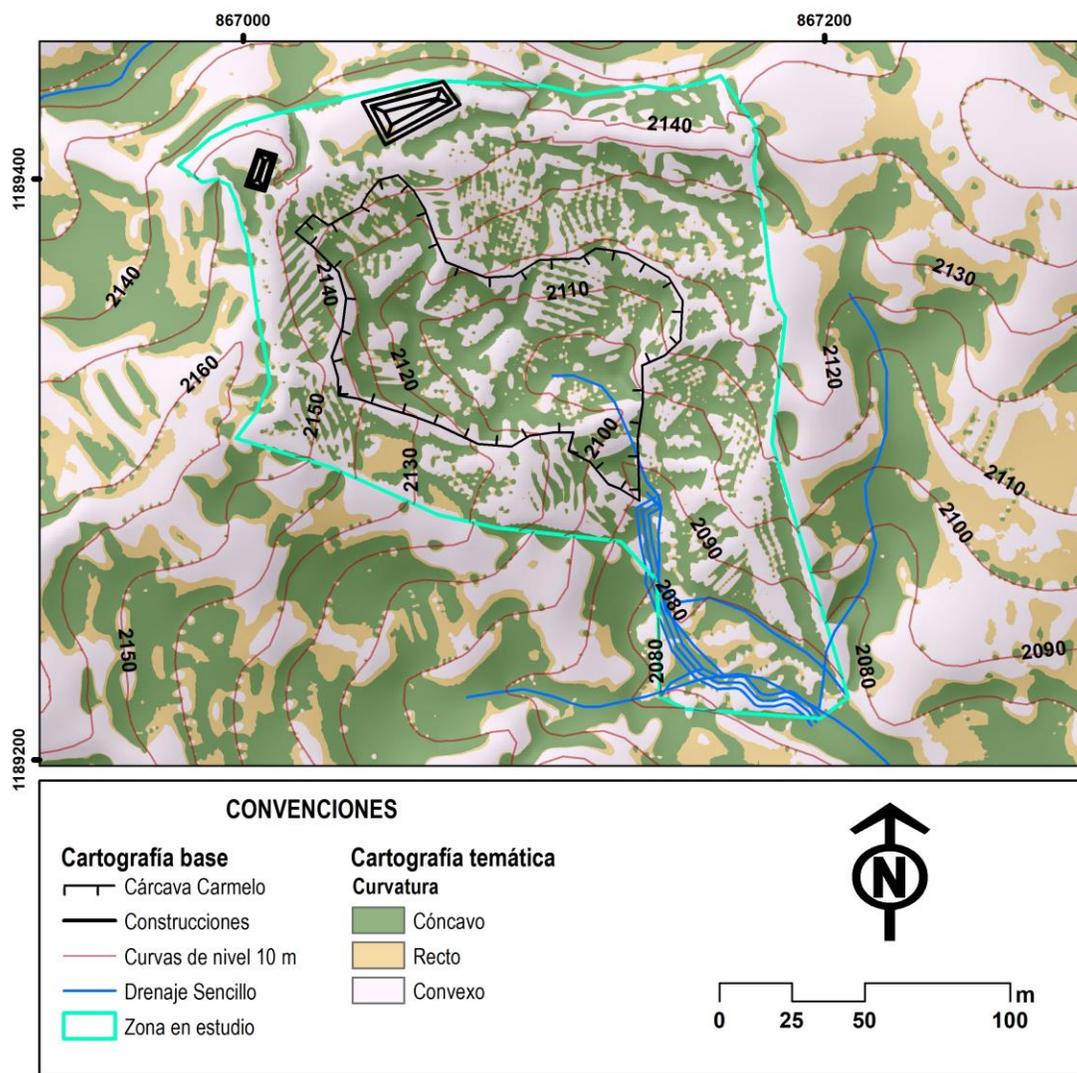
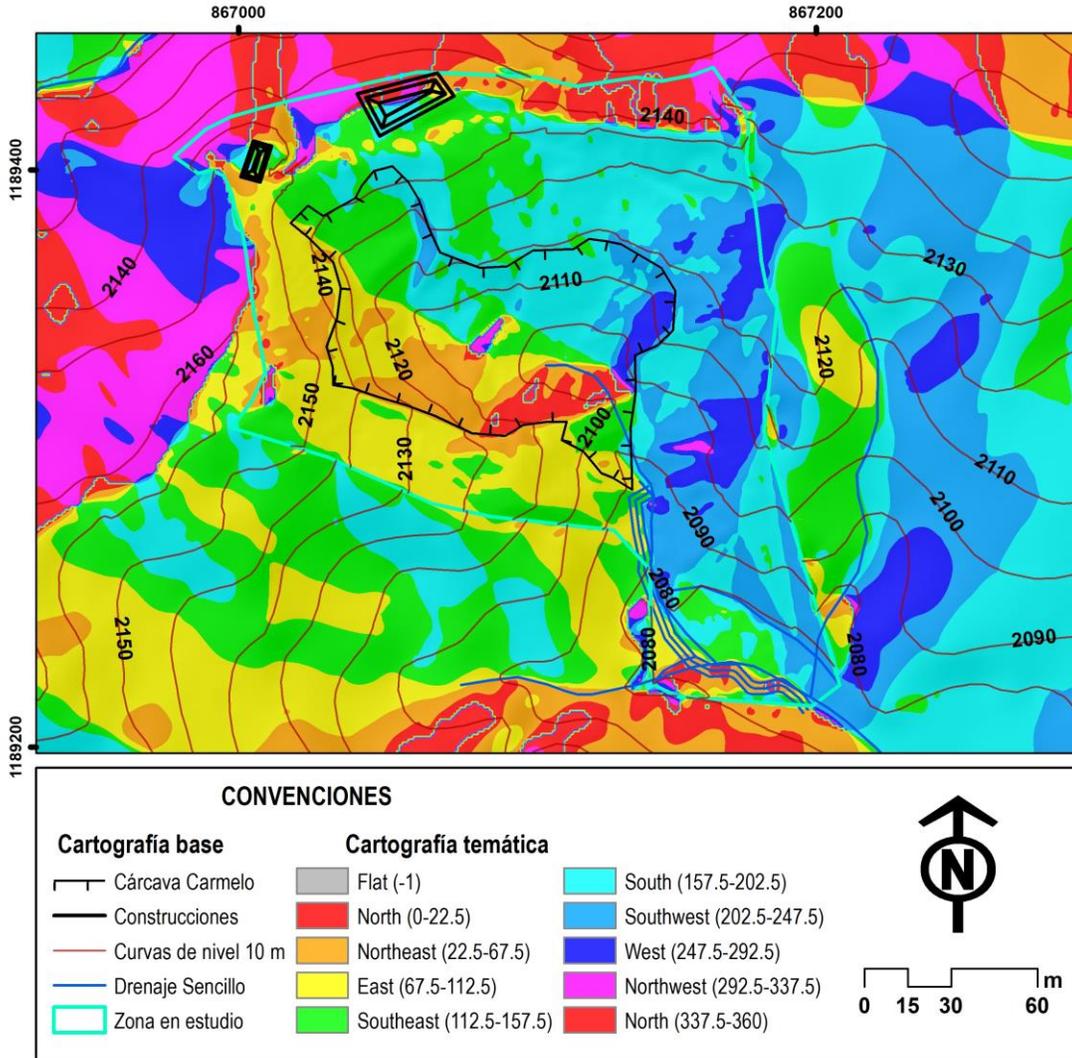


Figura 27. Mapa de aspecto en el área de afectación de la Cárcava EL Carmelo.



En el caso de la curvatura (Figura 26) es un parámetro que nos indica las áreas de mayor concavidad del terreno, las cuales son frecuentemente el camino del agua de escorrentía y por ende es el sitio donde se instalaran las obras para el control de agua como biofiltros y trinchos en vertedero. Por su parte, el mapa de aspecto (Figura 27) nos indica la dirección que tiene la pendiente, es decir, la dirección que seguirá una gota de agua que cae en el terreno, por lo que cobra relevancia en el diseño de la obra, para poder orientar el ángulo en el cual se construyen

los trinchos escalonados o en terraza simulando las curvas de nivel, para facilitar la retención del suelo y servir de soporte para la siembra del material vegetal.

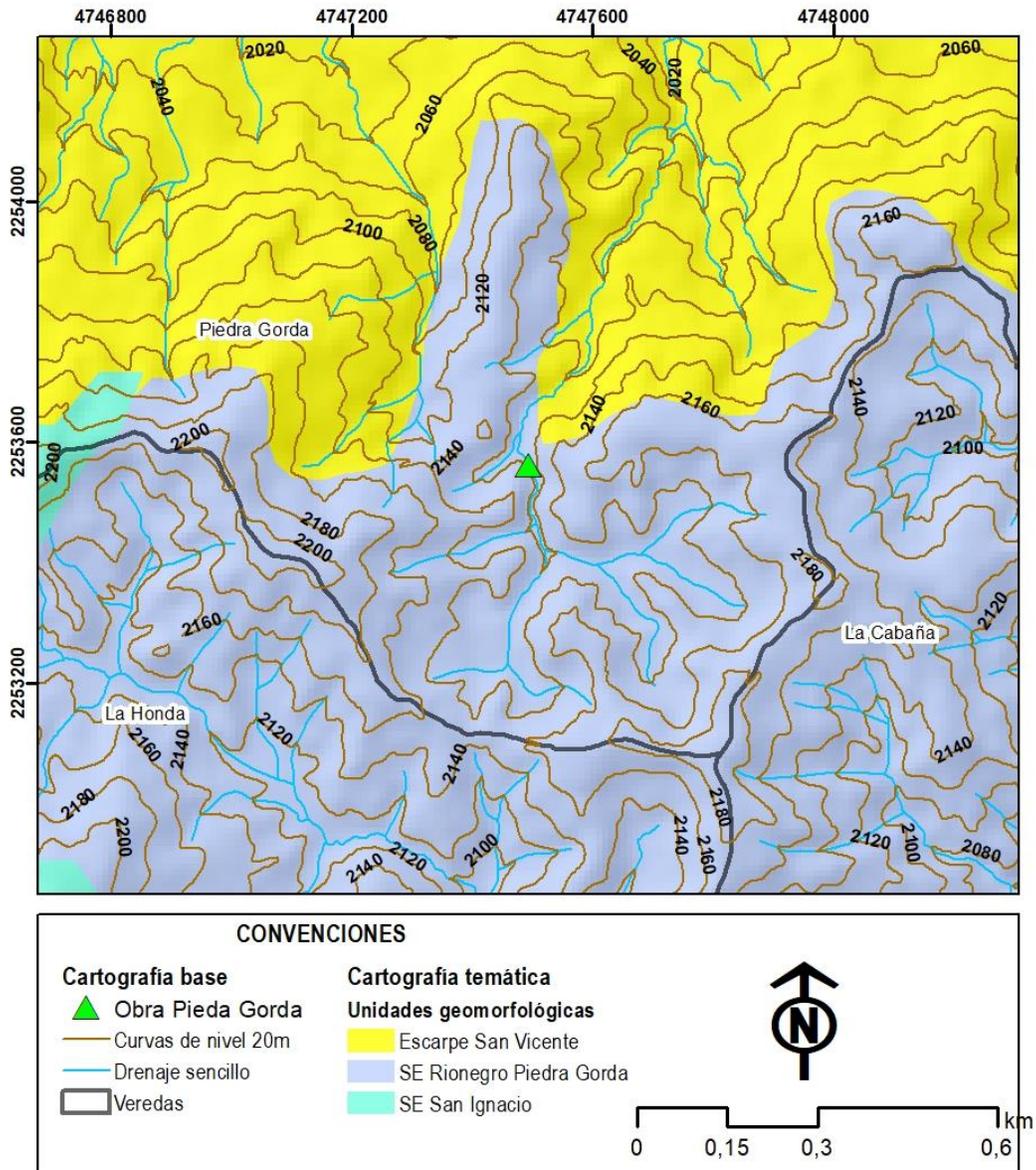
7.3. Obra de Paso en Piedra Gorda

Características geomorfológicas y geológicas

Este punto de estudio se ubica geomorfológicamente sobre la superficie de erosión de Rionegro, en el remanente Piedra Gorda sobre un drenaje que incisa la superficie de erosión (Figura 28).

La superficie de erosión de Rionegro se localiza entre los 2000 y 2200 msnm y se extiende por el oriente antioqueño, abarcando las cabeceras municipales de Rionegro, El Retiro, La Ceja, El Carmen de Viboral, Santuario, Marinilla, Guarne y San Vicente. Gallego (2013) divide esta superficie de erosión en dos remanentes: Rionegro de mayor extensión que cubre los valles de San Nicolás y Llanogrande y el remanente Piedra Gorda hacia el noroeste del embalse de Guatapé en límites entre los municipios de San Vicente y El Peñol donde se identifican sistemas de colinas col altitud y morfología similar a la superficie de Rionegro. Estos sistemas de colinas se encuentran modelados en espesos perfiles de meteorización del Batolito Antioqueño y generalmente se encuentran alargados y con cima estrecha, en muchos casos su elongación coincide con la dirección de los cauces principales que las disectan (Figura 28).

Figura 28. Mapa de geomorfología regional del punto de estudio en Piedra Gorda.



Nota: Elaboración propia a partir de Gallego (2013).

El punto de estudio se encuentra en el límite geomorfológico con el escarpe de San Vicente, donde predominan los procesos erosivos que evidencian el avance remontante de la erosión en la configuración del paisaje actual, por lo que es común encontrar en la base de las colinas y en los valles intercolinarios depósitos de vertiente, coluviales y mixtos con espesores variables, principalmente asociados a flujos de lodos y escombros compuestos por suelo residual

y bloques de saprolito ígneo del Batolito antioqueño, cenizas volcánicas re TRABAJADAS, arcillas y suelo orgánico (Figura 29), este material se presenta suelto, poco compacto arcilloso y es fácilmente disgregable con la mano con un porcentaje de compactación muy bajo siendo altamente erodable; también se presentan bloques esféricos de rocas del batolito antioqueño producto de la meteorización esferoidal que con el avance de la erosión quedan expuestos en las laderas de las colinas y ruedan hacia las llanuras aluviales (Figura 29).

Figura 29. Depósitos de vertiente en el área del proceso erosivo de Piedra Gorda.



El drenaje donde se presenta el proceso erosivo de estudio es un tributario de la quebrada Piedra Gorda, cuyo valle es angosto y se encuentra en proceso de ampliación de cuenca, por lo que predominan los procesos de erosión y remoción en masa de forma remontante, evidenciando el avance del frente erosivo. El uso del suelo en el sector es de vocación agrícola y la cobertura vegetal en este punto de la cuenca se compone mayormente de rastrojo bajo y potreros (Figura 30).

Figura 30. Características del drenaje y del valle en Piedra Gorda.



Los sedimentos de la fuente hídrica se componen principalmente de arenas medias a gruesas con algún contenido de grava, son cuarzosas con alto contenido de materia orgánica, principalmente en las márgenes del drenaje y en menor proporción presentan micas y óxidos. En general tiene una tonalidad grisácea a negra dependiendo del contenido de suelo orgánico, presentan un alto contenido de humedad y un nivel de plasticidad muy bajo, poco consolidadas y fácilmente disgregable con las manos; con presencia hacia la superficie del terreno de raicillas y bioturbación (Figura 31).

Figura 31. Depósitos aluviales en las márgenes y fondo de la quebrada en Piedra Gorda.



Caracterización del proceso erosivo

En este punto de estudio se presenta la pérdida parcial de banca de la vía intermunicipal que conecta San Vicente con El Peñol y brinda los servicios a las veredas Piedra Gorda, La Cabaña y El Guamal. La afectación se presenta por la socavación de la fuente en el fondo del canal a la salida de la obra de paso, debido a un cambio de altura del drenaje antes y después de la vía, ocasionando el asentamiento y posterior desconexión de la obra transversal y evolucionando de forma remontante hasta convertirse en una cárcava (Figura 32).

Figura 32. *Carcavamiento en la vereda Piedra Gorda.*



La cárcava tiene una corona semicircular con longitud cercana a los 30 m que bordea la vía con un escarpe vertical de 3,10 m de altura desde la vía hasta la base de la salida del drenaje o descarga en la llanura de la quebrada que a su vez tiene una incisión de 1,2 m y una amplitud del canal de 2 m. El proceso erosivo es acelerado por el vertimiento directo del agua lluvia y de escorrentía proveniente de la vía, debido a la ausencia de cunetas y obras de descarga controlada, con lo cual

se generan surcos en superficie y erosión en la cabeza de la cárcava acelerados por las pobres características geotécnicas del material superficial el cual se compone de depósitos de vertiente (Figura 33). La cobertura vegetal en la zona se compone principalmente por rastrojo en diferentes estados de sucesión, por lo que a la fecha se puede ver el avance en el crecimiento de la vegetación de forma natural (Figura 34), sin embargo, se evidencia que el proceso erosivo aún continúa activo con el aporte de escorrentía de la vía, por lo que es necesario hacer una intervención correctiva para frenar el avance remontante del proceso que pueda afectar la vía.

Figura 33. Descarga agua lluvia y escorrentía de la vía al proceso erosivo.



Figura 34. Imágenes comparativas de la cárcava en 2021 y 2024.



Propuesta de obra de intervención

Al igual que en los casos anteriores, para recuperar la estabilidad del terreno en este punto es posible emplear técnicas de bioingeniería y soluciones basadas en la naturaleza aprovechando el rápido crecimiento de la vegetación de forma natural de la región se propone la siguiente intervención que se muestra esquemáticamente en la Figura 35.

1. Reconstrucción de la obra de paso colapsada con implementación de trincho en vertedero a la salida del drenaje con disipador en pierda en base para evitar la socavación por el efecto de la caída del drenaje (Figura 36).
2. Reconformación del lleno de la vía mediante trinchos escalonados en forma de terraza para reducir el escarpe vertical de la cárcava (Figura 37).
3. Construcción de cunetas en la vía veredal con descarga controlada con disipadores de energía hasta la fuente hídrica.
4. Recuperación de cobertura vegetal con especies nativas pioneras como sietecueros (*Tibouchinalapidota*), Carate (*Vismia Sp*), Drago (*Croton Sp*), Quebrabarrigo (*Trichanthera gigantea*) y Arrayán (*Myrcia Popayanensis*) entre otros.

Figura 35. Propuesta esquemática de intervención en Piedra Gorda.

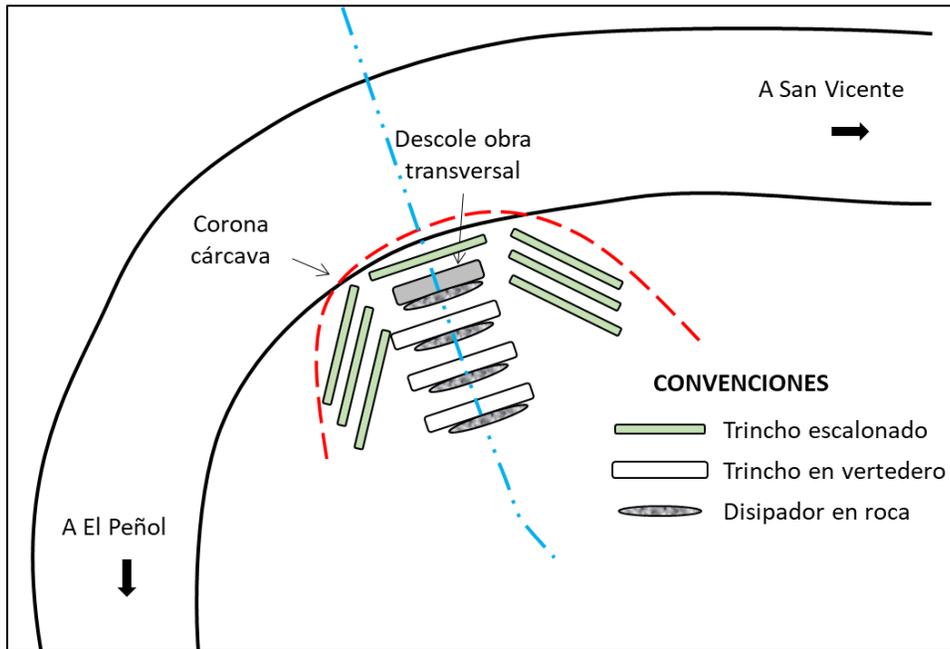
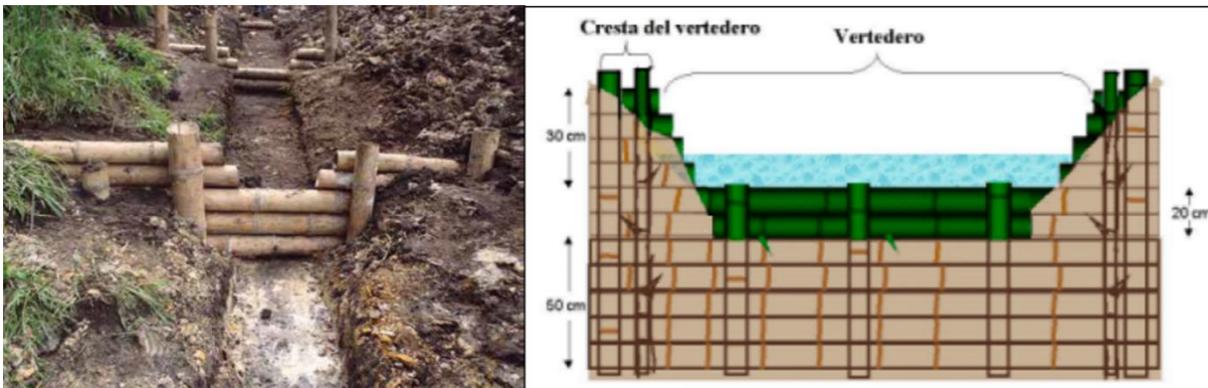
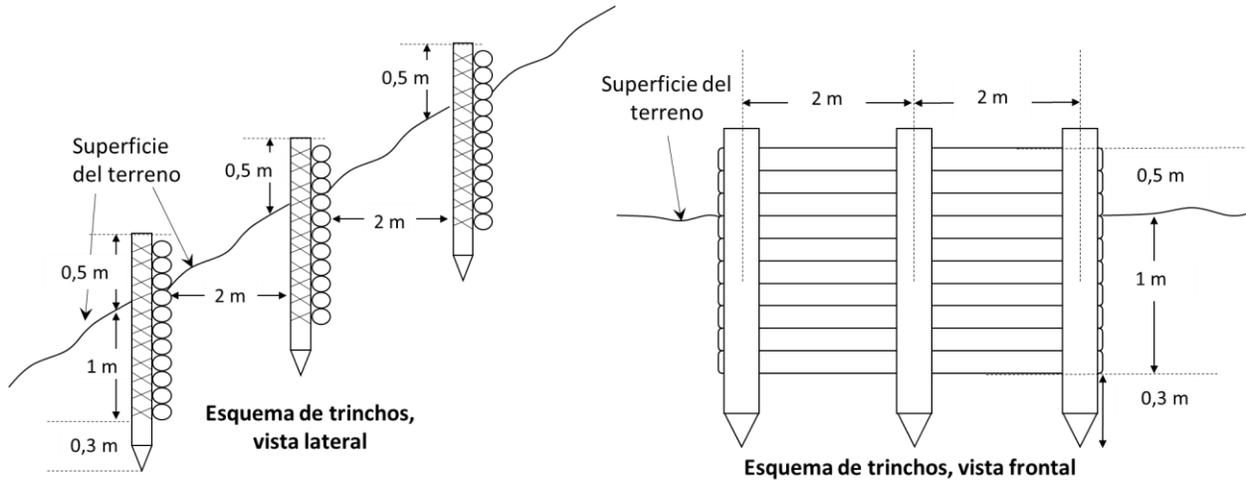


Figura 36. Esquema de trincho en vertedero (Rivera 2002) y foto de referencia (Rivera et al, 2015.)



Nota: Tomado de Rivera (2002) y Rivera et al (2015).

Figura 37. Diseño de trinchos vivos escalonados para control de erosión en Piedra Gorda.



8. Discusión y análisis de la implementación de obras de Bioingeniería – Transferencia de conocimiento

A partir del análisis presentado en los antecedentes respecto a las soluciones basadas en la naturaleza que se han empleado en Europa desde la antigüedad de forma natural por el hombre para la protección de la erosión (Evette et al, 2009) y que en el último siglo se han desarrollado e implementado con mayor dinamismo en las principales ciudades alrededor del mundo para la reducción del riesgo de desastres y para la adaptación y mitigación al cambio climático. Asimismo, considerando que se ha podido probar de qué manera ecosistemas como bosques en montañas contribuyen a la reducción de los riesgos de desastres mediante modelos de probabilidad de recurrencia, propagación e intensidad (Christine et al, 2018) y que las investigaciones adelantadas en Colombia desde la década de los 90 han dado a conocer las técnicas de bioingeniería para el control de erosión en zonas de ladera (Rivera, 1998; Suárez, 1998; Suarez, 2001; Rivera 2002, Rivera y Sinisterra, 2006) y han podido probar su efectividad a partir de la medición directa de las propiedades mecánicas del suelo en distintos periodos de la implementación (Sánchez, 2017) y de la resistencia mecánica de los trinchos en guadua (Morales y Sarmiento 2020; Sarmiento, 2021) es completamente viable proponer la intervención con técnicas de bioingeniería como trinchos en guadua bien elaborados, biofiltros para el control del agua y disposición de la vegetación multiestrata de la región para detener el deterioro progresivo del terreno por procesos de erosión avanzada como el cárcavamiento. La vegetación ofrece al suelo una protección física frente al impacto de la lluvia y la escorrentía, y reduce la velocidad del agua al aumentar la resistencia hidráulica del terreno; por tanto, disminuye la capacidad erosiva del agua. Si la velocidad se ha reducido lo suficiente, entonces se sedimentan parte de los materiales arrastrados. A partir de este momento, se empieza a regenerar la vegetación natural.

Por otro lado, La ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la política nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia, decreta en el artículo 1 que: *“la gestión del riesgo de desastres es un proceso social...”* y desde ahí parte la importancia de involucrar a las comunidades directamente en los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y preparación para el manejo de las emergencias. Es por esto que, en el desarrollo de este trabajo, se lleva la propuesta de intervención para la recuperación de áreas degradadas por erosión al Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD) del municipio de San Vicente Ferrer (Figura 38) y a la Junta de Acción Comunal de la zona afectada (Figura 39) para que en conjunto se pueda llegar a una solución sencilla, pero técnicamente correcta que pueda ser implementada y replicada fácilmente por la comunidad. En esta medida, la intervención con bioingeniería se ajusta al concepto de desarrollo sostenible, pues facilita el uso de mano de obra local con materiales propios del área de intervención y se basa en conceptos sencillos que pueden ser replegados por las comunidades locales.

Figura 38. Taller de transferencia de conocimiento con CMGRD de San Vicente Ferrer.



Figura 39. Taller de transferencia de conocimiento con la comunidad de El Carmelo.



En el proceso de llevar las propuestas de intervención para la recuperación de las áreas afectadas por erosión a la administración municipal y a la Junta de Acción Comunal de la vereda El Carmelo en el municipio de San Vicente Ferrer, se realizó un taller en el que explicó las causas del proceso erosivo, las características geológicas y geomorfológicas de la zona afectada y de qué manera se puede realizar la recuperación del terreno mediante técnicas de bioingeniería, explicando el paso a paso de la construcción de cada una de las obras propuestas respetando la experiencia de la comunidad en cuanto a su relacionamiento con el territorio y la forma en que tradicionalmente se ha intervenido estos procesos erosivos, muchas veces detonados por acciones antrópicas, que requieren la intervención de la comunidad y de la institucionalidad para encontrar una solución.

Cabe resaltar que tanto la administración municipal como la comunidad de la vereda El Carmelo se muestran prestos para realizar la intervención propuesta para la recuperación del suelo en la Cárcava del Carmelo, por lo que se proyecta realizar el diseño detallado de la obra para su posterior ejecución por parte de la administración municipal.

9. Conclusiones

Las soluciones basadas en la naturaleza y la bioingeniería son cada vez más implementadas para la reducción del riesgo de desastres y la adaptación y mitigación del cambio climático a nivel mundial y su efectividad ha sido probada con mediciones directas de las propiedades mecánicas del suelo mejoradas por la presencia de vegetación y en las estructuras de bioingeniería, observando su cambio en diferentes momentos de la implementación de las obras, las cuales son principalmente construidas con guadua que dan cuenta de la efectividad de estos métodos para el control de la erosión y la recuperación del suelo en áreas degradadas en ambientes similares a los analizados en este estudio y que han sido documentadas en distintas investigaciones en Colombia y otras partes del mundo.

Uno de los procesos erosivos más frecuentes que se presenta en el municipio de San Vicente Ferrer es el de erosión concentrada o cárcavamiento, que afecta zonas de ladera normalmente con pendientes altas y muy altas (>50% de inclinación) cuyas causas usualmente se asocian a la mala conducción del agua de escorrentía y subsuperficial, así como el uso inadecuado del suelo, o cambios drásticos de cobertura vegetal, tala y quema para posterior establecimientos de cultivos limpios transitorios como frijol y maíz, sobrepastoreo que afecta la vegetación arbórea con sistemas radiculares profundos y la desprotección de los sistemas de drenaje y vaguadas de escorrentía acelerando la ocurrencia de procesos erosivos que se aceleran rápidamente hasta adquirir grandes proporciones como en el caso de la Cárcava El Carmelo, los cuales pueden ser intervenidos mediante técnicas de bioingeniería y restauración de la vegetación para frenar el avance de la erosión y reducir el riesgo de desastres asociado a este.

Otro proceso frecuente en San Vicente Ferrer se socia a la socavación de fuentes hídricas en la salida de las obras transversales que terminan afectando las vías rurales, debido principalmente a la ausencia de obras hidráulicas en las vías para el control del agua de escorrentía, generando procesos erosivos superficiales que unidos a la socavación de las fuentes a la salida de las obras adquieren dimensiones importantes que terminan con la pérdida parcial de la banca. Esta problemática es posible mitigarla mediante la implementación de obras de bioingeniería que garanticen el control del agua de la fuente y de escorrentía de la vía, para lo cual es necesario hacer la caracterización de cada uno de los puntos.

En el caso de las vías afectadas por la socavación lateral de los cauces, profundización o agradación y erosión de orillas; estos procesos obedecen a los fenómenos geomorfológicos, los cuales pueden ser acelerados por la intervención antrópica, por lo que en el análisis de socavación se debe considerar tanto las características hidráulicas del cauce como los cambios naturales e inducidos por el hombre, y pueden ser controlados mediante la restauración ecológica de las riberas que tiene como objetivo devolver el cauce a su estado original y garantizar su estabilidad, para lo cual existen numerosas técnicas de bioingeniería con aplicación en el ámbito fluvial entre las que se incluyen técnicas vivas de recubrimiento como hidrosiembra, trasplantes de césped, geomembranas, entre otras; técnicas vivas de estabilización como fajinas, empalizadas, biorrollos y técnicas mixtas como los muros de escollera vegetada, los entramados o muros Krainer, los gaviones vegetados y las geomallas sintéticas.

Para el caso puntual de la Cárcava El Carmelo se propone una intervención consistente en el control del agua de escorrentía desde la vía mediante el desvío de la obra transversal hacia la otra vertiente, complementando la descarga con un trincho en vertedero y disipadores de energía en piedra; cuneta de coronación de la cárcava cubierta con vegetación de protección; perfilar los

taludes de escarpe de la cárcava y restituir a cobertura vegetal mediante su cobertura con hidrosiembra o agromanto; construir trinchos escalonado o de terraza en guadua para proteger el suelo de la erosión en el fondo y las paredes de la cárcava; hacer control del agua escorrentía y subsuperficial al interior de la cárcava mediante la construcción de trinchos en vertedero y biofiltros distribuidos estratégicamente en las concavidades al interior de la cárcava y complementar con la restauración de la vegetación con especies nativas como Nacedero, Matarratón, Acacia Forrajera, Sauco, Sauce, entre otras.

En el corazón de los desafíos para adoptar soluciones a los procesos de erosión concentrada en ladera que generan riesgos de desastres, las soluciones basadas en ecosistemas para la reducción del riesgo y la bioingeniería resultan ser adecuadas y económicas para las regiones andinas y municipios rurales como San Vicente Ferrer, donde a menudo se encuentra la capacidad limitada a nivel institucional y gubernamental para integrar soluciones basada en la naturaleza en los instrumentos de gestión, planes, programas y proyectos, lo que representa ciertos desafíos vinculados a la gobernanza y los procesos de política, la disponibilidad la información y recursos financieros.

Es importante involucrar a las comunidades en los procesos de conocimiento del riesgo y realizar ejercicios de capacitación y transferencia de conocimientos para que las comunidades que habitan las áreas afectadas puedan directamente implementar soluciones sencillas con recursos locales y que estén al alcance de ellas, con mano de obra local y con materiales propios del área de intervención.

Dado que este estudio se realizó como iniciativa propia y no se tenía una comunicación directa con la administración municipal de San Vicente Ferrer, al momento de la publicación del estudio no se había podido materializar ninguna obra de las propuestas en el estudio, aunque se socializó

la propuesta tanto a la administración municipal como a la comunidad afectada, mostrando gran interés en la alternativa planteada para solucionar las problemáticas asociadas a los procesos erosivos principalmente en la vereda El Carmelo.

10. Recomendaciones

Para la construcción de obras de bioingeniería, si bien se puede implementar madera local, se recomienda el uso de Guadua, que al ser un material natural y resistente ha sido elegida como alternativa de bioingeniería en la construcción alrededor del mundo, siendo la Angustifolia la más popular en Colombia, la cual tiene propiedades reguladoras de agua y protectora de suelos, además de sus cualidades físico-mecánicas que le hacen apropiada para el control de la erosión de suelos, siendo un método eficiente, económico y rápido, además de ser amigable con el entorno en el que se trabaja.

Para el control de la erosión en cárcavas se recomienda el uso de trinchos escalonados en guadua, recordando que éstos cumplen la función de disipadores de energía cinética y no de retenedores de sedimentos, ya que no son estructuras fuertes capaces de contrarrestar movimientos en masa. No obstante, bien elaborados, con ayuda de la vegetación multiestrata de la región detienen el deterioro progresivo del proceso de degradación avanzada por el cárcavamiento.

Dado el auge que se tiene de las obras de bioingeniería y de las soluciones basadas en la naturaleza para la reducción del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático, se recomienda a la academia en Colombia profundizar en la investigación del tema y hacer publicaciones divulgando los casos implementados a nivel local, pues como se pudo ver en el análisis bibliográfico la mayoría de publicaciones refieren a zonas urbanas en países desarrollados de Europa y las instalaciones nacionales sólo se reportan en tesis de grado o en cartillas y guías de instituciones nacionales o regionales.

Se recomienda para futuros procesos de intervención tener con antelación a la investigación una mayor relación con la administración municipal y la comunidad para poder contar con información de primera mano y hacer efectiva la intervención y la ejecución de la solución, la cual queda limitada muchas veces por el aporte económico que se pueda dar desde las administraciones municipales y la necesidad de mano de obra para la construcción de las obras por parte de las comunidades.

Se recomienda a las administraciones municipales realizar procesos de transferencia de conocimiento a las comunidades rurales en gestión del riesgo y medidas de intervención correctiva mediante soluciones basadas en la naturaleza y bioingeniería, pues en estas zonas, donde son frecuentes la ocurrencia de procesos erosivos y remoción en masa que generan riesgo de desastres la propia comunidad puede ejecutar soluciones prácticas que estén a su alcance mediante la gestión de los recursos naturales.

Los casos de estudio puntuales presentados en este estudio se evidencian en muchas más zonas del municipio de San Vicente Ferrer y municipios vecinos con condiciones similares, por lo que se recomienda a las administraciones municipales implementar las soluciones aquí propuestas como medidas de intervención correctiva en zonas de erosión que afecten vías rurales, para lo cual es necesario hacer la caracterización de cada punto que permita el mejor diseño de obra que se adapte a las condiciones puntuales.

11. Referencias bibliográficas

Acuerdo 008 de 2017. Por el cual se adopta el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del municipio de San Vicente Ferrer – Antioquia. Julio 15 de 2017.

Christine Moos, Peter Bebi, Massimiliano Schwarz, Markus Stoffel, Karen Sudmeier-Rieux, Luuk Dorren. (2018). Ecosystem-based disaster risk reduction in mountains. *Earth-Science Reviews*, 177, 497-513. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.011>

CORNARE. (2011). *Manual de prácticas para la mitigación temprana del riesgo*. Cornare – Gobernación de Antioquia. Equipo de Gestión del Riesgo de la Oficina de Control Estratégico.

CORNARE. (2012). *Evaluación y zonificación del riesgo por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de San Vicente*. Convenio CORNARE - Gobernación de Antioquia N.º 2011-CF-12- 0051 del año 2011. Equipo De Gestión Del Riesgo Oficina De Control Estratégico.

Cousins, J. J. (2021). Justice in nature-based solutions: *Research and pathways*. *Ecological economics*, 180, 106874. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106874>

Decreto 1077 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. Mayo 26 de 2015.

Espinal, L.; 1992. *Geográfica ecológica de Antioquia: Zonas de vida*. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 146 p

- Evette, A., Labonne, S., Rey, F., Liebault, F., Jancke, O., & Girel, J. (2009). History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe. *Environmental Management*, 43(6), 972-984. <https://dx.doi.org/10.1007/s00267-009-9275-y>
- Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., De Boissezon, B., & Vandewoestijne, S. (2017). Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research*, 159, 509-518. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.032>
- Gallego, J. J., (2013). *Análisis geomorfológico como apoyo a la búsqueda de actividad neotectónica en el Oriente Antioqueño (oriente cercano a la ciudad de Medellín)* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Medellín, 195 p.
- García-Vega, A., Sanz-Ronda, F. J., Fuentes-Pérez, J. F., Navarro-Hevia, J., & Martínez-Rodríguez, A. (2014). Bases metodológicas para el cálculo de muros entramados de madera con vegetación o muros Krainer. *Informes de la Construcción*, 66(533), e012-e012.
- González, M. y García, D. (2001). *Restauración de ríos y riveras*. Escuela Técnica Superior De Ingenieros De Montes. Fundación Conde Del Valle De Salazar. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España, 262 p.
- Hernández, R.; Fernández, C., Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. Mc Graw Hill. 6ª Edición.
- Holden, P.B., Rebelo, A.J., Wolski, P.W., Odoulami, R.C., Lawal, K.A., Kimutay, J. Nkemelang, T. y New, M.G. 2022. Nature-based solutions in mountain catchments reduce impact of anthropogenic climate change on drought streamflow. *Communication Earth & Environment* 3, 51. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00379-9>

Keesstra, S., Nunes, J., Novara, A., Finger, D., Avelar, D., Kalantari, Z., & Cerdà, A. (2018). The superior effect of nature-based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 610, 997-1009.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077>

Kettenhuber, P. L. W., dos Santos Sousa, R., Dewes, J. J., Rauch, H. P., Sutili, F. J., & Hörbinger, S. (2023). Performance assessment of a soil and water bioengineering work on the basis of the flora development and its associated ecosystem processes. *Ecological Engineering*,

186, 106840. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106840>

Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Abril 24 de 2012. D. O. No. 48411.

Li, M. H. (2006). Learning from streambank failures at bridge crossings: A biotechnical streambank stabilization project in warm regions. *Landscape and Urban Planning*, 77(4), 343-358.

Marchal, R., Piton, G., Lopez-Gunn, E., Zorrilla-Miras, P., Van der Keur, P., Dartée, K. W., ... & Moncoulon, D. (2019). The (re) insurance industry's roles in the integration of nature-based solutions for prevention in disaster risk reduction – insights from a European survey. *Sustainability*, 11(22), 6212. <https://doi.org/10.3390/su11226212>

Morales y Sarmiento (2020). Control de erosión y meteorización con guadua en taludes del municipio de San Francisco Cundinamarca, vereda Tóriba. Tesis de grado. Universidad Católica de Colombia

- Petrone, A., y Preti, F. (2010). Soil bioengineering for risk mitigation and environmental restoration in a humid tropical area. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(2), 239-250.
<https://dx.doi.org/10.5194/hess-14-239-2010>
- Rendón, A; Caballero H; Arias L; González A; Arenas J; Gallego J. (2011). Estudio geológico-geomorfológico en el oriente cercano a Medellín, como apoyo a la búsqueda de actividad tectónica reciente. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, (29), 39-53.
- Rivera, J. H. (1998). *Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos*. Avances Técnicos 256. Cenicafe.
- Rivera, J. H. (2002). *Construcción de trinchos vivos para conducción de aguas de escorrentía en zonas tropicales de ladera*. Avances Técnicos 296. Cenicafe.
- Rivera, J.H.; Sánchez, F de J.; Osorio, A. y Franco L. E. (2015). *Manual de procedimientos con obras de Bioingeniería para el manejo de procesos denudativos*. Manizales: Universidad de Caldas: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Bogotá D.C., Colombia. 104 p.
- Rivera, J.H. y Sinisterra J.A. (2006). *Uso social de la bioingeniería para el control de la erosión severa*. CIPAV. CVC. 110 p.
- Sarmiento, J. D. (2021). *Modelación numérica de taludes reforzados con guadua*. [Tesis de grado. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Bogotá D.C.
- Sebesvari, Z., Woelki, J., Walz, Y., Sudmeier-Rieux, K., Sandholz, S., Tol, S., Ruíz García, V., Blackwood, K. y Renaud, F.G. 2019. Opportunities for considering green infrastructure and ecosystems in the Sendai Framework Monitor. *Progress in Disaster Science* 2, 100021.
<https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100021>

- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga – Colombia, 540 p.
- Suárez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga – Colombia, 556 p.
- Sudmeier-Rieux, K., Arce-Mojica, T., Boehmer, H. J., Doswald, N., Emerton, L., Friess, D., Galvin, A.S., Hagenlocher, M., James, H., Laban, P., Lacambra, C., Lange, W., McAdoo, B. G., Moos, C., Mysiak, J., Narvaez, L., Nehren, U., Peduzzi, P., Renaud F. G., ... Walz, Y. (2021). Scientific evidence for ecosystem-based disaster risk reduction. *Nature Sustainability* 4, 803–810. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00732-4>



Universidad®
Católica
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen

Universidad Católica de Manizales
Carrera 23 # 60-63 Av. Santander / Manizales - Colombia
PBX (6)8 93 30 50 - www.ucm.edu.co